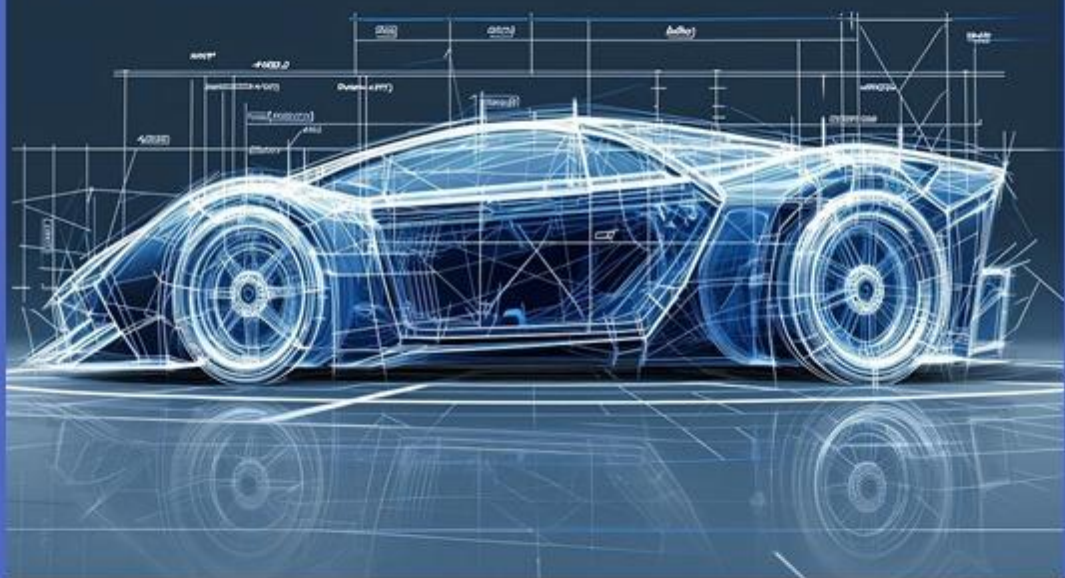


MÜHENDİSLİKTE YENİ TRENDLER VE SINIRLAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE YENİ TRENDLER VE SINIRLAR

Editor

Asist. Prof. Dr. Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Yeni Trendler ve Sınırlar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Ekim 2024

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-6314-53-5

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

CONTENT

1. Bölüm	7
Yalıköy (Didim/Aydın) Kuzeyi Kıyı Şeridi Hidrojeolojisi ve Hidrojeokimyasal Özellikleri	
<i>Ayşen DAVRAZ, Mehmet ÖZÇELİK</i>	
2. Bölüm	27
Toprak Bozulmasının Önlenmesinde Su Yönetiminin Önemi	
<i>Ahmet İSTANBULLUOĞLU, Fatih KONUKCU, İsrail KOCAMAN</i>	
3. Bölüm	50
Hibrit ve Elektrikli Araçların Batarya Sistemlerinde Termal Kontrol: Yenilikçi Soğutma Çözümleri	
<i>Mehmet ÇELİK</i>	
4. Bölüm	67
Açık kömür ocağı işletmelerinde oluşan ocak göllerinin madencilik faaliyetlerine etkileri	
<i>Mehmet ÖZÇELİK</i>	
5. Bölüm	85
Isıtma Sezonu ve Sezonadaki Her Ay İçin Saatlik Serbest Isıtma Derece Saat Değerlerinin Şanlıurfa İçin Araştırılması	
<i>Erdem YAŞAR, Mustafa ERTÜRK, Ömer SEÇGİN</i>	
6. Bölüm	98
Mikro Gaz Türbin Motorlar	
<i>Soner ŞEN</i>	
7. Bölüm	108
Geleneksel Yöntemle Üretilen Bitlis Tulum Peynirinin Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi	
<i>Hacer AÇAR, Şenol KÖSE, Yağmur ERİM KÖSE</i>	
8. Bölüm	124
Türkiye'de Güneş Enerjisi Görünümünün Genel Değerlendirilmesi	
<i>Tarkan KOCA</i>	

9. Bölüm	134
Güneş Paneli Üretimi	
<i>Tarkan KOCA</i>	
10. Bölüm	147
Açık Gözenekli Alüminyumun EPS Strafor Üretiminde Kullanılması	
<i>Hayrettin EKEL, Yahya ALTUNPAK</i>	
11. Bölüm	158
Türkiye ve Dünyada Bulunan Petrol Formasyonları	
<i>Emrullah KANDEMİR, İnci TÜRK TOĞRUL</i>	
12. Bölüm	187
Sismik İzolatörler	
<i>Ömer SEÇGİN, Mustafa Ali Ergün ERTÜRK</i>	
13. Bölüm	203
Sondaj Çamurunun Çevresel Etkileri, Atık Yönetimi ve Bertarafı	
<i>Dilara TAZ, İnci TÜRK TOĞRUL</i>	
14. Bölüm	223
Enkoderli DC Motorda PWM Kontrolü	
<i>Serhat KÜÇÜKDERMENÇİ</i>	
15. Bölüm	232
PID Tabanlı Sıcaklık Kontrol Arayüzünün Geliştirilmesi	
<i>Serhat KÜÇÜKDERMENÇİ</i>	
16. Bölüm	242
Gıda Muhafazasında ve Güvenliğinde Laktik Asit Bakterilerinin Rolü	
<i>Zeynep KİLCİ, Nilay KORKMAZ</i>	
17. Bölüm	257
Doğal Klinoptilolit Mineralinin Mikroskopik Görüntülerine Göre ve Zenginleştirilebilirliğine Yönelik Bulguların Belirlenmesi	
<i>Öykü BİLGİN</i>	
18. Bölüm	267
Akışkan Taşıyan Elastik Boruların Çırpınma Hızı Analizi	
<i>Birkan DURAK, Erol UZAL</i>	

19. Bölüm	282
Türkiye'nin Tarım ve Evsel Su Ayak İzi Analizi ve Diğer Ülkeler ile Karşılaştırılması <i>Muhammet Yunus PAMUKOĞLU, Ahmet Alper BABALIK, İbrahim DURSUN</i>	
20. Bölüm	299
Isparta İlinde Taşıt Trafığından Kaynaklı Karbon Salınımının Belirlenmesi ve Alınabilecek Önlemler <i>Muhammet Yunus PAMUKOĞLU, Ahmet Alper BABALIK, İbrahim DURSUN</i>	
21. Bölüm	317
Bataryalı ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araç Teknolojileri <i>Adem TÜYLÜ, Yasin AKIN, Muhammed Asım KESERCİOĞLU</i>	
22. Bölüm	332
Termoelektrik Modüller ve Kullanım Alanları <i>Sinan ÇOBANER, Ömer ÇERLEK, Kubilay HAN</i>	
23. Bölüm	348
Seralarda Isı Pompası Kullanımı <i>Muhammed Asım KESERCİOĞLU, Sinan ÇOBANER, Yasin AKIN</i>	
24. Bölüm	367
Yeşil Enerji Dönüşümünde Biyogazın Yeri: İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı <i>M. Raşit ATELGE</i>	
25. Bölüm	382
Bütüncül Havza Yönetiminde Karşılaşılan Zorluklar <i>Zekiye ÇETİNKAYA, Şehnaz ŞENER, Erhan ŞENER</i>	
26. Bölüm	399
Atık Karakterizasyonu ve Atık Azaltma Yöntemleri <i>Hilal YILMAZ</i>	
27. Bölüm	424
Mühendislikte Ar-Ge <i>Hasan Ali ÇELİK</i>	

28. Bölüm	447
Fikri Üretim ve Mühendislik <i>Hasan Ali ÇELİK</i>	
29. Bölüm	461
Sulu Çözeltilerden Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Kil Minerallerinde Adsorpsiyon Kapasitesini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi <i>Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ</i>	
30. Bölüm	489
Avrupa Birliği Ülkelerinin Döngüsel Ekonomi Analizi <i>Emirhan Ersin KARACA, Esra Kurt TEKEZ</i>	
31. Bölüm	505
Kauçuk Ürün İmalatında Hata Türü ve Etkileri Analizi <i>Erkan Sami KÖKTEN, Selma KAYMAZ</i>	
32. Bölüm	523
Silindirik Kabuğun Üzerindeki Basıncın Analitik İfadesi <i>Birkan DURAK, Erol UZAL</i>	
33. Bölüm	537
Gaz Sensörlerinin Sınıflandırılması ve Performans Kriterleri <i>Enes NAYMAN, Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL</i>	
34. Bölüm	556
Fonksiyonel Gıdalar <i>Emine Hülya İLKAY, Hamza BOZKIR</i>	

Yalıköy (Didim/Aydın) Kuzeyi Kıyı Şeridi Hidrojeolojisi ve Hidrojeokimyasal Özellikleri

Ayşen DAVRAZ ¹
Mehmet ÖZÇELİK ¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, Isparta,
Orcid.org/0000-0003-2442-103X, Orcid.org/0000-0003-4511-1946

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Yalıköy (Didim) kuzeyinde kıyı şeridinin hidrojeolojik özelliklerinin tespiti, yeraltısularının hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi, su kimyasını denetleyen hidrojeokimyasal süreçlerin tanımlanması, tatlı su-tuzlu su girişim olasılığının araştırılması ve su kalitesine bağlı olarak kullanılabilirlik özelliklerinin tespit edilmesidir. İnceleme alanında Üst Miyosen ve Pliyosen karasal çökeller geniş alanlarda yayılım göstermektedir. Bu çökeller kireçtaşı, konglomera, kumtaşı, marn ve kıltaşı gibi litolojilerden oluşmaktadır. Bu litolojiler içerisinde kıltaşı ve marn seviyelerinin yeraltısuyu bulundurma özelliğinin olmaması nedeniyle yarı-geçirimli olarak nitelendirilmiştir. Bölgede denize yakın lokasyondan alınan yeraltısuyu örneğinin NaCl sınıfında olduğu, bu su sınıfının tuzlu su girişimi ile ilişkili olabileceği ve deniz kuyu karışım oranının %9 civarında olduğu tespit edilmiştir. Diğer su örneklerinde de Cl⁻ iyonu artışı belirlenmiştir. Kıyı şeridinden uzakta alınan su örneklerinin bölgede yüzeyleyen kireçtaşı ve dolomit birimleri ile ilişkili olarak Ca-HCO₃-Cl ve Mg-Ca-HCO₃ su sınıflarında oldukları tespit edilmiştir. Yeraltısuyu kimyası üzerinde kalsit ve dolomit ayrışması ile iyon değişim süreçlerinin etkin olduğu görülmektedir. Özellikle denize yakın lokasyondaki su örneğinin içme suyu ve sulama suyu amaçlı kullanımlara uygun olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su kalitesi, hidrojeokimya, girişimi, Yalıköy, Didim

GİRİŞ

Yeraltısuyu birçok ülkede evsel, tarımsal ve endüstriyel kullanımlar için birincil su kaynağıdır. Yeraltısuyunun akış yolu boyunca besleme alanlarından deşarj alanlarına doğru hareketi sırasında geçirdiği çeşitli hidrojeokimyasal süreçler kimyasal bileşimini değiştirir. Yeraltısuyunun kimyası evsel, sulama ve endüstriyel amaçlar için kullanımını belirleyen önemli bir faktördür. Yeraltısuyu kimyası, genel jeoloji, çeşitli kaya türlerinin kimyasal aşınma derecesi, besleme suyunun kalitesi, endüstriyel ve evsel faaliyetlerden gelen atıklar vb. dış kirlilik unsurlarının etkisi gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Aghazadeh ve Mogaddam 2011:185; Singh vd., 2012:2179; Ayenew vd., 2008:100; Kumar vd., 2006:1030). Yeraltısuyu kimyası, yeraltısuyunun evsel, endüstriyel ve tarımsal amaçlar için uygunluğu

hakkında önemli bilgiler ortaya çıkarabilir. Yeraltısuyunun önemine rağmen, kimyasal bileşimini yöneten doğal olgu veya bunları etkileyen antropojenik faktörler hakkında çok az şey bilinmektedir (Garcia vd, 2001:600). Bu nedenle, yeraltısuyunun kimyasal bileşimini anlamak, çeşitli kullanımlar için yeraltısuyunun geliştirilmesine ve yönetilmesine yardımcı olacaktır.

Son yıllarda nüfus ve kentleşmedeki hızlı büyümeyle ilişkili ekonomik gelişme, arazi kullanımında önemli değişikliklere yol açmış ve bunun sonucunda tarım ve evsel faaliyetler için daha fazla su talebi oluştur. Bu olumsuz etkiler kıyı bölgelerinde daha yoğundur. Kıyı akiferlerinde yukarıda saydığımız olumsuzluklara ek olarak deniz suyu girişi de önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnceleme alanının bulunduğu Didim yarımadası 65 km uzunluğunda farklı yönlere bakan irili ufaklı çok sayıda koya sahip deniz kıyısı, iklimi, hava kalitesi ve antik kentleri ile turizm açısından önemli bir bölgedir. Ayrıca, bu bölgede tarımsal faaliyetlerin de sürdürülüyor olması nedeniyle yeraltısularından yoğun şekilde çekim yapılmaktadır. Didim ilçesinin kuzeyinde bulunan Yalıköy plajlarıyla ünlü turistik bir belde konumundadır. Roma İmparatorluğu döneminden beri yerleşim yeri olarak kullanılan Yalıköy kıyı şeridi aşırı yeraltısuyu çekimlerinin tehdidi altındadır. Bu çalışmada yeni otel vb. konaklama alanlarının yapılamaya başladığı Yalıköy kuzeyi kıyı şeridinin hidrojeolojik özellikleri incelenmiş, bölgeden alınan yeraltısuyu örnekleri ile hidrojeokimyasal özellikler incelenmiştir.

BULGULAR

Jeoloji ve Hidrojeoloji

Paleozoyik yaşlı Menderes Masifine ait metamorfik kayalar bölgenin en yaşlı kaya birimleridir. Jeolojik temel niteliğindeki bu metamorfikler kuvarsit, gnays, kalkşist, biyotitmuskovit şist, klorit şist ve mermerlerden oluşmaktadır. Menderes Masifinin çekirdeğini gnayslar oluşturmaktadır. Tabanı oluşturan gnaysların üzerine kuvarsit, mikaşist geçişinden sonra çeşitli şistler ve daha üstte kalın mermer seviyeleri gelir. Şistler yanal ve düşey yönde birbirlerine geçiş gösterirler. Mermer seviyeleri genellikle beyaz, iri kristalli, sert ve bol kırıklıdır. Bu metamorfik seri Didim yarımadasında yaygın olarak Üst Miyosen ve Pliyosen yaşlı karasal çökeller ile örtülmüştür. Bölgede geniş alanlarda yayılım gösteren Üst Miyosen yaşlı yer yer kömür seviyeleri içeren çakıltası, kumtaşı, kilaşı araldanmalı (m3-18k) seri geniş alanlarda

yüzeylemektedir (Şekil 1). Bu karasal çökellerin üstüne Üst Miyosen – Pliyosen yaşlı kireçtaşları (m3-Pl-8k) gelmiştir.



Şekil 1: İnceleme Alanının Yer Bulduru, Jeoloji ve Örnek Noktaları Haritası

Üste doğru Pliyosen yaşlı çakıltası, kumtaşı, kıltaşı ardalanması (Pl-18k) ve Pliyosen yaşlı kireçtaşı (Pl-8k) seviyeleri yer alır. Bazı kesimlerde serinin son seviyesini Pliyo-Kuvaterner yaşlı kaba-iri bloklu çakıltası ve kumtaşı ardalanması oluşturur. Metamorfitle ile Tersiyer çökelleri arasında, grabenler oluşturan doğu-batı doğrultulu normal faylar bölgenin hâkim yapısal unsurlarını oluşturmaktadır. Ayrıca bunları kesen K-G uzanımlı faylarda arazide mevcuttur (Şimşek vd., 1979:45).

Bölgede geniş alanlarda yüzeyleyen karasal çökeller yarı geçirimli birim olarak değerlendirilmiştir. Bu çökeller içerisindeki kireçtaşı, kumtaşı ve çakıltası seviyelerinden yeraltısuyu alınabilmektedir. Bu birimlerde açılmış çok sayıda keson ve sığ sondaj kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyularda yeraltısuyu seviyeleri 10 m ile 15 m arasında değişmektedir. Bu kuyu suları tarımsal veya hayvancılık faaliyetleri için kullanılmaktadır. Ancak, kuyuların çoğunluğunda farklı derinliklerde (hemen hemen güncel deniz seviyesinden itibaren) tuzlanma ile karşılaşıldığı belirtilmiştir. Denize kıyı olan bölgelerde debileri mevsime bağlı olarak değişen kaynak boşalmaları da gözlenmektedir. Yalıköy yerleşiminin güneyinde yer alan Palamut Deresi'nin vadi tabanında içme suyu amaçlı kullanılan kuyular bulunmaktadır. Bu kuyuların derinlikleri 150 – 300 m arasında değişmektedir.

Hidrojeokimyasal değerlendirmeler

Yeraltısularının hidrojeokimyasal özellikleri akifer ortamın mineralojik ve kimyasal özellikleri, suların etkileşimde bulunduğu kayaç türleri, antropojenik etkenler, etkileşim süresi, akış yolları ve sıcaklık gibi pek çok faktörden etkilenmektedir (Appelo ve Postma, 1993:185; Freeze ve Cherry, 1979:238). Su kaynaklarının farklı alanlarda kullanılabilirlik özelliklerinin belirlenmesinde majör iyon içerikleri ve fiziksel parametreler (EC, pH, Sıcaklık vb.) kullanılmaktadır. Suların kimyasal özelliklerinden etkilenen en önemli parametre Elektriksel İletkenlik (EC)'dir. EC değeri +25 °C'deki 1 cm³ suyun iletkenliği olup sudaki iyon içeriğine, iyonların derişim miktarlarına ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir (Erguvanlı ve Yüzer, 1987:255; Şahinci, 1991:175). İnceleme alanında su kaynaklarının EC değeri 880-7060 µS/cm arasındadır. PH, su içindeki H⁺ ve OH⁻ iyonu içeriklerine bağlıdır. Yeraltısularının pH<7 olup genel olarak asit özelliği fazla olan suları temsil etmektedir. Yerüstü suları ise pH>8 olan bazik özellikte sulardır. Yeraltısularının pH'ı, çözünmüş karbondioksit ile karbonat türleri arasındaki dengeye bağlıdır (Erguvanlı ve Yüzer, 1987:254). İnceleme alanında su

örneklerinin pH değeri 6.43-7.04 arasında olup asit karakterli suları temsil etmektedir. Suların sertliği 44-115 arasında değişmekte olup sertlik derecesine göre Oldukça sert sular sınıflarındadır (Tablo 1). TDS, kayalarda bulunan farklı minerallerin çözünürlüğüne bağlıdır (Hem, 1970:345). Çalışma alanında yeraltısularının TDS değeri 552 ile 4182 mg/l arasında değişmektedir.

Major İyon İçerikleri

Yeraltısuyu sisteminde çözünmüş iyonların varlığı akifer ortamda etkili olan çeşitli jeokimyasal süreçler ile denetlenir. İnceleme alanında üç ayrı kuyudan yeraltısuyu örnekleri alınmıştır. Bu örneklerden denize yakın olan 1 nolu örnekte iyon dizilimleri $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+$, $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$ olarak belirlenmiştir. Diğer iki örnekte ise $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ve $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2}$ şeklindedir. İnceleme alanından alınan yeraltısuyu örneklerinde Na^+ içerikleri 30-1116 mg/l, K^+ 1.9-45 mg/l, Ca^{+2} iyonu 84-210 mg/l, Mg^{+2} içerikleri ise 33-152 mg/l arasında değişmektedir. HCO_3^- 436-472 mg/l, SO_4^{-2} 11-306 mg/l ve Cl^- 67-2022 mg/l arasında tespit edilmiştir.

1 nolu örnekte baskın katyon Na^+ 'dur. Na^+ iyonu alkali metaller arasında yer kabuğunda en fazla bulunan katyondur. Deniz suyunda klordan sonra dördüncü, tatlı sularda yedinci sırayı almaktadır (Şahinci, 1991:327). Kil mineralleri, evaporitler, feldispatlar, magmatik kayalar ve feldispatoidler Na^+ içeren önemli mineral ve kayaları oluşturmaktadır. Yeraltısularında Na^+ varlığı yeraltısuyunun pH'ına, yeraltısuyu akım hızına, mineral cinsi ile oranına, bozunum süresine, ortamdaki kalsiyum iyon derişimine, doğal ve yapay kirlilik vb. etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Okyanus ve denizlerin buharlaşması ile su molekülleri, NaCl zerlerini atmosfere taşırlar. Kıyılardan karalara doğru esen rüzgarlar, havadaki NaCl'ü 100-200 km içerilere taşıyabilir. Kıyılarda yağışlar vasıtasıyla yeryüzüne düşen NaCl suların sodyumca zenginleşmesini sağlar. Ek olarak kıyılarda tatlı-su tuzlu su girişimleri, volkan kül ve fümerollerindeki sodyum tuzlarının sulara karışması ile sodyum zenginleşmesi gözlenebilir (Şahinci, 1991).

Diğer iki örnekte baskın olan Ca^{+2} iyonu ise kalsit, dolomit, jips, anhidrit ve aragonit minerallerinde bulunmaktadır. Ek olarak, piroksen, amfibol, florit, ve apatit minerallerinin bozunumu kaynaklı kalsiyum iyonları yeraltısularına geçer. Suda çözünmüş CO_2 miktarı arttıkça kalsiyumun çözünürlüğü yükselir. Yeraltısularının kimyasal bileşimi genellikle Ca-

HCO₃'lidir. Jips yataklarından gelen sulara Ca-SO₄'lı sulara gözlenebilir (Şahinci, 1991:334).

Tablo 1: Su örneklerine ait analiz sonuçları ve iyon oranları

Örnek mo	1 Orman kampı	2 D. pansiyon kuyu	3 Fedai kuyu
pH	6,9	7,04	6,43
EC (µS/cm)	7060	1085	880
T °C	20,8	19,8	19,4
TDS (mg/l)	4182	688	552
Ca (mg/l)	210	153	84
Mg (mg/l)	152	33	56
Na (mg/l)	1116	36	30
K (mg/l)	45	1,9	1,9
HCO ₃ (mg/l)	461	436	472
Cl (mg/l)	2022	147	67
SO ₄ (mg/l)	306	11	12
As (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
B (mg/l)	0,54	<0,1	<0,1
Ba (mg/l)	<0,1	0,12	0,18
F (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
Fe (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
Li (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1
Sr (mg/l)	1,0	0,51	0,61
SiO ₂ (mg/l)	32	39	79
Serbest CO ₂	74	43	33
Su sınıfı	NaCl	Ca-HCO ₃ -Cl	Mg-Ca-HCO ₃
CAI-I	7,31	2,53	0,54
CAI-II	0,52	0,34	0,07
Na/Cl	0,85	0,38	0,69
Ca/Mg	0,84	2,81	0,91
HCO ₃ /SiO ₂	14,41	11,18	5,97
(Ca+Mg)/HCO ₃	3,04	1,45	1,14
Ca/(Ca+SO ₄)	0,62	0,97	0,94
Na/(Na+Cl)	0,46	0,27	0,41
Sertlik °Fr	114,9	51,74	43,99
%Na	66,8	13,09	12,86
SAR	14,33	0,69	0,62

Mg⁺² yeraltısularında genel olarak dolomit mineraline bağlı olarak bulunur. Ayrıca, magmatik (olivin, hornblend, biyotit, ojit) ve metamorfik (serpantin, tremolit, talk, diopsid) kaya mineralleri ile evaporit mineraline bağlı olarak da Mg⁺² bulunabilir. Dolomitin kalsiyum mineraline göre çözünürlüğünün az olması nedeniyle Ca⁺² yeraltısularında Mg⁺² iyonuna göre yüksek oranda bulunur (Şahinci, 1991:340).

1 nolu örnekte baskın anyon olan Cl⁻'ün yeraltısuları için doğal kökeni dört ayrı kaynakla açıklanabilir. Bunlar (1) Deniz suyu saçınımından yağmur

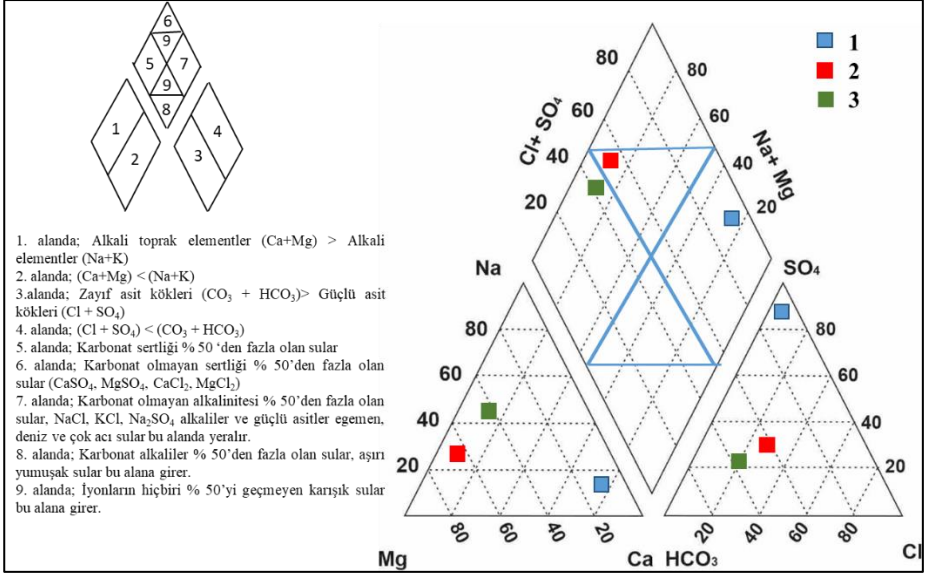
suyunda bulunan Cl^- (sea spray), (2) Deniz suyu saçınımı esnasında su damlalarının buharlaşması sonucu oluşan Cl^- içeriği yüksek toz partiküllerinin rüzgâr vasıtasıyla karalara taşınarak yağması (dry fall out) ve toprak yüzeyinde toz halinde biriken tuzların yağmur suyu ile birlikte yeraltısuyuna karışması, (3) Cl^- içeren minerallerin (evaporitler, klorapatit, feldispatoyid grubu mineraller, mikalar ve hornblend) çözünmesi ve magma kaynaklı oluşabilecek Cl^2 gazları ve (4) Deniz suyu olarak tanımlanmaktadır (Kurttaş, 2002:305). Yeraltısuyunda antropojenik kökenli Cl^- 'nin ana kaynakları arasında endüstriyel üretim, tarımsal faaliyetler, belediye çöplükleri ve atıklar gibi antropojenik faaliyetler yer almaktadır.

Genel olarak yeraltısularında baskın anyon olan HCO_3^- toprak ve atmosferdeki CO_2 varlığına bağlı olarak gerçekleşen karbonatlı kayaların çözünmesi olayı ile yeraltısularında bulunmaktadır. Bu nedenle, sulardaki HCO_3^- miktarı suyun CO_2 ve pH değerlerine bağlı olarak değişir (Erguvanlı ve Yüzer, 1987:254). Yeraltısularında HCO_3^- varlığı kalsiyum karbonatın CO_2 tarafından çözünmesi ile gerçekleşir (Eş.1). HCO_3^- ve Ca^{+2} yağmur suyunun süzülmesi sırasında yeraltısuyuna salınacaktır. Benzer şekilde, silikat aşınması da yeraltı suyuındaki HCO_3^- konsantrasyonunu artırır (Elango ve Kannan 2007:230).



Suların majör iyon içerikleri dikkate alınarak yeraltı sularının kimyasal bileşimini tanımlamak ve farklı su tiplerini sınıflandırmak mümkündür. Bu değerlendirmelerde Back (1966) tarafından geliştirilen hidrojeokimyasal fasiyes kavramı ön plana çıkmaktadır. Hidrojeokimyasal fasiyes kavramı su bileşimlerinin belirli kategorilere ayrılmasına ve su ile kayalar arasında gerçekleşen kimyasal süreçlerin tespitinde kullanılır. Bu tanımlamada bir iyon türünün yüzdesi, diğerlerine kıyasla %50'den fazla olduğunda, bu iyon, suyun fasiyes tipini tanımlamada baskın olarak kabul edilir. Hidrojeokimyasal fasiyes belirlemelerinde en çok kullanılan grafik Piper grafiğidir. Bu grafikte katyon ve anyonların ayrı ayrı değerlendirildiği iki üçgen ve bütün majör iyonların kullanıldığı bir dörtgenden oluşmaktadır. Bu grafikte dörtgen 9 alt alana ayrılmaktadır (Şekil 2). Piper diyagramına göre 1 nolu örneğin 2, 4 ve 7. alanda yer aldığı görülmektedir. Bu sularda $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ toplamı $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ toplamından ve $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{+2}$ iyonları toplamı $\text{CO}_3^{+2} + \text{HCO}_3^-$ dan büyüktür. Bu su örneği karbonat olmayan alkalinitesi % 50'den fazla olan sular, NaCl tipi sulardır. Deniz suları bu alanda yer almaktadır. 1 nolu örneğin

hidrojeokimyasal fasiyesi NaCl olarak belirlenmiştir. Diğer iki örnek diyagramda 1 ve 3. alanda yer almaktadır. Bu sular iyon içerikleri ($\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$) $> (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ ve $(\text{CO}_3^{-2} + \text{HCO}_3^{-}) > (\text{Cl}^{-} + \text{SO}_4^{-2})$ olan suları temsil etmektedir. 2 nolu örneğin hidrojeokimyasal fasiyesi Ca-HCO₃-Cl, 3 nolu örneğin ise Mg-Ca-HCO₃ olarak belirlenmiştir. 2 nolu örnek karışım sularını temsil etmektedir.



Şekil 2: Piper Diyagramı

Hidrokimyasal bileşenlerin tanımlanması

Yeraltısuları ile akifer mineralleri arasındaki reaksiyonlar, su kalitesinin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir ve yeraltı suyunun kökeni hakkında bilgi sağlar. Yeraltısularında çözünmüş katıların çoğunluğunu majör iyonlar oluşturur ve bu iyonların miktarı, akifer ortamdaki hidrojeokimyasal süreçlerden doğrudan etkilenir (Subramani vd., 2010:128; Lakshmanan vd., 2003:160). Bu süreçler, yeraltısuyunun majör iyon konsantrasyonlarının dengeye ulaşmasına yol açar. Bu nedenle, yeraltısularındaki majör iyonların konsantrasyonlarının incelenmesi, jeokimyasal süreçlerin tanımlanmasında önemli bir araç olarak kullanılır. Sudaki çözünmüş iyonların bulunma miktarı rezervuar kayanın özellikleri, akifer ortamdaki bollukları ve çözünürlüklerine bağlıdır (Sarin vd., 1989:1000). Yağış suları yeraltına süzülürken veya akifer ortamdaki hareketi sırasında iyon bileşimlerinin değişimini kontrol etmek imkânsızdır. Ancak, akiferde suyun dolaşımı sırasında suların kimyasal

değişimleri yorumlanabilir. Yeraltısuyunun kimyasal yapısını denetleyen hidrojeokimyasal etkenler genel olarak ayrışma-çözünme (silikat ve karbonat ayrışması), iyon alışverişi ve buharlaşma olarak tanımlanmaktadır.

Su kimyasını kontrol eden temel faktörlerden biri olan iyon değişimi, yeraltısuyunun etkileşimde olduğu kayaçlar ile su arasında gerçekleşmektedir. İyon değişim süreçlerinin tanımlanmasında Schoeller (1965:60, 1977:12) tarafından önerilen Kloroalkalin indeksi (CAI-I, CAI-II) değerleri kullanılmaktadır (Eşitlik 2, 3). Bu eşitliklerde iyon içerikleri meq/l cinsindendir.

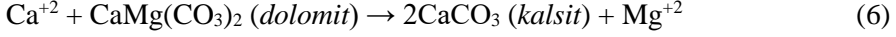
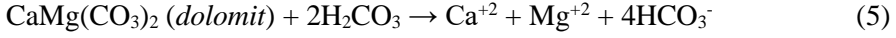
$$CAI-I=[Cl-(Na+K)]/Cl \quad (2)$$

$$CAI-II=[Cl-(Na+K)]/(SO_4+HCO_3+CO_3+NO_3) \quad (3)$$

CAI endeksleri pozitif olduğunda doğrudan iyon değişiminin varlığı söz konusu olup kayada bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} katyonları ile suda bulunan Na^+ ve K^+ katyonlarının değişimini yansıtmaktadır (Aghazadeh ve Mogaddam, 2011:189; Zaidi vd., 2015:607). Bölgeden alınan yeraltısuyu örneklerinin CAI-I ve CAI-II değerlerinin tamamı pozitifdir. Bu durum bölgedeki yeraltısularında Na^+ varlığının sudan kaynaklandığını göstermektedir.

Buharlaşma etkisi yüzey sularında genel olarak görülen bir olgudur. Bu etki yeraltısuyu sisteminde de gözlenebilmektedir. Na/Cl oranı, çeşitli araştırmalarda yeraltısularında buharlaşma etkisinin varlığını değerlendirmek amacı ile kullanılmaktadır. Araştırma alanından alınan yeraltısuyu örneklerinin Na/Cl oranları 1'den küçüktür (Tablo 1). Na/Cl oranının 1'den küçük değerleri iyon değişim süreçlerini yansıtmaktadır.

Su örneklerinin Ca^{+2}/Mg^{+2} değerinden yeraltısuyunda kalsit ve dolomit çözünürlüğü yorumlamalarında yararlanılmaktadır. $Ca^{+2}/Mg^{+2} = 1$ oranı dolomitin çözünmesini gösterirken, daha yüksek bir oran kalsitin çözünmesini ifade eder (Maya ve Loucks, 1995:48). Daha yüksek Ca^{+2}/Mg^{+2} oranları (>2) silikat ayrışmasını gösterir, bu da yeraltı suyundaki Ca^{+2}/Mg^{+2} konsantrasyonunu artırır (Katz vd. 1998:1020). 1 ile 2 arasındaki oranlar hem kalsit hem de dolomit çözünmesini gösterir (Eş. 3,4) (Hounslow 1995: 142; Han vd., 2009:250; Roy vd., 2020:958). Örneklerin $Ca^{+2}/Mg^{+2} < 1$ eğilimi, Ca^{+2} 'un kalsit çökmesi yoluyla sistemden uzaklaştırıldığı ve Ca^{+2}/Mg^{+2} oranının 1'in altına düştüğü dedolomitleşme süreciyle (Eş.5) de açıklanabilir (Hounslow 1995: 143):



İnceleme alanında 1 ve 3 nolu örneklerin $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ oranı 1'den küçük olup bölgedeki jeolojik özellikler de dikkate alındığında kalsit çözünürlüğünden bahsedilebilir. 2 nolu örnekte ise $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ oranı 2'den büyük olup silikat ayrışmasını yansıtmaktadır.

$\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$ değeri yeraltısuyunun kimyasını etkileyen ayrışma süreçlerinin türünü belirlemede kullanılabilir. $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2 < 5$ ise silikat ayrışmasını, $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2 > 10$ ise karbonat ayrışmasını yansıtır (Tay, 2012:2084). İnceleme alanında yeraltısuyu örneklerinin $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$ oranı 10'dan büyük olup karbonat ayrışmasını yansıtır (Tablo 1).

Su örneklerinin $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ oranı da ayrışma türünün tespitinde kullanılmaktadır. Bu değer 1'den büyük ise baskın ayrışma türü karbonat ayrışmasıdır. Oranın 1'den küçük olması silikat ayrışmasının baskınlığını yansıtmaktadır (Kumar Singh vd., 2012:2182). İnceleme alanında su örneklerinin $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ oranı 1'den büyük olup karbonat ayrışmasını yansıtmaktadır. Ayrıca, su örneklerinin $\text{Ca}^{+2}/(\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$ değerleri 0,5'ten büyük olup bu durum sudaki kalsiyum kaynağının kalsit/dolomit, jips-karbonatları veya silikatlar haricinde olduğunu göstermektedir (Tay, 2012:2085). Ek olarak, $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$ oranının > 0.5 değerleri Na^+ varlığının iyon değişim süreçleri ve plajiyoklas ayrışmasından kaynaklandığını göstermektedir (Hounslow, 1995:145).

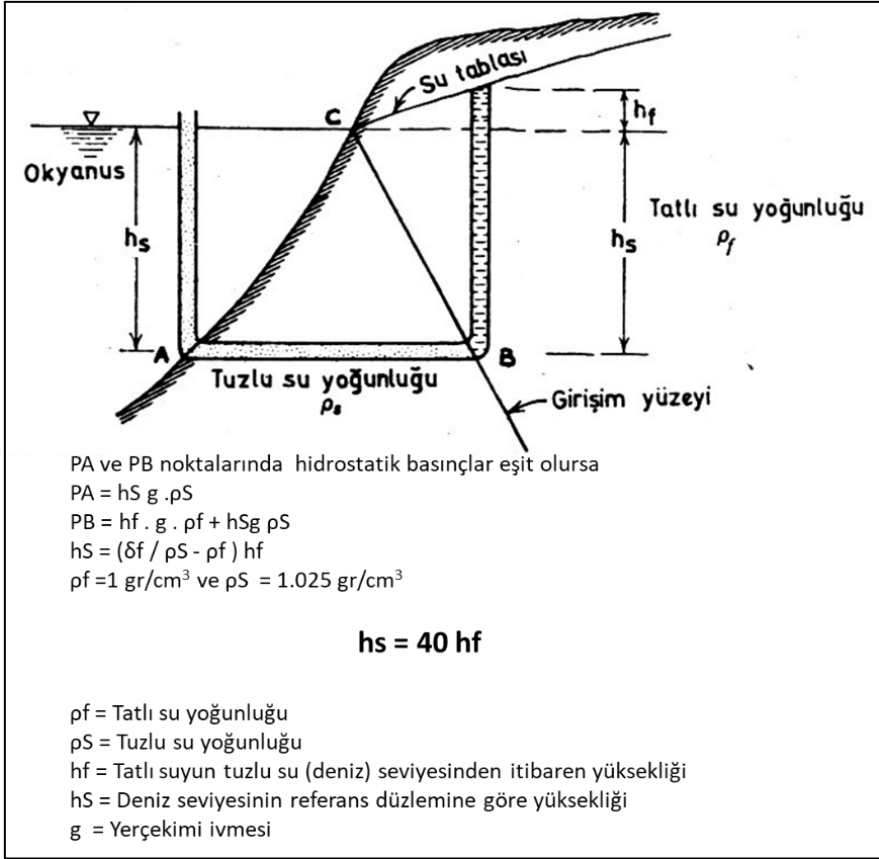
Tatlı-tuzlu su girişi

Günümüzde, yeraltısularının artan kullanımına paralel olarak kıyı bölgelerinde tuzlu suyun tatlı su akiferlerine karışması problemi de yaygınlaşmaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde yeraltısuyu tuzlanması önemli bir problem teşkil etmektedir. Normal koşullarda, serbest ve basınçlı akiferlerdeki yeraltısuyu seviyesi genellikle topoğrafyaya bağlı bir hidrolik eğimle denize ulaşmaktadır. Başka bir ifadeyle yeraltısuları denize boşalmaktadır. Ancak, bazı doğal olaylar ve insan kaynaklı etkenler nedeniyle yeraltısuyunun hidrolik eğiminin bozulması ya da fazla su çekilmesine bağlı olarak yeterli beslenmenin olmaması durumunda deniz suyunun

yeraltısularına sokulduğu görülmektedir. Bu olaya tatlı su-tuzlu su girişimi adı verilmektedir. Deniz suyunun yeraltısuları içine sokulması Med-Cezir, rüzgâr, buzulların çözülmesi ile deniz seviyesinin yükselmesi, yeraltısuyu seviyesinin insan eli ile düşürülmesi ve akiferden fazla su çekilmesi gibi etkenler ile gerçekleşir. Deniz kıyısındaki akifer ortamlarda kıyıya yakın bölgelerden sürekli fazla su çekilmesi karadan denize olan hidrolik eğimin yön değiştirmesine neden olur ve deniz suları tatlı su akiferine kilometrelerce sokulabilir.

Kıyı akiferlerinde yeraltısuyu boşalımı denize doğru olurken aşırı su çekimine bağlı olarak deniz suyu da akifere doğru girişim yapar. Tuzlu su yoğunluğunun tatlı yeraltısuyu yoğunluğundan fazla olması nedeniyle yeraltısuyu kıyıdaki akış güzergâhından denize akarken tuzlusu da tatlı yeraltısuyunun alt kısmından akifere doğru ilerlemektedir. Tatlısu-tuzlusu ilişkisi üzerine kurulan ilk bağıntı, birbirinden habersiz çalışarak aynı sonuçlara ulaşan araştırmacıların adları ile Ghyben-Herzberg bağıntısı olarak isimlendirilmektedir. Ghyben ve Herzberg, denize yakın sahil kesimlerinde açılan kuyularda tuzlu suyun deniz seviyesinden itibaren başlamadığını üstteki tatlı su ile alttaki tuzlu suyun bir arakesit yüzeyi ile birbirlerinden ayrıldıklarını ileri sürmüştür. Yeraltısuyu ile deniz suyu arasındaki girişim yüzeyi ile ilgili bir denklem ortaya konulmuştur. Bu denklem tatlı yeraltısuyu ile tuzlusu arasında bir yüzey boyunca yoğunluk farkından ileri gelen hidrostatik dengenin varlığına dayanır (Şekil 3; Freeze ve Cherry, 1979:156). Bu bağıntıya göre tatlı suyun denizden 1.00 m yükseklikte olduğu bir bölgede tatlısu-tuzlu girişim yüzeyinin derinliği 40 m olarak belirlenmektedir. Arazi ve laboratuvar gözlemleri tatlı-tuzlu su arasında kesin sınır bulunmadığını ve kalınlığı cm boyutundan 50- 60 m'lere kadar ulaşabilen geçiş zonunun yer aldığını göstermiştir. Geçiş zonu; yeraltısuyunun beslenmesine, ortamın permeabilitesine, med-cezir gibi statik ve dinamik seviyenin değişmesine bağlı olarak azalıp çoğalabilir.

Tatlı su-tuzlu su girişiminin tespit edilmesinde en basit olarak suyun Cl⁻ miktarı ölçülür. Kıyılardan uzaklaştıkça yeraltısuyundaki Cl⁻ miktarı önemli oranda azalacaktır. Yağış suyunda 1 mg/l olan Cl⁻, deniz suyunda 19000 mg/l'ye kadar ulaşabilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1987:241). İnceleme alanında 1 nolu örnek denize çok yakın mesafede bulunmakta olup yüksek Na⁺, Cl⁻ ve EC içeriklerine sahiptir. Bu nedenle bu bölgede tatlı su-tuzlu su karışımının olduğu düşünülmektedir. Deniz suyu karışım miktarının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır (Kurttaş, 2002:300). Deniz suyu için Cl⁻ miktarı Başaran (2021) tarafından yapılan araştırmadan alınmıştır.



Şekil 3: Tatlı Su –Tuzlu Su Yüzeyi Arasındaki İlişki, Ghyben ve Herzberg Bağlantısı

$$K = (CI_D - CI_K) / (CI_D - CI_S) \quad (7)$$

Formülde;

K = Tatlı su oranı,

CI_D = Deniz suyunun klorür miktarı (21893 mg/l),

CI_K = 1 nolu örneğin klorür miktarı (2022 mg/l),

CI_S = Soğuk suyun klorür miktarı (67 mg/l)'nı vermektedir.

Hesaplamalara göre 1 nolu kuyu suyu örneğinde %91 tatlı su ve %9 oranında deniz suyu içeriği olduğu belirlenmiştir. Deniz suyu girişimine bağlı

olarak kuyu suyunun EC ve TDS değerlerinde artış görülmekte ve su sınıfı NaCl halini almaktadır.

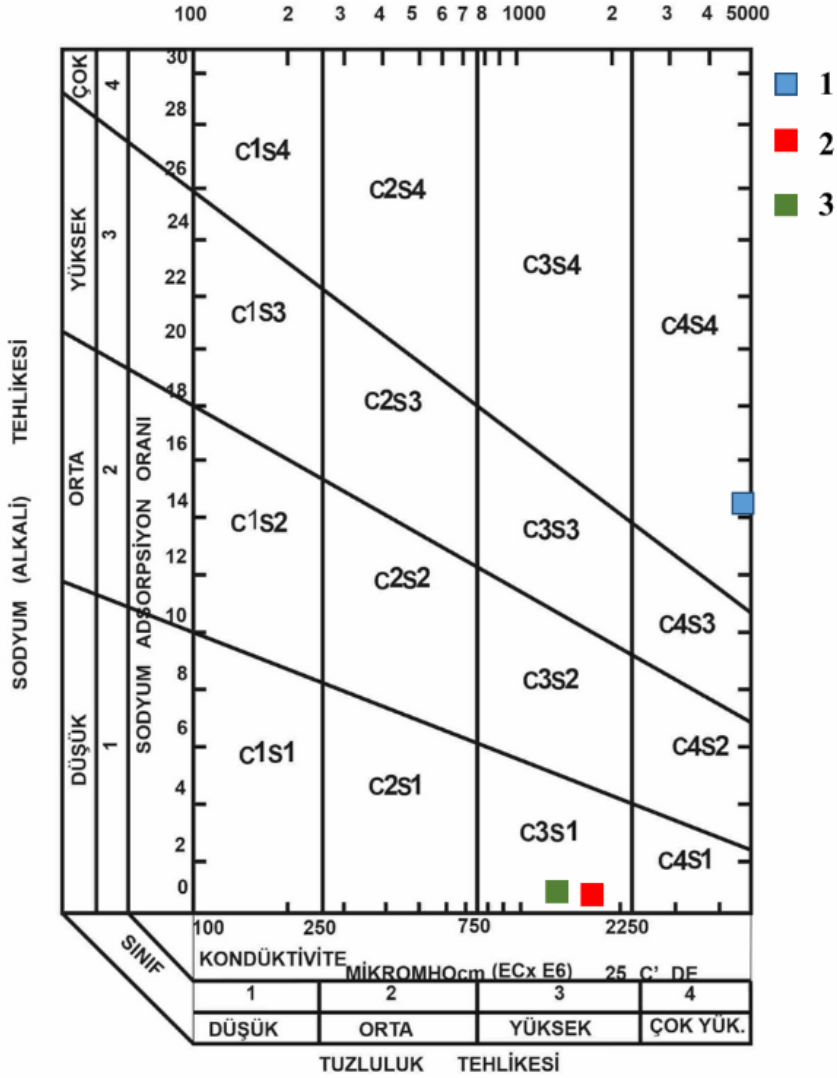
Suların Kullanılabilirlik ve Kalite  zellikleri

Suların içme suyu, kullanım suyu ve sulama suyu olarak farklı amaçlar için kullanılabilirliğinin belirlenmesinde en önemli parametre suyun fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özellikleridir. Suların içme suyu olarak kullanımında suyun analiz sonuçlarının standartlarda verilen sınır değerle içerisinde kalması istenir. Ülkemizde “ nsani Tuketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik”  nceki ismiyle TS266 ( TASHY, 2005) kullanılmaktadır. İnceleme alanında su örneklerinin analiz sonuçları bu sınır değerler ile karşılaştırıldığında 1 nolu  rneğin EC, Na⁺, Cl⁻ ve SO₄⁻² içerikleri açısından içilemez olduğu belirlenmiştir. Diğer su örnekleri ise analizi yapılan parametreler açısından içme suyu olarak kullanıma uygundur. Ancak, içme suyu olarak kullanımda yeni bakteriyolojik, iz element analizlerinin yapılarak yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

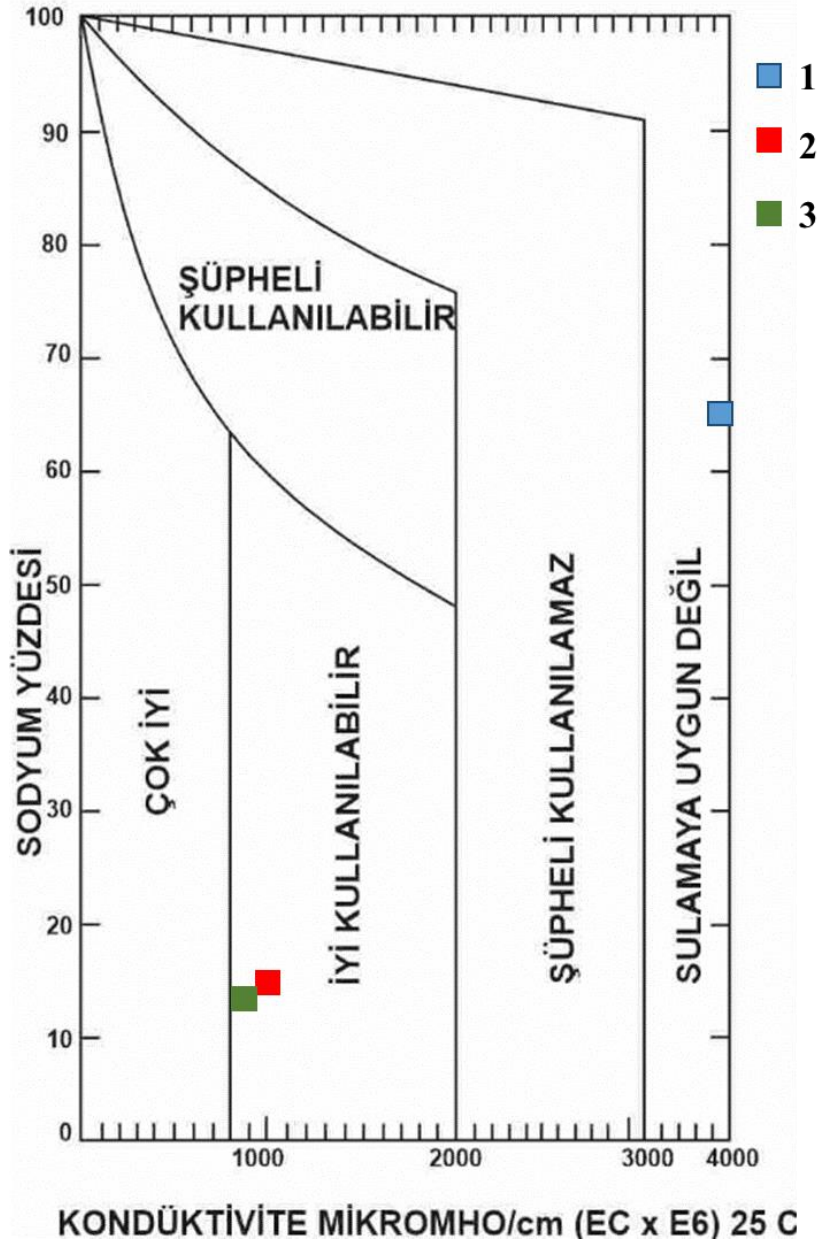
Sulama suyu uygunluğuna yönelik değerlendirmelerde ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı ve Wilcox diyagramı yaygın olarak kullanılan diyagramlardır. Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ve EC değerlerinde göre düzenlenen ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre 1 nolu  rneğin “C₄S₄” diğer örneklerin ise “C₃S₁” sınıflarında olduğu görülmektedir ( ekil 4). Buna göre 1 nolu örnek sulama suyu olarak kullanılamaz. Diğer yeraltı suları ise “Fazla tuzlu-Az sodyumlu” suları temsil etmekte olup bitki türüne göre bazı bitkilerde kullanılması uygundur. %Na ve EC değeri kullanarak hazırlanan Wilcox diyagramında ise 1 nolu yeraltı suyu örneğinin “sulamaya uygun değil” diğer su örneklerinin ise “iyi kullanılabilir” sular sınıfında oldukları görülmektedir ( ekil 5).

SAR değeri sulama suyu olarak kullanılabilirliğin değerlendirildiği ölçütlerden biridir. Bu değer ile Na⁺’un toprakta soğurulabilirliği doğrudan ilişkilidir. Na⁺ içeriği toprağın yapısını bozarak geçirgenliğini azaltır. (Richards, 1954:85). Çalışma alanında suların SAR değerleri 0.62-14.33 arasında değişmekte olup “ ok iyi –iyi özellikte sulama suları” sınıfındadır. Suda sodyum fazlalığı toprak yüzeyinde sert bir tabaka oluşmasını sağlar. Bu sert tabaka bitki köklerinin havalanmasını engellemekte ve bitkiler için de zehirli bir ortam oluşmasına neden olmaktadır. Bu etkenlerden dolayı %Na değeri sulama suyu olarak kullanımın değerlendirilmesinde dikkate alınmaktadır (Erguvanlı ve Yüzer, 1987:255). %Na değerine göre sulama

suju olarak kullanımda mükemmel (<20), iyi (20-40), izin verilebilir (40-60), şüpheli (60-80) ve uygunsuz (>80) olmak üzere beş sınıfa ayrılır. İnceleme alanında su örneklerinin %Na değeri ise 12.86 ile 66.8 arasında değişmektedir. 1 nolu örneğin sulama suju olarak “şüpheli” sınıfında olduğu diğer örneklerin “mükemmel” sınıfında olduğu görölmektedir.



Şekil 4: ABD Tuzluluk Laboratuvarı Diyagramı



Şekil 5: Wilcox Diyagramı

SONUÇ

İnceleme alanı Aydın ili Didim ilçesi kuzeyinde bulunan Yalıköy beldesi kıyı şeridini oluşturmaktadır. Bölgede turizm faaliyetlerinin artışına bağlı olarak çok sayıda farklı turistik tesis kurulmaya başlanmıştır. Bölge halkı aynı zamanda tarım ve hayvancılık ile de uğraşmaktadır. Bu faaliyetlerin artışına bağlı olarak bölgede en önemli kullanılabilir tatlı su yeraltısuyu olmuştur. Bu çalışmada, Yalıköy ve çevresinde kireçtaşı, konglomera, kumtaşı, marn ve kilaşı gibi litolojilerden oluşan Üst Miyosen-Pliyosen karasal çökellerin geniş alanlarda yüzeyledikleri tespit edilmiştir. Bu çökeller içerisinde bulunan kireçtaşı, kumtaşı ve konglomera seviyeleri yayılım, kalınlık ve birbirleriyle ilişkili kırık-çatlak seviyelerinin yoğunluğu oranında yeraltısuyu içermektedir. Bu nedenle bölgedeki karasal çökeller hidrojeolojik açıdan yarı-geçirimli olarak nitelendirilmiştir. Bu birimlerde açılmış çok sayıda keson ve sığ sondaj kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyularda yeraltısuyu seviyeleri 10 m ile 15 m arasında değişmektedir. Bölgede yeraltısuları genel olarak sulama ve hayvan yetiştiriciliğinde kullanılmaktadır. Ancak, kuyuların çoğunluğunda farklı derinliklerde deniz suyu girişimine bağlı olarak tuzlanma gözlenmektedir.

İnceleme alanında denize farklı mesafelerde üç adet yeraltısuyu örneği alınmıştır. Bu örneklerin EC değeri 880-7060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmekte olup en yüksek değer denize yakın lokasyonda tespit edilmiştir. Yeraltısuyu örneklerinin Na^+ içerikleri 30-1116 mg/l, K^+ 1.9-45 mg/l, Ca^{+2} iyonu 84-210 mg/l, Mg^{+2} içerikleri ise 33-152 mg/l arasında değişmektedir. HCO_3^- 436-472 mg/l, SO_4^{+2} 11-306 mg/l ve Cl^- 67-2022 mg/l arasında tespit edilmiştir. Denize yakın lokasyondan alınan 1 nolu örnekte EC, Na^+ ve Cl^- içeriklerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu su örneği NaCl hidrojeokimyasal fasiyestedir. 2 nolu örneğin hidrojeokimyasal fasiyesi $\text{Ca-HCO}_3\text{-Cl}$, 3 nolu örneğin ise Mg-Ca-HCO_3 olarak belirlenmiştir. 2 nolu örnek karışım sularını temsil etmektedir.

Su örneklerinin Kloroalkalin indeksi (CAI-I, CAI-II) değerleri, Na/Cl , $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$, $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$, $\text{Ca}_{+2}/\text{Mg}_{+2}/\text{HCO}_3^-$, $\text{Ca}^{+2}/(\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{+2})$ ve $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Cl})$ oranları bölgede yeraltısuyu kimyasını denetleyen hidrojeokimyasal süreçlerin karbonat ayrışması (kalsit ve dolomit ayrışması) ve iyon değişim süreçleri olduğunu göstermektedir. Özellikle 1 nolu örnekte tuzlu su girişimin varlığı tespit edilmiş olup karışım oranı yaklaşık %9 olarak belirlenmiştir.

Su örneklerinin içme suyu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirmesinde Türk içme suyu standart değerleri ile karşılaştırılmış ve 1

nolu örneğin EC, Na⁺, Cl⁻ ve SO₄⁻² içerikleri açısından içilemez olduğu belirlenmiştir. Diğer su örnekleri ise analizi yapılan parametreler açısından içme suyu olarak kullanıma uygundur. Ancak, içme suyu olarak kullanımda yeni bakteriyolojik, iz element analizlerinin yapılarak yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Sulama suyu kalitesinin belirlenmesinde SAR, %Na değerleri ile Wilcox ve ABD tuzluluk laboratuvarı diyagramı kullanılmıştır. Bu değerlendirmeler de de 1 nolu örneğin sulama suyu olarak kullanıma uygun olmadığı belirlenmiştir.

REFERANSLAR

- Aghazadeh N. ve Mogaddam A.A. (2011). Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. Environmental Monitoring Assessment, 176,183–195.
- Appelo, C.A.J. ve Postma, D. (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. AA Balkema, Rotterdam
- Ayenew, T., Demlie, M. ve Wohnlich, S. (2008). Hydrogeological framework and occurrence of groundwater in the Ethiopian aquifers. Journal of African Earth Sciences, 52,97–113.
- Back, W. (1966). Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic, Coastal Plain, 498-A, 1-42.
- Başaran, C. (2021). Özdere (İzmir) Jeotermal Kaynağının Hidrojeokimyası Ve Deniz Suyu İle İlişkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 176-186.
- Elango, L. ve Kannan, R. (2007). Rock-water interaction and its control on the chemical composition of groundwater. Sarkar, D., Datta, R., Hannigan, R. (Ed.). Developments in Environmental Science, Elsevier, Amsterdam, 229-243.
- Erguvanli, K. ve Yüzer, E. (1987). Yeraltı suları Jeolojisi, İTÜ yayınları no:23, 339s, İstanbul
- Freeze, R.A. ve Cherry, J.A. (1979). Groundwater (p. 604). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Garcia, M.G., Dei, M., Hilgo, V. ve Blesa, M.A. (2001). Geochemistry in the alluvial plain of Tucumán province. Argentina. Hydrogeology Journal 9,597-610
- Han, D., Liang, X., Jin, M., Currell, M.J., Han, Y. ve Song, X. (2009). Hydrogeochemical indicators of groundwater flow systems in the Yangwu river alluvial fan, Xinzhou Basin, Shanxi, China. Environmental Management, 44, 243-255.
- Hounslow, A.W. (1995). Water Quality Data Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, Boca Raton
- Hem, J.D. (1970). Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, Kogakusha, LTD, Tokyo, 480 p.
- İTASHY (TS266), 2005. İnsani tüketim amaçlı sular. türk içme suyu standartları, TS 266 sayılı standart -Türk Standartları Enstitüsü –Ankara.
- Katz, B.G., Coplen, T.B., Bullen, T.D. ve Davis, J.H. (1998). Use of Chemical and Isotopic Tracers to Characterize the Interaction between Groundwater and SurfaceWater in Mantled Karst. Groundwater, 35, 1014–1028

- Kumar, M., Ramanathan, A.L., Rao, M.S. ve Kumar, B. (2006). Identification and evaluation of hydrogeochemical process in the groundwater environment of Delhi, India. *Environmental Geology*, 50, 1025–1039.
- Kumar Singh, A., Mondal, G.C., Singh, T.B., Singh, S., Tewary, B.K. ve Sinha, A. (2012). Hydrogeochemical processes and quality assessment of groundwater in Dumka and Jamtara districts, Jharkhand, India. *Environmental Earth Science*, 67, 2175–2191.
- Kurttaş, T. (2002). Karışım Sularında Kökensel Katkıların Belirlenmesi. Hidrolojide İzotop Tekniklerinin Kullanılması Sempozyumu. Bildiriler kitabı 21-25 Ekim 2002 Adana
- Lakshmanan, E., Kannan, R. ve Senthil Kumar, M. (2003). Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of ground water in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 10(4), 157–166.
- Maya, A.L. ve Loucks, M.D. (1995). Solute and Isotopic Geochemistry and Groundwater Flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172, 31– 59.
- Richards, L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline alkaline soils, US Department of Agriculture, HandBook 60 (160).
- Roy, A., Keesari, T., Mohokar, H., Pant, D., Kumar Sinha, U. ve Mendhekar G.N. (2020). Geochemical evolution of groundwater in hardrock aquifers of South India using statistical and modelling techniques, *Hydrological Sciences Journal*, 65:6, 951-968
- Sarin, M.N., Krishnaswamy, S., Dilli, K., Somayajulu, B.L.K. ve Moore, W.S. (1989). Major ion chemistry of the Ganga–Brahmaputra river system: weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 997–1009.
- Schoeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resources. In *Methods and techniques of groundwater investigations and development* (pp. 54–83). Paris: UNESCO.
- Schoeller, H. (1977). Geochemistry of groundwater In *Groundwater studies-An International guide for research and practice* Paris UNESCO Chap 15 pp1-18
- Subramani, T., Rajmohan, N. ve Elango, L. (2010). Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental monitoring and assessment*, 162, 123-137.
- Şahinci, A. (1991). Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, 546, İzmir.
- Şimşek, Ş., Karamandereci, İ.H., Yılmaz, S., Eşder, T., Erişen, B., Keskin, B., Öngür, T., Yüksel, V., Suludere, Y., Kastelli, M., Özbayrak, H., Uğurlu, A., Şimşek, Z., Sariiz, K., Uysallı, H., Uygur, N. ve Coşkun, B. (1979). Aydın – Denizli Jeotermal Alanları, MTA Arşiv No: 3707, Ankara.
- Tay, C.K. (2012). Hydrochemistry of groundwater in the Savelugu–Nanton District, Northern Ghana. *Environmental Earth Science*, 67, 2077–2087.
- Zaidi, F.K., Nazzal, Y., Jafri, M.K., Naeem, M. ve Ahmed, I. (2015). Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia. *Environmental Monitoring Assessment*, 187:607.

Toprak Bozulmasının Önlenmesinde Su Yönetiminin Önemi

Ahmet İSTANBULLUOĞLU¹

Fatih KONUKCU¹

İsrafil KOCAMAN¹

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, TR59030.
aistanbulluoglu@nku.edu.tr, fkonukcu@nku.edu.tr, ikocaman@nku.edu.tr

ÖZET

Toprak, kayaların ve organik maddelerin türlü ayrışma ürünlerinin karışımından oluşan ve yer yüzeyini kaplayan bir varlıktır. Su ise bunun içerisinde ve üzerinde geniş bir canlı âlemi barınmasını sağlayan diğer bir varlıktır. Aralarında oldukça karmaşık ama bir o kadar da hayati öneme sahip ilişkiler bulunmaktadır. Bunun başlangıcı yağışlarla beraber suyun toprakla ilk buluşmasıdır. Toprak ve su arasında belirli bir dengenin sağlanması şarttır. Toprağın bitkisel üretimi etkileyen besin maddesi içeriğinin azalması, su tutma kapasitesinin düşmesi, organik madde içeriği, toprak reaksiyonu (asitlik), tuzluluk ve sodyumluluk, topraktaki biyo kütle ve üst toprak derinliği gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik yönden kalitesinde meydana gelen azalma “toprak bozulması” olarak adlandırılmaktadır. Toprak bozulması insan sağlığına ve evrensel çevreye ciddi zararları ile ülkelerin kalkınmasını etkileyen, çözümünü için uluslararası işbirliği gerektiren bir sorundur. Bozulan toprakların geri kazanılması için gerekli olan maliyet çok yüksek olmaktadır. Burada asıl amaç toprakların bozulmasını önleme çalışmalarının ihmal edilmemesi olmalıdır. Toprak organik madde eksikliği ve bitki besin elementlerinin noksanlığı gibi bir kısım bozulma belirtilerinin giderilmesi çok ucuz uygulamalarla mümkün olabilmektedir. Ancak başta tuzluluk ve kirlenme gibi bazı fiziksel ve kimyasal bozulma çeşitleri şiddetine göre giderilmeleri yıllar süren oldukça zor ve maliyetlidir. Bozulan bir toprağın geri kazanılması için o alanda arazi tesviyesi, sulama ve drenaj tesisleri ile ıslah maddesinin kullanıldığı çok yüksek maliyetli alt yapı yatırımları gerekmektedir. Bunların inşasını takiben uygulanan ıslah maddesinin toprakta istenen kimyasal değişimi sağlaması için yoğun yıkama suyu verilmesi icap edecektir. Bu ise karşılığında bir ürün elde edilmediği ve yıllarca sürececek bir sulama faaliyetini gerektirdiğinden maddi olarak katlanılması zor bir uğraş olmaktadır. Bozulan bir toprağın geri kazanılması hemen hemen imkânsız denebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Toprak bozulması, Erozyon, Su yönetimi, Sulama, Tuzluluk-sodyumluluk.

GİRİŞ

Toprak, kayaların ve organik maddelerin türlü ayrışma ürünlerinin karışımından oluşan ve yer yüzeyini kaplayan bir varlıktır. Su ise bunun içerisinde ve üzerinde geniş bir canlı âlemi barınmasını sağlayan diğer bir

varlıktır. Aralarında oldukça karmaşık ama bir o kadar da hayati öneme sahip ilişkiler bulunmaktadır. Bunun başlangıcı yağışlarla beraber suyun toprakla ilk buluşmasıdır. Topraktaki suyun varlığı ve mevsimsel dağılımı özellikle tarımsal faaliyetler açısından oldukça önemlidir. Çünkü suyun toprakla olan ilişkisi her zaman olumlu olmamaktadır.

Toprak ve su arasında belirli bir dengenin sağlanması şarttır. Bu denge kurulmamış ve su toprakta gereğinden fazla bulunursa, bir yandan ürün miktarının azalması söz konusu olacağı gibi, diğer bir yandan da toprak yapısının bozulması ve tuzluluk, alkalilik gibi sorunlar meydana gelecektir.

Diğer yönden toprak-su ilişkisi, ürün elde edilmesinde su azlığı şeklinde ortaya çıkıyorsa, eksik olan suyun dışarıdan sağlanarak, bu suyun tekniğine uygun bir şekilde toprağa verilmesi olan sulama uygulamasıyla olmaktadır. Sulama uygulaması ve suyun temini ile dağıtım sisteminin planlanması ve inşası ise yöre iklim ve toprak koşullarıyla uyumlu bir su yönetimi ile gerçekleşmektedir. Zira tarımsal sulama, yerkürede en çok su kullanan sektör konumunda bulunmaktadır.

Dünyadaki karasal alan miktarı 13 milyar hektardır. Bu alanın yaklaşık 1,5 milyar hektarı kullanılmayan sulak alanlar ve 2,8 milyar hektarı ise kullanılmayan ve ulaşılamayan alanlardır. Kullanılmakta olan 8,7 milyar hektar alanın çoğu ise orman, mera veya devamlı vejetasyon altındadır. Bu alanın sadece 1,6 milyar hektar alanı tarımsal anlamda kullanılmaktadır. Sulanan alan ise yaklaşık 0,3 milyar hektardır (Oldeman, 1994).

Türkiye'nin 78 milyon hektar olan yüzölçümünün yaklaşık olarak üçte biri, 24 milyon hektar alan ekilebilir tarım arazidir. Bunun ekonomik olarak sulanabilir miktarı 8,5 milyon hektar olarak belirlenmiş olup, 2022 yılı sonu itibarıyla yaklaşık 7 milyon hektar tarım alanında sulu tarım yapılmaktadır (DSİ, 2014).

Her geçen yıl artmakta olan insan nüfusu ve beraberindeki beslenme ihtiyacı, toprak ve su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Bu durum dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de orman alanlarının tahribi, meraların erken ve aşırı otlatılması, tarım dışı arazi kullanımı ve hatalı tarımsal uygulamalar işlenen alanların marjinal araziler üzerinde yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Gelişen sanayi ve şehirleşmeyi kapsayan faaliyetlerin ortaya çıkardığı su kirliliği ve aşırı su kullanımı toprakların

bozulmasında en önemli sebepler olmaktadır. Bunların bilinmesi ve ortaya konulup tanıtılması su yönetimi açısından da büyük önem arz etmektedir.

Toprak bozulmasının tanımı

Toprağın bitkisel üretimi etkileyen besin maddesi içeriğinin azalması, su tutma kapasitesinin düşmesi, organik madde içeriği, toprak reaksiyonu (asitlik), tuzluluk ve sodyumluluk, topraktaki biyo kütle ve üst toprak derinliği gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik yönden kalitesinde meydana gelen azalma “toprak bozulması” olarak adlandırılmaktadır. Toprak bozulması insan sağlığına ve evrensel çevreye ciddi zararları ile ülkelerin kalkınmasını etkileyen, çözümünü için uluslararası işbirliği gerektiren bir sorundur (Yılmaz ve Alagöz, 2008b).

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), dünyayı kaplayan toprak tabakasının ilk bir metresinin, dünyadaki organik halde bulunan karbonun üçte ikisine eşit veya atmosferde tutulan karbondioksitin yaklaşık üç katı olan 2,2 milyar ton CO₂'yi tuttuğunu ifade etmektedir. Toprak bozulması halinde bunun atmosfere salınması, toprağın fonksiyonlarını kaybetmesine, biyoçeşitliliğin yok olmasına ve iklim değişikliğinin hızlanmasına sebep olacaktır (UNEP, 2014).

Avrupa Birliği (AB) Su Çerçeve Direktifi (SÇD), toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik eden ve olası tahribatların önlenmesini hedefleyen “bütüncül havza planlaması” dâhilinde arazilerin kendi kullanım sınıfları kapsamında kullanılmasını önermektedir. Aksi halde mera ve ormanların tahrip edilmesi, erozyon, doğa tahribatı, çevre kirliliği, sel ve taşkın afetleri gibi can ve mal kayıplarının yaşandığı sorunların ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır (Özkan ve Kubaş, 2008).

Tarım arazilerinin kullanımında toprak işleme, gübreleme, pestisit kullanımı ve sulama faaliyetleri toprak bozulmasında bir diğer faktörler olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle zayıf bünyeli ve organik madde açısından fakir olan işlenen eğimli alanların su erozyonuna karşı hassasiyeti daha fazla olmaktadır.

Toprak bozulmasına neden olan faktörler

Dünya genelinde her yıl önemli miktarda tarım arazisi, başta erozyon ve tuzlanmanın neden olduğu toprak bozulmasının yanı sıra, diğer sektörlerin

kullanımına tahsisi ile tarım dışına çıkmaktadır. Uluslararası Toprak Referans ve Enformasyon Merkezi (International Soil Reference and Information Centre-ISRIC) tarafından yürütülen Küresel Toprak Degradasyonu Değerlendirmeleri Projesi (The Global Assessment of Soil Degradation-GLASOD) çerçevesinde, yeryüzü karasal alanlarının % 15'inin insan aktiviteleri sonucu çeşitli düzeylerde bozulmaya maruz kaldığı saptanmıştır. Ayrıca, bozulan bu alanların % 55,7'sinde su erozyonunun, % 27,6'sında rüzgâr erozyonunun, yüzde 12,5'inde kimyasal değişimlerin (besin maddesi içeriğinin azalması, su tutma kapasitesinin düşmesi, organik madde içeriği, toprak reaksiyonu (asitlik) ve kirlenme gibi) ve yüzde 4,2'sinde su baskını, sıkışma (kompaksiyon), sert tabaka oluşumu ve çökme gibi fiziksel değişimlerin etkili olduğu tespit edilmiştir. Toprak kaynaklarını tehdit eden erozyon nedeniyle dünya genelinde yılda yaklaşık 24 milyar ton toprağın yerinden taşındığı anlaşılmaktadır. Türkiye'de ise bu miktar 0,77 milyon ton olup önemli bir sorun olarak yaşanmaktadır (Yılmaz ve Alagöz, 2008a).

Dünyadaki toplam kara alanının yaklaşık % 46'sını kaplayan kurak ve yarı kurak bölgelerde bulunan sulanan alanların yaklaşık yüzde 50'sinde değişik düzeylerde tuzlanma sorunu yaşanmaktadır. Hem dünyadaki hem de Türkiye'deki toplam sulu tarım alanlarının % 20'si aşırı sulamadan ötürü tuzlanmaya maruz kalmıştır. Dünya genelinde ise 1 milyar hektar alan tuzdan etkilenmiş olup, bu rakam her geçen gün giderek artmaktadır (DSİ, 2014).

Tuzluluk problemi doğal ve yapay oluşum olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Birincisi normal oluşum sürecidir. Özellikle kurak ve yarı kurak iklimin etkin olduğu bölgelerde, yıkanarak yeraltı suyuna karışan çözünebilir tuzların yüksek taban suyu ve kapilerite etkisiyle toprak yüzeyine çıkması ve buharlaşma sonucu suyun uçmasıyla toprak yüzeyinde birikmesi olayıdır. İkincisi antropojendir. Kimyasal olarak bileşimi nötral tuzlar olan gübrelerin toprağa her yıl değişen ve artan oranlarda uygulanması toprak tuzluluğunu artırmakta ve böylece ürün verimi ve kalitesi olumsuz etkilenmektedir (Çullu ve ark., 2000).

Nüfusun artması, küresel ısınma ve iklim değişiklikleri ile suya dayalı ihtiyaçlardaki artış, özellikle tarımda kullanılan su kaynaklarını olumsuz etkilemektedir. Yapılan bir tahmine göre, önümüzdeki 75 yıl içinde dünya nüfusunun iki katına çıkacak olmasına karşın dünya genelinde tarım arazisi

varlığı sadece % 10 oranında artabilecek ve bu artışın büyük bir kısmı, tuzluluğun çok yaygın olduğu yarı kurak ve kurak bölgelerde olacaktır.

Toprak ve toprak suyu üzerinde doğrudan veya dolaylı pek çok etkisi bulunan organik madde, toprak bozulmasına neden olan faktörlerin en önemlilerinden birisidir. Zira organik maddenin yüksek su tutma kapasitesine sahip olması, toprakların fiziksel özelliklerini iyileştirerek yarayışlı su tutma kapasitesini arttırmaktadır. Toprakların birçoğu % 2-10 arasında organik madde içermektedir. Toprakta az miktarlarda olsa bile fiziksel, kimyasal ve biyolojik katkısı olan bir bileşendir. Bitkisel üretimde verimlilik parametrelerinden biri olan organik madde toprakların erozyon riskini de azaltmakta oldukça önemlidir.

Tarım topraklarında sıklıkla ortaya çıkan organik maddenin azlığı, bozulan pH dengesi, topraktaki makro ve mikro besin maddelerinin elverişliliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Türkiye coğrafyasında Trakya Bölgesi tarım topraklarının bugün en önemli problemlerinin başında “düşük organik madde” içermesi gelmektedir. Bölge tarım toprakları ile ilgili olarak daha önce yapılmış olan birçok çalışmada organik maddenin yetersiz ve hatta bazı çalışmalarda toprakların % 80-85’inde düşük organik madde olduğu ifade edilmiştir (Bellitürk, 2008; Bellitürk, 2016)..

Topraklarda organik maddenin düşüklüğü ve bozulan pH dengeleri hem verim miktarlarını, hem de kaliteyi direkt olarak olumsuz etkilemekte olup, kullanılan kimyasal gübre miktarlarının da artmasına sebep olarak üretim maliyetlerini yükseltmektedir (Boyras ve Sarı, 2012).

Toprak bozulması günümüzde bir çevre sorunu halindedir. Özellikle artan dünya nüfusu ile birlikte gelişen sanayi ve teknoloji birim alandan daha fazla ürün elde etmeye yönelik yoğun tarım uygulamalarını gündeme getirmiştir. Buna bağlı olarak bitkilerin ve bitkisel ürünlerin, zararlılar, hastalık etmenleri ve yabancı otların etkilerinden korunması, kaliteli ve bol ürün elde edilmesi için tarım ilaçlarının veya pestisitlerin kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Ancak ürünler ve toprak üzerinde ki kalıntıları ekosisteme ve insan sağlığına zarar verdiği bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Uzun süre kullanılmaları halinde toprakların bozulmasına ve yeraltı suyuna karışması da kaçınılmaz olmaktadır (Altıkat ve ark., 2013).

Bitkisel üretimde verim artışı sağlamak için yapılan gübreleme işleminin kontrolsüz bir şekilde ve hatalı yöntemlerle yapılması, çevreye doğrudan ve dolaylı yollarla zarar vermektedir. Kimyasal gübrelerin toprağa ihtiyaçtan fazla uygulanmasında, ağır metal birikmesi, toprak strüktüründe bozulma, toprak canlılarının popülasyonunu ve yaşamını olumsuz etkilemesi, toprak tuzluluğu ve toksisite düzeylerini yükseltmesi, yeraltı ve yer üstü sularında nitrat birikimine yol açması, ötrofikasyona sebebiyet vermesi gibi olumsuz etkiler yaratmaktadır (Yeğen, 1993)..

Tarımsal sulama, bitkilerin normal gelişimi için ihtiyaç duydukları ancak doğal yağışlarla karşılanamayan suyun, toprağa uygun yöntemlerle, uygun zamanlarda verilmesi olarak tanımlanmaktadır. Sulamada beklenen başarı, şartlara en uygun sulama sisteminin planlanması, projelenmesi, projede öngörüldüğü biçimde kurulması ve işletilmesine bağlıdır. Ancak bunun sağlanmadığı toprağa gereğinden fazla suyun verilmesi halinde, hem elde edilecek ürün miktarı azalmaktadır, hem de önemli toprak sorunları ortaya çıkmaktadır.

Toprağı aşırı sulama halinde, toprak gözenekleri içindeki havanın yerini suyun doldurması sonucu, bitki kökleri yeterli havayı ve gerekli besin maddelerini alamayacağından, değişik kök hastalıkları ve boğulma başlar, bitkilerin kurumasına ölmesine sebep olur. Verilen gübrelerin özellikle azot, fosfor, potasyum ve kalsiyum gibi besin maddelerinin alımı zorlaşmaktadır. Toprakta yıkanarak taban suyuna karışıp yeraltı sularının kirlenmesine neden olur. Taban suyunun yükselmesi sonucu toprakta tuzluluk problemleri ortaya çıkar. Bitkilerde hastalık ve zararlı yoğunluğu artar. Zamanında toprak işlemesi güçleşir.

Trakya Bölgesi'nin önemli akarsu kaynakları, Yunanistan ile sınır oluşturan Meriç Nehri ve onun Trakya topraklarında doğup ve katılan kolu Ergene Nehridir. Bölgedeki tarımsal sulamanın önemli kaynağı olan bu iki akarsu sanayileşme, çarpık kentleşme, aşırı kimyasal gübre ve zirai mücadele ilaçları kullanımlarından kaynaklı su kirliliğini içermektedirler.

Meriç Nehri suları, Türkiye'ye giriş yaptığı noktadan itibaren, bölgede yaygın tarımı yapılan çeltik sulamasında kullanılmaktadır. Zira çeltik, Meriç ve Ergene Nehirleri boyunca uzanan irili ufaklı alüvyal alanlarda tek ve değişmez ürün durumundadır. Bölgede yaklaşık 500 km² alanda çeltik ekimi yapılmaktadır. Türkiye toplam çeltik üretiminin yarıya yakını bu bölgeden

sağlamaktadır. Sulama mevsimi içerisinde pompajla sağlanan su, arazide yer alan sulama suyu dağıtım sistemlerine verilmektedir. Ancak sulama mevsimi ortalarında artan su ihtiyacı ve mevsimsel olarak azalan Meriç Nehri debisi sulama suyu temininde yetersizliğe neden olmaktadır. Bunun giderilmesi için, DSİ tarafından, bölgede inşa edilen barajlar sulama mevsimi öncesi erken ilkbaharda Meriç Nehri'nden kademeli bir şekilde terfi ettirilen suyla doldurulmaktadır. Sulama mevsiminde ihtiyaç duyulan yoğun su gereksinimi bu şekilde karşılanmaya çalışılmaktadır. Sulama suyunun sulama sahasında toprak kanallar ile dağıtılması ve birçok yerde tahliye kanallarında yer alan suların tekrar sulamada kullanılması önemli toprak bozulması nedeni olmaktadır (DSİ, 2001).

Havzanın yüzey sularını toplarken, Bulgaristan'da yer alan çok sayıda sanayi ve yerleşim alanlarına ait atık sularıyla kirlenen Meriç Nehri, benzer koşullardaki Ergene Nehrinin katılmasıyla da çok daha yoğun bir şekilde kirlenmektedir. Zira Ergene Nehri tüm Trakya Bölgesi yerleşim yerleri ve sanayisinin atık su kanalı işlevini görmesi nedeniyle çok kirlenmiş bir akarsudur. Bu su, çoğu zaman sulama suyu olma kriterleri dışına çıkmaktadır. Bölgede yapılan gözlemler ve araştırmalar çeltik sulamasında kullanılan bu suların çeltik alanlarının elden çıkmasına, çeltik veriminin düşmesine, toprakların bozulmasına ve yeraltı sularının kirlenmesine neden olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. (DSİ, 2001; Başer ve ark, 2004).

DSİ (2001), 1981 yılından itibaren Ergene Nehri üzerinde kurduğu yedi ayrı sabit istasyondan aldığı su örneklerinde, sulama suyu sınıfının belirlenmesine yönelik analizler yapmaktadır. Kurum bu çalışmaları sonucu kurak yıllarda, Ergene Nehri'nde su kirliliğinin çok yükseleceği için, tarımsal amaçlı kullanılmasının uygun olmadığını beyan etmektedir. Ergene Nehri kirliliğinin gelecekte bölge tarım topraklarının bozulmasına neden olabileceği gibi havzada yer alan yeraltı suyu rezervini de kirlletmeyi sürdürdüğü vurgulanmaktadır.

Bu konuda bir diğer detaylı çalışma Delibaş ve ark. (2008) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmada, bir sulama mevsimi boyunca sulama suyu kalite takibi yapılmıştır. Yalnız Meriç ve Ergene Nehirleri ile ikisinin karışımı olan akarsu kesitlerinden alınan sulama suyu biyolojik analiz değerleri Çizelge 1'de, kimyasal analiz değerleri Çizelge 2'de ve ağır metal analiz değerleri ise Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 1. Havzada kullanılan sulama suyuna ait biyolojik analiz değerleri

Su analizleri	Akarsular		
	Meriç	Ergene	Meriç + Ergene
BOİ (Biyolojik oksijen ihtiyacı)	16,00	52,00	25,20
KOİ (Kimyasal oksijen ihtiyacı)	0,70	33,60	4,12
OM (Organik madde)	3,20	16,70	5,30
NH ₄ (Amonyum)	0,24	7,84	0,99
NH ₃ (Nitrat)	0,67	2,66	1,40
PO ₄ (Fosfat)	0,97	4,71	1,10

Çizelge 2. Havzada kullanılan sulama suyuna ait kimyasal analiz değerleri

Su analizleri		Akarsular		
		Meriç	Ergene	Meriç + Ergene
pH		7,99	7,86	7,73
EC (dS m ⁻¹)		0,49	3,61	0,88
Katyonlar (me L ⁻¹)	Na	1,25	29,22	4,62
	K	0,15	0,80	0,25
	Ca+Mg	4,23	8,71	4,66
	Toplam	5,63	38,73	9,53
Anyonlar (me L ⁻¹)	CO ₃	0,41	0,04	0,04
	HCO ₃	3,18	9,44	4,37
	Cl	0,95	23,72	3,43
	SO ₄	1,09	5,53	1,69
	Toplam	5,63	38,73	9,53
Sertlik (Alman)		11,45	24,39	13,07
RSC (Artık sodyum karbonat)		0,03	2,26	0,10
SAR (Sodyum adsorbsiyon oranı)		0,84	14,25	3,05
Sulama suyu sınıfı		T ₂ A ₁	T ₄ A ₂	T ₃ A ₁

Çizelge 3. Havzada kullanılan sulama suyuna ait ağır metal analiz değerleri

Su analizleri		Akarsular		
		Meriç	Ergene	Meriç + Ergene
Kadmiyum	Cd	-	-	-
Kobalt	Co	-	-	-
Krom	Cr	0,001	0,010	0,024
Bakır	Cu	0,001	0,001	0,002
Demir	Fe	0,426	0,272	1,265
Mangan	Mn	0,166	0,316	0,219
Nikel	Ni	0,001	0,001	-
Kurşun	Pb	0,004	0,002	0,006
Çinko	Zn	0,144	1,155	0,395

Söz konusu çizelgelerin irdelenmesi halinde, hemen hemen tüm değerlerde Ergene Nehri'nin, Meriç Nehri'nden çok daha fazla kirli olduğu görülmüştür. Her iki nehrin karışımından sonra sulama suyunda kısmen iyileşme görülmüştür. Bununla birlikte sulama suyu açısından sınır değerler zorlanmakla birlikte, aşılmadığı söylenebilir.

Bölgede yapılan çeltik sulama uygulamalarına ait görüntüler Şekil 1'de ve kullanılan sulama suyunun çeltik tarlalarında neden olduğu görüntüler ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Trakya Bölgesi'nde yapılan çeltik sulama uygulamalarına ait görüntüler



Şekil 2. Kullanılan sulama suyunun çeltik tarlasında neden olduğu görüntüler

Tarımsal sulama

Dünyada su tüketiminin en fazla olduğu sektör tarım sektörüdür. Azgelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde toplam tatlı suyun % 85-90'ı tarımsal üretimde kullanılırken, gelişmiş olan ülkelerde bu kullanım oranı % 16'lara kadar inmektedir (Yıldız ve Özbay, 2010).

Dünyada ve Türkiye'de tarım sektöründe su en fazla sulamada kullanılmaktadır. Dünya topraklarının % 12'sinde tarımsal üretim yapılmaktadır. Ekim alanı aynı kalırken, bu alanlarda geleneksel tarım yerini sürdürülebilir olmayan tarımsal faaliyetlere terk etmektedir. Su tüketimi yoğun, kimyasal girdisi yüksek, yörenin ekosistem özelliklerini dikkate almayan endüstriyel tarım yaygınlaşmaktadır. Bu değişim ile son 50 yılda sulamalı endüstriyel tarım yapılan alan miktarı iki kat artmış bulunmaktadır (Ayten, 2007).

Türkiye'de yıllık yağış miktarı 643 mm olup bu yağış yılda ortalama 501 milyar m³ suya karşılık gelmektedir. Günümüz şartlarında çeşitli amaçlara yönelik kullanımlarda teknik ve ekonomik anlamda ulaşılabilecek yüzey ve yeraltı suyu miktarının toplam 112 milyar m³ olduğu hesaplanmıştır. Son yılların verilerine göre bu rezervin yaklaşık 44 milyar m³'ünden (% 39) yararlanılabilmektedir (Alpaslan ve ark., 2008).

Sektörel düzeyde yapılan su tüketim tahminlerinde, Türkiye'nin teknik ve ekonomik olarak sulanabilir toprak kaynağı olan 8,5 milyon ha alanın tamamının 2025 yılında sulamaya açılması ve sulama suyu tüketiminin yaklaşık 72 milyar m³'e varması öngörülmektedir. Böylece 2000 yılı başında toplam su tüketimindeki payı % 75 olan tarımsal sulamanın 2025 yılındaki payının % 64 seviyesine düşürülmesi amaçlanmaktadır (Akpınar ve Özyıldırım, 2016).

Türkiye'de tatlı suyun % 72-75'ini tüketen tarım sektörünün, bu suyun % 53'ünü yüzey su kaynaklarından, % 38'ini yeraltı su kaynaklarından sağlamaktadır. Su varlığının çok büyük bölümünü kullanan tarım sektörü bu suyu Türkiye'nin 28 milyon hektar tarım alanının sadece 5,6 milyon hektarında kullanmaktadır. Günümüzde sulu tarım yapılan alanların % 82'sinde salma sulama yapılmaktadır. Geri kalanın % 17'si yağmurlama ve % 1'i ise su tasarrufunun çok yüksek olduğu damla sulama yöntemi ile sulanmaktadır (Evsahibioğlu ve ark., 2010).

Günümüzün ve geleceğin en önemli stratejik kaynaklarından biri olan su, modern tarımın çok önemli bir girdisidir. Sulama sahasına suyunun iletiminde, dağıtımında, sistemin işletilmesinde ve tarla içi uygulamasında sağlanacak tasarruf son derece önemlidir.

Yapılan araştırmalar göstermektedir ki, salma sulama yönteminin yaygın kullanılması nedeniyle aşırı su kullanılmaktadır. Bu durum bir yandan toprakların elden çıkması anlamına gelen çoraklaşmasına neden olurken, diğer yandan da suyun israfına yol açmaktadır. Suyun tarla içerisinde uygulamasında, toprak, bitki ve iklim koşullarına göre yağmurlama ve damla sulama yöntemlerinden yararlanılması, su kayıplarını % 30-80 azaltacaktır. Bu nedenle su tasarrufu sağlayan, yüksek randımanlı basınçlı sulama yöntemlerinin özendirilmesi kaçınılmazdır (Evsahibioğlu ve ark., 2010).

Ancak, su sıkıntısı yaşanan birçok havza ve alanda, yüksek miktarda su tüketen ürünlerin yoğun olarak yetiştirildiği görülmektedir. Yörelere iklim ve toprak koşullarına uygun olmayan bu tarımsal üretim biçimi kısıtlı su varlıklarının ve suya bağlı yaşam alanlarının yok olmasına neden olurken, orta ve uzun vadede üretime de büyük zarar verme olasılığı muhtemeldir. Su kıtlığı ürün verimini düşürürken, ürün verimliliği düşen birçok havzada kırsal göç artmaktadır (Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2018).

Su kirliliği

Suyun döngüsü (hidrolojik çevrimi) sırasında insanoğlunun kullanımdan kaynaklanan çok çeşitli yabancı madde ile karışması veya doğal olarak bulunabilen maddelerin çeşitli nedenler ile sulara zenginleşmesi, sulara önemli kirlenme sorunları meydana getirmektedir.

Ayrıca insanlar barajlar, göletler, açık kanallar ve kapalı su iletim sistemleri gibi su yapıları inşa ederek hidrolojik döngüye yapay etkiler oluşturmaktadır. Yerleşim yerlerinde ve endüstri bölgelerinde su kullanımı sonucunda önemli miktarlarda atık yük taşıyan kirli sular ortaya çıkmaktadır. Bu suların belirli düzeylerde arıtılmaması, diğer bir deyimle atık yük miktarları azaltılmadığı takdirde doğal sulara bırakılması durumunda, bu sistemlerin kendilerini yenileme kapasitesinin üzerinde atık maddeler ile bulaştırılması sonucu su kalitesi şiddetle bu değişimden etkilendiği gibi su yaşamı da zarar görmektedir. Sular kirletme potansiyeli bakımından

endüstriyel organik atıklar, endüstriyel inorganik atıklar, endüstriyel atık ısı, kanalizasyon atıkları, tarımsal atıklar, erozyon sonucu oluşan sedimentler, asitli maden suları, petrol ve yağ kirlenmeleri kirletici kaynakları olarak sıralanmaktadır.

Yüzey sularında doğal olarak bulunan veya kirletici kaynaklardan sulara ulaşan çeşitli organik maddeler, ortamdaki mikroorganizmaların aktiviteleri sonucu anaerob veya aerob olarak belirli düzeyde ayrışmakta ve bu sırada suyun oksijen dengesini etkilemektedir. Suda doğal olmayan bir şekilde fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişiklikler meydana gelmektedir. Fiziksel değişiklik olarak, endüstri tesislerinden çıkan sıcak suların akarsulara karışması sonucu sıcaklık artışı, bulanıklık ve boyanma sayılmaktadır. Bu değişiklikler suda yaşayan bitkisel ve hayvansal canlılar üzerinde büyük ölçüde olumsuz etki meydana getirmektedir. Kimyasal değişikliklerin başında ise insanlar tarafından sulara karıştırılan ve kolay ayrılan organik materyal gelmektedir. Böylece hem suda çözünmüş olan oksijen miktarı azalmaktadır, hem de organik materyalin ayrışması sonucu ortama zararlı etkiye bulunabilecek birçok zararlı madde meydana gelmektedir. Yine fabrikaların sulara karıştırdığı tuzlar, ağır metaller, tarımda kullanılan pestisitler ve evsel atık sularla deterjan gibi bileşikler su kirletici diğer maddelerdir (İstanbuluoğlu ve ark., 2006).

Suyun yenilenmesi

Arıtma işleminin zorluğunun farkında olunması kirlilik sorunlarının aşılmasında, suyun yenilenebilir olma özelliğine güvenilmektedir. Yenilenebilir olması, genellikle suyun sonsuz bir kaynakmış gibi algılanmasına neden olmaktadır. Oysa sonsuz olan yalnızca su döngüsünün işleyişidir. Sonlu bir kaynak olan suyun kirlenmesi bu işleyişi etkilemiyor, ama kalitesi bozulan su artık içilebilir-kullanılabilir olma özelliğini yitirdiğinden insan kullanımına uygun olmaktan çıkmaktadır. Kirlenen suyun kendini yenilemesi, özellikle de derin ve büyük göllerde ve yeraltı sularında sanıldığı kadar hızlı değildir. Bir rezervuarın yenilenme süresi, bu rezervuara giren-çıkan su hacmine ve suyun giriş-çıkış hızını etkileyen unsurlara bağlı olarak değişmektedir.

Akış halindeki yüzey suları suyun miktarına ve aktığı yerin yapısal özelliklerine göre saatler-yıllar, durgun yüzey suları sığlığına ya da derinliğine ve bulunduğu yerin yapısal özelliklerine göre haftalar-yüzyıllar,

yeraltı sularıysa bulundukları akiferlerin yapısal özelliklerine ve büyüklüklerine göre aylar-binyıllar arasında değişen zaman dilimlerinde yenilenmektedir.

Su kaynağının yeraltı suyu olması halinde, tüketilen su binlerce yıl yaşında olabilmektedir. Yeraltı sularının binlerce yıl sürebilen yenilenmeleri, bu su kaynaklarına iki nedenle ayrı bir stratejik önem kazandırmaktadır. Birincisi, yeraltı suları kısa yani 7-10 yıl süreli kuraklık dönemlerinden etkilenmemektedir. Böyle kurak dönemlerdeki susuzluğun giderilmesindeki en önemli kaynaklardır. İkincisi, yeraltı suları kirliliğe karşı korunmasız olan yüzey suları kadar kirliliğe açık değildir. Kimyasal, nükleer veya biyolojik bir serpintiyle bir su depolama yapısının kirlenmesi halinde, su anında kullanılmaz hale gelmektedir. Bu haldeki suyun temizlenmeye çalışılması çok zor olmaktadır. Suyun kendisini yenilemesini beklemek zorunluluğu vardır. Kaç yılda yenileniyorsa o kadar zaman, kirleticinin seyreterek yok olması beklenecektir. Böyle bir olay olduğunda yeraltı sularının kirlenmesi de bazen yüz, bazen de bin yıllar alabilmektedir.

Yeraltı suları

Yer yüzeyinden yeraltına sızan, buradaki gözenekli tabakaların veya kayaçların içerisini dolduran suya yeraltı suyu denilmektedir. Hidrolojik döngü içerisinde önemli bir yeri ve önemi bulunmaktadır. Zira dünyadaki tatlı su miktarının % 0,6'sı yeraltındadır (Şen, 2003).

Su kaynakları arasında stratejik öneme en fazla sahip olan yeraltı suları, yeryüzüne çıkarılmaları ve kullanılacak yere ulaştırılmalarındaki zorlukları nedeniyle, yüzey sularına nazaran daha az kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda, çıkarılmasında kullanılan teknolojik gelişmelerin artması ile kullanılan suyun yarı miktarına kadar ulaşmıştır. Bir anlamda savaş veya herhangi bir doğal afet esnasında ve kurak yıllarda kullanılacak en emniyetli bir kaynak olmasına rağmen giderek artan aşırı kullanımı, doğanın ve insanlığın geleceğini tehdit etmektedir (Dumlu ve ark., 2006).

Yeraltı sularının yarıdan fazlası tarımsal sulama ve önemli bir miktarı içme-kullanma ve endüstride kullanılmaktadır. Yeraltı suları, kısa süre içinde işletmeye alındığından, genellikle arıtma gerektirmeden kullanılan bir kaynaktır.

Yeraltı suları yerkürede yağışlarla beslenen ve hidrolojik döngü içinde yer alan sulardır. Kaliteleri jeolojik tabakalar içinde aktıkça çözebildiği minerallere bağlı olarak değişmektedir. Yeterli yağışın olmadığı zaman beslenmenin azalması ve aşırı çekimi yeraltı suyu miktarını olumsuz etkilemektedir. Bazı bölgelerde obrukların oluşumu bunun bir sonucudur. Tarımsal faaliyetlerde gübre-pestisit kullanımı ile evsel ve endüstriyel atıkların neden olduğu kirlilikler yeraltı sularını tehdit eden önemli sorunlardır (Şen, 2003).

Yeraltı barajları

Yeraltı barajları, küresel iklim değişikliğinin yaşandığı dünyada bütün yarı kurak bölgelerde jeolojik ve hidrojeolojik koşulların uygun olması halinde yeraltı sularının değerlendirilmesi amacıyla inşa edilen su yapılarıdır.

Yeraltı barajları kamulaştırma, inşaat ve işletme maliyetlerinden büyük ölçüde tasarruf sağlamakla birlikte buharlaşma kayıplarının en az yaşandığı ve daha kaliteli suyun sağlandığı mühendislik yapılarıdır.

Yeraltı barajlarının inşa edilmeleri için, yeterli kalınlık ve yayılmaya sahip, alttan ve yanlardan geçirimsiz formasyonlarla sınırlı, depolama ve hidrolik iletkenliği yüksek bir akifer ile gövde inşaatının yapılacağı kesit alanının küçüldüğü dar bir boğaz olmalıdır.

Yeraltı barajlarının yer seçiminde havza karakteristikleri, yağış, yüzey ve yeraltı suyu akış ölçümleri iyi bilinmelidir. Sondaj çalışmalarıyla akiferin büyüklüğü, geçirimsiz ana kayanın derinliği, gövde yerinin geometrisi ortaya konulmalıdır. Yamaçların şev eğimi, stabilitesi ve geçirimsizliği test edilmelidir. Açılacak gözlem kuyularında pompalama deneyleri yapılarak alınacak suyun miktarı hesaplanmalıdır (Apaydın, 2007).

Akiferin boyutları yanında, taban formasyonunun geçirgenliği, depolama özelliği ve depolanacak suyun cazibeyle mi yoksa kuyulardan pompajla mı elde edileceğinin bilinmesi gerekmektedir.

Su temini cazibeyle olacaksa, su alma yapısı dolgunun inşaatı sırasında projesinde belirtilen kotta inşa edilmektedir. Bunun için gövde arkasında etrafı çakıl zarf ile kuşaklanan bir keson kuyu inşa edilmekte ve iletim

borusunun ucu gövde içinden bu kuyuya bağlanmaktadır. Şayet barajdan kuyular açılarak pompajla su alınması planlanmışsa, bu kez uygun kuyu yerleri seçilmeli ve su alma kuyuları inşa edilmelidir. Bu kuyular aynı zamanda akiferde su seviyesindeki düşüm ve beslenme yüksekliklerini gösteren ve işletme esnasında yaşanacak belirsizlikleri ortadan kaldırmada bir gözlem kuyusu görevi üstlenmektedir.

Bozulan toprakların geri kazanılabilmeleri

Bozulan toprakların geri kazanılması için gerekli olan maliyet çok yüksek olmaktadır. Burada asıl amaç toprakların bozulmasını önleme çalışmalarının ihmal edilmemesi olmalıdır. Toprak organik madde eksikliği ve bitki besin elementlerinin noksanlığı gibi bir kısım bozulma belirtilerinin giderilmesi çok ucuz uygulamalarla mümkün olabilmektedir. Ancak başta tuzluluk ve kirlenme gibi bazı fiziksel ve kimyasal bozulma çeşitleri şiddetine göre giderilmeleri yıllar süren oldukça zor ve maliyetlidir.

Dünyanın değişik bölgelerinde yaklaşık 2 milyar hektar alan farklı düzeylerde arazi bozulmasından etkilenmektedir. Kurak veya yağışlı bölge fark etmeksizin su erozyonu en önemli faktör olmaktadır. Bunu rüzgâr erozyonu, topraktaki organik madde eksikliği, besin elementi kaybı ve tuzluluk takip etmektedir (Cangir ve ark., 2005).

Dünya Kaynakları Enstitüsü (World Resources Institute-WRI) dünyadaki tarımsal alanların yaklaşık % 40'ının bozulduğunu, Orta Amerika'nın işlenen alanlarının % 75'inin, Afrika'nın % 20'sinin ve Asya'nın % 16'sının etkilendiğini belirtmektedir.

Türkiye topoğrafik olarak oldukça engebeli bir yapıya sahip olup ortalama yükseklik 1.132 metredir. Çok farklı iklim, toprak ve diğer ekolojik özelliklere sahip bir yarımadadır. Yıllık toplam yağış miktarının yıldan yıla değişik olması ve düzensiz dağılım göstermesi, çeşitli doğal yer şekilleri ve özellikle sahillere paralel olan dağların varlığı çok farklı iklim koşullarının yaşanmasına neden olmaktadır. Bu durum çok çeşitli büyük toprak guruplarının görülmesini ve bitkisel ürün çeşitliliğini sağlamaktadır (Özden ve ark, 2000).

Türkiye'deki toprak bozulması dünya genelinde görülene benzemektedir. Doğal su ve rüzgâr erozyonunun ardından, insan kaynaklı orman tahribi, erken ve aşırı mera otlatması, değerli tarım arazilerinin başka

amaçlar için kullanılması ve hatalı tarımsal faaliyetler nedenler olmaktadır (Cangir ve ark., 2005).

Türkiye arazi varlığının çok büyük kısmının eğimli olması, erozyon sorununu öne çıkarmaktadır. Arazi varlığının % 63,2'sinde su ve % 1,5'inde rüzgâr erozyonu etkili olmaktadır. Tarım arazilerinin % 72,1'si su erozyonu tehdidi altında bulunmaktadır.

Ormanlar bilinçsiz ve usulsüz yararlanmalar, düzensiz ve aşırı otlatma, tarla açma ve bilinçsiz endüstrileşme gibi çok değişik kullanım amaçları ile tahrip edilmektedir. Sonrasında bu alanlar orman niteliğini kaybettiği gerekçesiyle, yasal düzenlemelerle orman alanı dışarısına çıkarılmakta ve böylece ormansızlaşma yaratılarak, erozyonun artmasının ana etkenlerinden biri oluşmaktadır.

Her yıl meydana gelen yüzlerce orman yangını ile de binlerce hektar orman yok olmaktadır. Yüksek eğimli orman alanlarında, ormanın ortadan kalkması sonucunda erozyon hareketleri hızla artmaktadır. Yeşil örtünün bir anda yangınlarla yok olması, sağanak şeklinde yağan ilk yağışlarla birlikte toprak kaybına ve birçok yerin bir daha yeşil örtü ile kaplanamayacak şekilde elden çıkmasına, sahanın taş ve kayalığa dönüşmesine neden olmaktadır.

Büyükbaş ve küçükbaş hayvanların kaliteli kaba yem ihtiyacının bir kısmının karşılandığı meralarda otlatma yapılırken bitki örtüsünün ve üzerinde bulunduğu toprağın korunması büyük önem taşımaktadır. Meralara en büyük zarar veren uygulama erken ve aşırı otlatmadır. Meraların erken ve gereğinden fazla olarak otlatılmasıyla doğal yem bitkileri zamanla azalmakta, merayı yem değeri az olan türler kaplamaktadır. Bitki örtüsü seyrekleşerek çıplak alanlar çoğalmaktadır. Doğal vejetasyon örtüsünü kaybeden toprağın veriminin azalmasıyla toprak bozulması başlamakta ve erozyon tehdidi ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Toprak, hava ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olan etkenlerden belki de en önemlisi pestisitlerdir. Pestisitler tarımsal üretimi artırmak ve kaliteyi iyileştirmek amacıyla zirai mücadelede oldukça geniş kullanım alanına sahip kimyasallardır (Yeğen, 1993). Ancak pestisitlerin kullanım esnasında deri, ağız ve solunum yoluyla girerek insanlarda zehirlenmelere sebep olduğu bilinmekle birlikte kullanımı sonucu toprakta oluşan kirlilik

neticesinde topraktaki mikroorganizmalar da pestisitlerden etkilenmektedir. Pestisit kalıntılarının çok düşük seviyesi bile canlı organizmada ve toprakta zamanla birikim oluşturmaktadır. Dolayısıyla toprak bozulmasında ve toprak suyunun kirlenmesinde önemli role sahip olmaktadır (Öncüer, 1995).

Geniş çaplı tarımsal faaliyetlerin sürdürüldüğü alanlarda, yapılan yoğun sulama uygulamaları sonrasında, yüksek değişebilir sodyum oranı değerlerinin toprak yapısında önemli bozulmalara neden olduğu, toprakların strüktür stabilitesinde ve agregasyon indeksinde zayıf düzeyde azalma, hidrolik iletkenlikte ciddi düşme ve tuzluluk düzeyinde ise ciddi artışların meydana geldiği belirlenmiştir.

Tüm bu sorunların oluşmaması için sulamanın iklim, topoğrafya, toprak koşulları ve bitki çeşidi dikkate alınarak yapılması gerekecektir. Ancak gübreleme ve ilaçlama faaliyetlerinin de bu bütünlük içerisinde doğru bir şekilde yapılması halinde toprak bozulması önlenmiş olacaktır. Aksi halde bozulan bir toprağın geri kazanılması için o alanda arazi tesviyesi, sulama ve drenaj tesisleri ile ıslah maddesinin kullanıldığı çok yüksek maliyetli alt yapı yatırımları gerekmektedir (Yıldız, 2003).

Bunların inşasını takiben uygulanan ıslah maddesinin toprakta istenen kimyasal değişimi sağlaması için yoğun yıkama suyu verilmesi icap edecektir. Bu ise karşılığında bir ürün elde edilmediği ve yıllarca sürececek bir sulama faaliyetini gerektirdiğinden maddi olarak katlanılması zor bir uğraş olmaktadır. Bozulan bir toprağın geri kazanılması hemen hemen imkânsız denebilmektedir.

Sonuç ve öneriler

Toprak bozulması çok ciddi ve geri dönüşü neredeyse imkânsız olan bir durumdur. Bu bozulma durumuna karşı alınabilecek önlemler önemli olmaktadır. Bunların başında erozyon gelmektedir. Su ve rüzgâr erozyonu önlenmeleri gerekli iki önemli faktördür. Bunlardan en az düzeyde etkilenmek için öncelikle eğimli araziler sürekli bitki örtüsü ile kaplı tutulmalıdır. Özellikle mera alanlarında gerçekleştirilecek otlatmalar erken ve aşırı düzeyde yapılmamalıdır. Eğimli arazilerde toprağı koruyucu tesviye eğrilerine paralel sürüm, şeritvari ekim, teraslama ve sekileme önlemleri önemsenmelidir. Toprağı oluştuğu yerde, suyu düştüğü yerde tutulmasını sağlayacak bir planlama gerçekleştirilmelidir.

Tüm canlılar için bahşedilen en büyük nimetlerden olan toprağın bozulması, üzerinde yetiştirilen tarım ürünlerinin bünyesinde ki mineral ve besin dengesinin de bozulması manasına gelmektedir. Bu bozulma, besin maddelerinden mahrum kalan bitkileri hastalık ve zararlılara karşı daha hassas kılmaktadır.

Bu durumun giderilmesinde, kadim ziraatın ipinin çekildiği milat olan, ikinci dünya savaşını takip eden 1950'li yıllarda, tarım ürünlerinin besin değerini bozan haşereleri, mikroorganizmaları ve diğer zararlıları yok eden sentetik pestisitler, ürünlerde verim artışına neden olan kimyasal gübreler ile daha etkili tarım alet ve makinalarının kullanılması sonucu üretim maliyetlerinin düşmesi ve önemli verim artışının sağlandığı Yeşil Devrim adı verilen dönem yaşanmıştır.

Bir anlamda endüstriyel tarımın başlangıcı sayılan bu dönemden sonra, dünyanın her bir noktasında çiftçiler bu gübreleri kullanmaya başlamıştır. Kimyasal gübrelerin içerisindeki elementlerin her birinin bitkileri nasıl güçlendirdiği, köklerini nasıl geliştirdiğini ve büyümelerini nasıl artırdığını anlatmaktadır.

Bugün hala kimyasal gübrelerin suda kolayca çözüldüğü, bitkiler tarafından hızla kullanılır hale geldiklerinde verimi artırdığı için düzenli kullanılmaları gerektiği vurgulanmaktadır. Küresel ısınmadan dertlenirken diğer taraftan küresel ısınmadaki etkisi devasa bir gaza sebep olan kimyasal gübrelerin kullanılması göz ardı edilmektedir.

Kimyasal gübrelerin çevreye zararsız, bitkilere yararlı ve çiftçiye kazanç sağladığı ifade edilmektedir. Oysa uzun vadede topraktaki mikroorganizmaları öldürdüğü, azot ve fosfor gibi içerikleriyle yeraltı sularına ulaşarak kirliliğe neden olduğu da bilinmektedir.

Çiftçiler bitkilerin çürümesi sonucu elde edilen kompost, yazlık baklagil yeşil gübreler, çiftlik gübresi gibi uygulamalar ile toprakta organik madde oluşmasına yardımcı olarak, hem kimyasal gübre ihtiyacını azaltmakta hem de toprak bünyesini düzelterek bozulmasını önleye bilmektedir. Su ve gübrelerin daha yavaş verilmesine izin veren yağmurlama ve damla sulama yöntemleri ile azot oksit emisyonlarını düşürmekte yardımcı olmaktadır.

Geçmişten günümüze ister kentsel, ister endüstriyel, isterse tarımsal tüketime yönelik olsun sudaki yeni taleplerin karşılanması için her defasında

daha uzakta olsa da yeni tatlı su kaynakları bulup kullanmak hidrolojik misyon olmuş bulunmaktadır. Oysa günümüzde geline bu durumun sürdürülme imkânı kalmamıştır. İklim değişikliğinden kaynaklanan tehditlerde dâhil, su mevcudiyetinin hızla değişen koşulları ve rakip kullanımları yönetmeye uygun, idari sınırlar değil, akarsu havza sınırlarını esas alan “bütüncül havza planlaması” gerekmektedir. Bu anlamda çözüm uygulamalarının hiç de kolay olmamasına rağmen üstesinden gelinmesi kaçınılmazdır.

Kaynaklar

Akpınar, T., K. Özyıldırım, 2016. Trakya Bölgesi’nde Tarımsal Faaliyette Bulunan Çiftçilerin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi. Çalışma ve Toplum, 3(50), 1231-1270.

Altıkat, A., T. Turan, F. Ekmekyapar Torun, Z. Bingöl, 2013. Türkiye’de Pestisit Kullanımı ve Çevreye Olan Etkileri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 40(2), 87-92.

Alpaslan, N., A. Tanık, D. Dölgen, 2008. Türkiye’de Su Yönetimi-Sorunlar ve Öneriler, TÜSİAD Yayın no: T/2008-09/469.

Apaydın, A., 2007. Yeraltı Suyu Besleniminin Eğri Numarası (SCS-CN) yöntemi ile hesaplanması: Çakıloba-Karadoruk Akifer Sisteminde (Beypazarı-Ankara) Örnek Uygulama. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi, 28(3), 159-172.

Ayten, E., 2007. Türkiye’de Arazi Kullanımı ve Havza Yaklaşımı. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 2(1): 21-25.

Başer, N., A. Karahan, M. Şenyurt, H. Sürek ve A. Karahan, 2004. Edirne Nehrinden veya Diğer Su Kaynaklarından Sulanan Çeltiklerde Ağır Metal İçerikleri Üzerine Bir Araştırma. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı. Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü Sonuç Raporu. TAGEM / 64 / 03 / 11 / 01 / 062, Tekirdağ.

Bellitürk, K., 2008. Trakya Bölgesi Topraklarının Azot-Fosfor-Potasyum Bakımından İncelenmesi. Hasat Tarım Dergisi, Haziran. Yıl: 24 (277): 102-106, İstanbul.

Bellitürk, K., 2016. Sürdürülebilir Tarımsal Üretimde Katı Atık Yönetimi İçin Vermis Kompost Teknolojisi. Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi 31(3): 1-5, Adana.

Birleşmiş Milletler Çevre Programı-UNEP, 2014. United Nations Environment Programme, Report of the United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme, Nairobi, 23-27.

Boyraz, D., H. Sarı, 2012. Tekirdağ Değirmenaltı-Muratlı Kavşağı Çevre Yolunu Oluşturan Katenadaki Toprakların Fiziksel ve Zemin Özelliklerinin Değerlendirilmesi. Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 9(3): 68-78.

Cangir, C., D. Boyraz, K. Haktanır, 2005. Toprak Kaynakları ve Kullanımı, VI. Türkiye Ziraat Mühendisliği Teknik Kongresi, Bildiri Metinleri, <http://www.zmo.org.tr>

Çullu, M.A., İ. Çelik, A. Almaca, 2000. Degradation of the Harran Plain Soils Due to Irrigation. Proceedings of International Symposium on Desertification, pp: 193-197, Konya.

Delibaş, L., A.N. Yüksel, S. Albut, A. İstanbulluoğlu, F. Konukcu ve İ. Kocaman, 2008. Meriç-Ergene Sularının İpsala Çeltik Alanlarındaki Toprak Kirliliği ve Besin Zinciri Üzerine Etkileri. Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (TÜBAP-715), Edirne.

DSİ, 2001. Ergene Nehri Kirliliği ve DSİ Sulamalarına Etkisi. Devlet Su İşleri 11. Bölge Müdürlüğü, Edirne.

DSİ, 2014. Güneydoğu Anadolu Projesi-GAP. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü yayınları, Ankara.

Dumlu, O., H.T. Yalçın, E. Bozkurtoğlu, 2006. Literatür yayınları, No: 485, İstanbul.

Evsahibioğlu, N., T. Aküzüm, B. Çakmak, 2010. Su yönetimi, su kullanımı ve stratejileri ve sınıraşan sular. Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi, 11-15 Ocak, Ankara.

İstanbulluoğlu, A., F. Konukcu, İ. Kocaman, 2006. Trakya Bölgesi Su Kaynaklarının Geliştirilmesi ve Sulu Tarım Uygulamaları: Mevcut verilerin Sorunların Çözümü İçin Analizi. Trakya Üniversitesi Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 3(2): 139-152.

Oldeman, L.R., 1994. The Global Extent of Soil Degradation. In Soil Resilience and Sustainable Land Use, ed, D.J. Greenland and T. Szaboles. Wallingford, U.K.: Commonwealth Agricultural Bureau International.

Öncüer, C., 1995. Tarımsal Zararlılarla Savaş Yöntemleri ve İlaçları. Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, 333 s.

Özden, M., H. Dursun, A.N. Sevinç, 2000. The Land Resources of Turkey and Activities of General Directorate of Rural Services, General Directorate Services, Planning Coordination Department, Ankara/Turkey, http://www.toprak.oerg.tr/isd/isd_03.htm

Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2018. Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği-On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023). Ankara: Kalkınma Bakanlığı yayını.

Şen, Z., 2003. Yeraltı Suyu (Hidrojeoloji). Su Vakfı Yayınları. İstanbul.

Özkan, E., A. Kubaş, 2008. Ergene Havzasında Kirliliğin Sosyo-Ekonomik Etkileri. Havza Kirliliği Konferansı, 26-27 Haziran, İzmir.

Yeğen, O., 1993. Yabancıotlar ve Mücadelesi. Akdeniz Üniversitesi Yayınları, No: 52, Antalya, 142 s.

Yıldız, D., 2003. Akdeniz Havzasında Su Sorunları ve Türkiye. TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

Yıldız, D. ve Ö. Özbay, 2010. Su ve Toprak. USİAD, Ulusal Sanayici ve İşadamları Derneği Yayını. İstanbul.

Yılmaz, E., Z. Alagöz. 2008a. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 1(2): 15-21.

Yılmaz, E., Z. Alagöz. 2008b. Toprak Bozulması. Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 22(45): 58-65.

Hibrit ve Elektrikli Araçların Batarya Sistemlerinde Termal Kontrol: Yenilikçi Soğutma Çözümleri

Mehmet ÇELİK¹

1- Doç. Dr.; Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
mehcelik@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3390-1716.

ÖZET

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının tükenmesi, fosil yakıtlardan kaynaklı çevresel etkiler, daha güvenilir teknolojiler aramaya ve yenilik yapmaya zorlamaktadır. Fosil yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorların egzozundan salınan emisyonlar her geçen gün çevreye daha fazla zarar vermekte ve ekolojik dengeyi bozmaktadır. İçten yanmalı motorların yerine son yıllarda elektrikli araçların kullanımı hızla artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak lityum iyon batarya (LİB) kullanılan elektrikli araçlarda bataryanın çalışma sıcaklıklarını kontrol etmek çok önemlidir. Özellikle bataryaların şarj ve deşarjı sırasında aşırı ısı üretmesi termal kaçaklara sebep olabilmektedir. Batarya paketinin sıcaklığını kontrol edebilmek için batarya termal yönetim sistemi (BTYS) kullanılmaktadır. İyi bir BTYS batarya takımı üzerinde sıcaklığın etkilerini ve yaşlanma oranını azaltabilir, batarya verimliliğini ve kullanım güvenliğini iyileştirebilir, hizmet ömrünü uzatabilir. Yaygın olarak kullanılan; hava soğutma BTYS, sıvı soğutma BTYS, soğutucu akışkan doğrudan soğutma BTYS, ısı borusu tabanlı BTYS ve faz değiştiren malzeme BTYS olmak üzere BTYS'leri vardır. Bu çalışmada günümüz elektrikli araçlarında kullanılan farklı kullanım özellikleri ve yapılarına sahip BTYS çeşitleri ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler – Batarya soğutma, Termal yönetim, Elektrikli araçlar, Hibrit araçlar, Enerji yönetimi

GİRİŞ

Enerji konusu, doğal kaynakları rasyonel bir şekilde kullanarak güvenilir, daha az kirlletici ve ekonomik olarak uygun ulaşım araçlarının yaratılmasının önündeki en önemli zorluklardan biridir (Mesbahi et al., 2021). Sınırlı rezerv hacmi, dengesiz dağılımı ve artan enerji talebi, fosil yakıt bazlı enerji kaynaklarının yerini alacak yenilenebilir ikamelerin sayısının artmasına önemli miktarda katkıda bulunmaktadır. Ayrıca geleneksel enerji yapılarının getirdiği çevresel etkiler de bu geçiş sürecini hızlandırmıştır (Lyu et al., 2019). Günümüz de iklim değişikliği dünya çapında en kritik konulardan biridir. 2018 yılında yakıt yanmasından kaynaklanan doğrudan karbondioksit (CO₂) emisyonunun %24'ünden ulaşım endüstrisi sorumludur (Behi et al., 2020). Dünyamızı çevre kirliliğinden korumaya ve enerji kıtlığının kısmen çözülmesine yardımcı olmak için, otomotiv endüstrisi tarafından taşınabilir batarya teknolojisindeki ve özellikle lityum iyon bataryalardaki (LİB'ler) büyük ilerlemelerle birleştiğinde, elektrikli araçlar (EA'lar) ve hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar) geliştirilmektedir (Akinlabi & Solyali, 2020; Kshetrimayum et al., 2019). EA'lar son on yılda büyük ilgi görmektedir. Sıfır sürüş emisyonları, yüksek aktarma organları verimliliği ve yenilenebilir enerjilerle entegrasyon imkânı ile, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla en

çevre dostu araçlardan biridir (W. Li et al., 2021). Taşımacılık sektöründe şu anda mevcut olan yaklaşık 900 milyon aracın %96'sının klasik karbon bazlı yakıtlarla çalıştığı bilinmektedir (Akinlabi & Solyali, 2020).

Avrupa Birliği (AB), Avrupa'da akü üretimini teşvik etmek ve otomotiv üreticilerinin artan araç elektrifikasyon yatırımlarını karşılamak için 2017 yılında Avrupa Batarya Birliği (EBA) sanayi politikasını başlattı. 2010 ve 2018 yılları arasında, LİB'lerin küresel hücre üretimi, Avrupa'da yalnızca %3'ü üretilirken, yıllık %26'lık bir artışa tanık oldu (Abdelbaky et al., 2021). Çin'de, 2011'den 2016'ya kadar mevcut olan verilere göre, son 6 yıllık bir süre içinde EV üretimi 10.000'den 600.000'e yükseldi. Bununla birlikte küresel batarya pazarı hızla büyümüştür. Benzer şekilde, batarya talebi de aynı dönemde yaklaşık 30 GWh'ye kadar önemli bir büyüme kaydetti (Kshetrimayum et al., 2019). Son zamanlarda, hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar), plug-in HEA'lar ve bataryalı EA'lar dahil olmak üzere elektrikli araçlar (EA'lar) için en uygun enerji depolama çözümü; yüksek enerji yoğunluklarına ve güç performanslarına sahip olan LİB, olarak önerilmiştir (Hong et al., 2020). LİB, daha yüksek enerji yoğunluğu, hafifliği ve uzun çevrim ömrü nedeniyle EA'lar için en popüler enerji depolama sistemi olarak ortaya çıkmıştır (Kshetrimayum et al., 2019). Bununla birlikte, LİB çalışma özellikleri, sıcaklık aralığından büyük ölçüde etkilenir. Şarj ve deşarj işlemleri sırasında batarya hücrelerinde oluşan ısı, batarya performansını ve kullanım ömrünü azaltır. LİB, şarj ve deşarj koşulları altında sırasıyla 0–45 °C ve -10 ila 60 °C sıcaklık aralığında tutulmalıdır. Ayrıca, eşit olmayan bir sıcaklık dağılımı her hücrenin yerel olarak bozulmasına neden olabileceğinden, batarya hücreleri arasındaki sıcaklık dağılımı çeşitli çalışma koşullarında 5 °C'nin altında tutulmalıdır (Hong et al., 2020).

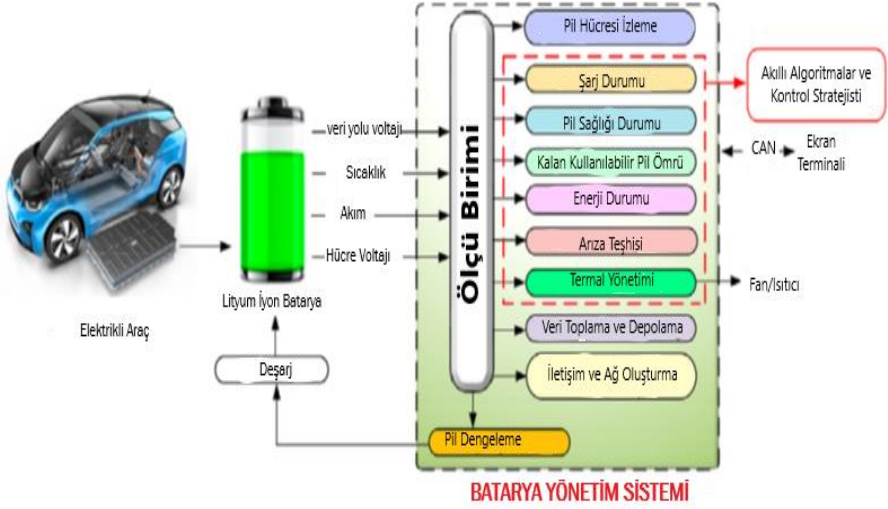
Bataryaların yüksek sıcaklığı nedeniyle enerji arzı ve kullanım ömrü keskin bir şekilde azalacaktır ve daha ciddi olarak, bataryaların yüksek sıcaklığı, termal kaçak gibi güvenlik sorunlarını tetikleyebilir. Bu nedenle, batarya termal yönetim sistemi (BTYS), özellikle yüksek hızlı deşarj için batarya paketinde hayati bir rol oynar. Batarya paketinin deşarj akımı, batarya paketinin termal denge performansı üzerinde büyük etkisi olan sürüş döngüsünde dalgalanır. Uygun bir BTYS, batarya hücrelerinin maksimum sıcaklıklarını uygun bir aralıkta tutma ve batarya modüllerinin sıcaklık farklılıklarını en aza indirme konusunda yetkindir. Genel olarak, yüksek sıcaklık ve büyük sıcaklık farkı, bataryaların içindeki dirençler ve kapasiteler arasındaki tutarsızlığı şiddetlendirebilir, batarya paketinin performansının düşmesine neden olabilir ve bataryanın durum tahmin hatasıyla sonuçlanabilir (Y. Li et al., 2021).

BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ

Elektrikli araçlar için etkin BTYS'ne büyük önem verilmektedir. BTYS batarya performansının en üst düzeye çıkarılması, yaşlanma hızının rasyonelleştirilmesi ve termal kaçak riskinin en aza indirilmesi gibi konuları kapsar (Shen & Gao, 2020). Sıcaklığın uygun olmayan dağılımı, önemli performans düşüşüne neden olabilir (Thakur et al., 2020). BTYS, esasen bir batarya takımının beynidir. Bir batarya takımı, farklı seri, paralel ve bunların kombinasyonu şeklinde düzenlenmiş birkaç batarya hücresinden oluşur (Tete et al., 2021). Termal güvenlik, kararlılık ve homojenlik gibi konular, iyi tasarlanmış ve yüksek verimli bir BTYS için bataryaların istenilen sıcaklık aralığında çalışması ve düzgün sıcaklık dağılımını sağlaması açısından önemlidir. Bu nedenle BTYS'ler, bataryaların en iyi performansı göstermesini sağlamak için güvenilir termal düzenleme sağlamalı ve ayrıca kompaktlık, hafiflik, uygun bakım, elektrik yalıtımı, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gibi EA'ların gereksinimlerini karşılamalıdır (Liu et al., 2016). Verimli bir BTYS'nin Şekil 1'de gösterildiği gibi belirli temel sorumlulukları vardır:

- Şarj durumu, enerji durumu, sağlık durumu ve kalan kullanım ömrü dahil olmak üzere batarya durumlarını doğru bir şekilde tahmin eder ve değerlendirir,
- Akü sıcaklıklarını güvenli limit dahilinde kontrol eder,
- Arıza teşhisini, arıza tahminini ve arıza işlemeyi çalıştırır,
- Akü hücreleri arasındaki voltaj, şarj ve kapasiteyi dengeler (Hossain Lipu et al., 2021).

EA'lardaki BTYS, birçok devre, bileşen, güç elektroniği, sensör, aktüatör, diyot, kapasitör, indüktör, transformatör, anahtarlama, dönüştürücü ve güvenlik ekipmanını içerir. Birçok algoritma, model ve kontrol sinyali tarafından kontrol edilir. BTYS'de kullanılan en yaygın yaklaşımlar, model tabanlı yöntemler ve akıllı yöntemlerdir. Verimli bir BTYS kontrolörü, batarya güvenliğini sağlamanın yanı sıra batarya takımını tehlike koşullarından korur (Hossain Lipu et al., 2021).



Şekil 1. EA uygulamaları için BTYS'nin şematik diyagramı (Hossain Lipu et al., 2021).

LİB, diğer batarya türlerinin performansına hâkim olduğu için ticari amaçlı en çok tercih edilen bataryalardır. Bataryanın performansı, nihai olarak sıcaklığa bağlı olan bir elektrokimyasal işleme bağlıdır (Tete et al., 2021). LİB üretilen ısıyı sınırlamak için iki yöntem kullanılır: iç ve dış termal yönetim sistemleri. Dahili yönetim sisteminde oluşan ısıyı azaltmak için elektrot, katot ve anot malzemelerinin malzemesi ve kalınlığı gibi farklı düzenlemeler yapılır (Thakur et al., 2020).

Batarya ve motor termal yönetimi için ortama göre beş kategoride sınıflandırılabilen hem pasif hem de aktif stratejiler önerilmiştir. Bunlar;

- Hava,
- Sıvı,
- Faz değişimli malzeme,
- Isı borusu
- Hava-ısı borusu kombinasyonu (Tian et al., 2018).

Aktif yöntemlerde, soğutma/ısıtma hızı, güç tüketen ekipmanlarla aktif olarak kontrol edilebilmektedir. Zorlanmış hava akışı, sıvı sirkülasyonu ve soğutucu akışkan kullanımı, soğutma/ısıtma hızının sırasıyla fanlar, pompalar ve kompresörler kullanılarak kontrol edildiği aktif BTYS'lerin bu tür örnekleridir. Öte yandan, pasif sistemlerde güç tüketen ekipman yoktur ve doğal hava konveksiyonu, faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) ve ısı boruları gibi soğutma/ısıtma hızını değiştirmek için herhangi bir kontrol sistemine ihtiyaç duymazlar (Akbarzadeh et al., 2021). Bununla birlikte, bu sistemle ilgili en büyük sorun, uygulamada karmaşıklık, daha yüksek maliyet, daha az

güvenilirlik ve EA'lar park edildiğinde bile batarya termal yönetimini sağlamak için enerji tüketimidir (Thakur et al., 2020).

Bahsedilen BTYS'lerin her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Genel olarak aktif yöntemler daha kontrol edilebilir ve daha yüksek rejenerasyon hızına sahipken, pasif yöntemler daha fazla enerji verimliliğine sahiptir. Bu nedenle hem aktif hem de pasif stratejilerden yararlanmak için, son zamanlarda, hibrit termal yönetim sistemleri olarak bilinen aktif ve pasif yöntemlerin bir kombinasyonu olan bataryalar için yeni bir termal yönetim konsepti geliştirilmiştir (Akbarzadeh et al., 2021).

2.1. Hava Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

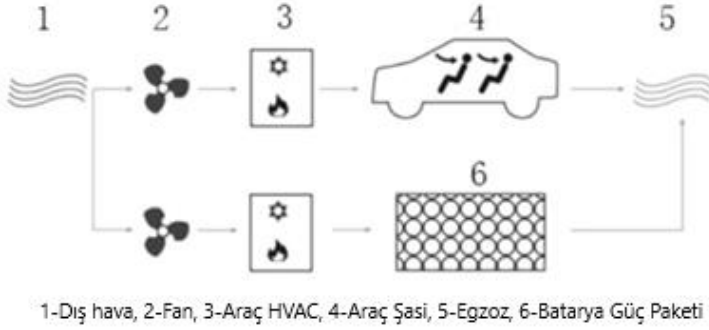
Hava soğutmalı BTYS, farklı hava kaynaklarına göre basitçe üç sınıfta sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Sadece harici hava kullanan sistem,
- Bataryaların soğutulması için önceden şartlandırılmış kabin havası kullanımı,
- Kabin ile batarya grubu için farklı soğutma sistemi (Lu et al., 2020).

Hava soğutmalı BTYS, hem düşük güçte hem de yüksek güçte şarj ve deşarj işleminde iyi bir ısı dağılımı etkisi sağlayabilir. Genelde piyasada paralel hava kanalları veya seri hava kanalları ile hava soğutma yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Cheng et al., 2020). Toyota Prius, Toyota RAV-4 Honda Insight ve Nissan Leaf araçlarında, hava soğutma tabanlı termal yönetim sistemleri kullanılmıştır (Al-Zareer et al., 2017; Liu et al., 2016). Hava soğutmanın düşük maliyeti, daha az ağırlığı, bol kaynağı ve bakım kolaylığı gibi avantajları olmasına rağmen, sınırlı ısı transfer katsayısı nedeniyle daha yüksek deşarj oranları, soğuk ve sıcak hava koşulları gibi aşırı koşullar altında uygun değildir (Monika et al., 2021). Yaygın olarak kullanılan LİB ısı transfer kabiliyeti hava zorlamalı konveksiyon ile arttırılsa da, batarya yüksek deşarj oranlarına maruz kaldığında, etkinliği oldukça düşüktür ve ortama ısı zamanında iletilemez (Gou et al., 2019).

Batarya takımının sıcaklık artışı ve sıcaklık değişiminin giriş sıcaklığından bağımsız, ancak batarya ısıtma hızıyla orantılıdır. Bu nedenle, hava soğutmalı BTYS'yi tasarlarken, hava akış hızının ve hava akışının uygun şekilde ayarlanması özellikle önemlidir. Yardımcı hava menfezlerinin konumu, bataryanın maksimum sıcaklığını ve maksimum sıcaklık farkını da etkili bir şekilde azaltabilir. Aynı zamanda, sıcaklık homojenliğini iyileştirmek için ileri geri hareket eden bir hava akımı kullanmak çok faydalıdır. Soğutma performansını etkileyen bir diğer önemli faktör de

bataryaların yerleştiriliş düzenidir (Lu et al., 2020). Şekil 2’de HVAC modüllü batarya soğutma sistemi görülmektedir.



Şekil 2. Batarya paketi “HVAC modülü” soğutma sistemi (Thakur et al., 2020).

2.2. Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

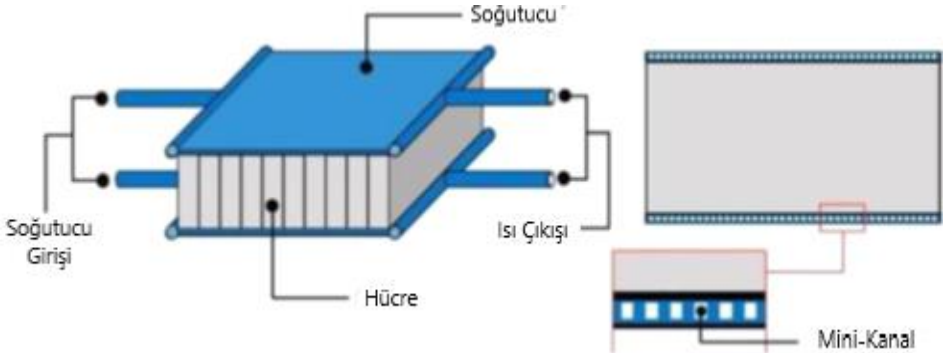
Elektrikli araç akülerinde enerji yönetimi bağlamında, sıvı bazlı bir soğutma sistemi, hava soğutma yöntemine kıyasla yüksek ısı transfer katsayısı nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Kullanım ömrünün yanı sıra performanslarını iyileştirmek için bataryanın çalışma sıcaklığını soğutmak/korumak için daha etkili bir tekniğe ihtiyaç vardır (Thakur et al., 2020). Sıvı soğutma sistemi, batarya maksimum sıcaklığını ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkını makul bir aralıkta kontrol edebilen ve çevrim ömrünü uzatabilen etkili bir soğutma yöntemi olarak kabul edilir (Lu et al., 2020). Sıvı soğutma BTYS, yüksek verimliliği nedeniyle EA endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aslında sıvı soğutma ekipmanı karmaşık ve maliyetlidir (Gou et al., 2019). Bir sıvı soğutma sistemi tasarlarken, boyut, maliyet, ağırlık, plaka ve batarya arasındaki temas direnci, bataryalar arasındaki sıcaklık değişimi, sızıntı, genel modül verimliliği ve pompalama gücü gibi çeşitli boyutlandırma ve derecelendirme parametreleri dikkate alınmalıdır (Monika et al., 2021). Sistemin farklı kontrol çözümlerine göre aktif soğutma ve pasif soğutma olarak ikiye ayrılabilir. Sıvı soğutma sisteminde, pasif soğutma, düşük soğutma verimliliğine, sıcaklık üzerinde zayıf kontrole sahiptir ve yalnızca düşük güçlü batarya paketleri için uygundur. Aktif sıvı soğutma sistemini ise pratikte Tesla S, General Motor Volt ve diğer otomotiv şirketleri gibi birçok otomotiv şirketi tarafından kullanılmaktadır (Lu et al., 2020).

Genel soğutucu olarak genellikle su, glikol veya yalıtılmış yağ kullanılır. Daha yüksek ısı transfer katsayısına sahiptir ve hava soğutmadan daha yüksek soğutma kapasitesi sunar. Ancak pompalar, tanklar, ısı eşanjörleri ve valfler gibi bazı ek ekipmanların daha fazla dolu alan, ağırlık ve kaçak koruma ve karmaşık bakım gereksinimlerine neden olması için elektrikli araçlara takılması gerekir. Ayrıca, sıvı soğutmalı ısı eşanjörleri boyunca nispeten yüksek basınç düşüşü, önemli ölçüde artan enerji tüketimine

ve sistemin maliyetine yol açacaktır (Liu et al., 2016). Ayrıca, sıvının akış kanalının makul bir şekilde tasarlanması gerekir, aksi takdirde sistemin ısı transfer kapasitesi düşerek batarya paketinde eşit olmayan bir sıcaklık dağılımı bırakır (Gou et al., 2019). Sıvı soğutma sistemi, batarya yüzeyinin soğutma sıvısı ile doğrudan temas halinde olup olmamasına göre doğrudan temas modu ve dolaylı temas modu olarak ikiye ayrılabilir (Lu et al., 2020). Bunun için General Motor Volt, bataryanın daha geniş yüzeylerinde ısı dağılımını gerçekleştirmek için buz plakaları kullanır. Ford, Jaguar, Land Rover ve Tesla gibi markalar, bataryanın altına sabitlenen daha büyük tek planya plakaları kullanmaktadır (Shen & Gao, 2020).

2.2.1. Doğrudan Sıvı Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Doğrudan sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemi, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmamaktadır. Araç ağırlığını etkili bir şekilde azaltabilen, yüksek sıcaklıkta soğutma sağlayabilen ve araca özel enerji ve ekonomiyi iyileştirebilen birkaç bileşen gerektirir. Çok umut verici bir batarya termal yönetim sistemidir. Batarya, ek kondansatörler, ısı eşanjörleri ve soğutucu değişim devreleri olmadan doğrudan evaporatör plakasına bağlanır. Pratik uygulamalarda, soğutucu akışkan doğrudan soğutma BTYS, Şekil 3'de gösterildiği gibi batarya modülünün üstüne ve altına bir mikro kanallı ısı emici tabakalar soğutmayı gerçekleştirir (Lu et al., 2020).



Şekil 3. Soğutucu akışkan doğrudan soğutma BTYS şeması (Lu et al., 2020).

Bu yöntemde kullanılacak soğutucu akışkan; yüksek termal iletkenlik, daha iyi ısı transfer özelliği, daha düşük viskozite ve düşük yoğunluk gibi özelliklere sahip olmalı ve batarya malzemesi ile reaksiyona girmemelidir. Soğutucu akışkan BTYS uygulamalarında çoğunlukla su ve mineral yağlar, silikon yağlar vb. yağlar kullanılmıştır. Son yıllarda ısı transfer özelliği iyi olan sıvı metallerin, kaynayan sıvıların ve nanoakışkanların kullanımı, yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır (Thakur et al., 2020).

2.2.2. Dolaylı sıvı soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Doğrudan sıvı soğutmanın uygulanması, yüksek bir termal performansa rağmen elektriksel kısa devre olasılığına sahiptir ve ayrıca sızıntı sorunlarına daha fazla dikkat edilmesi gerekir. Ayrıca yüksek viskoziteli dielektrik akışkanların kullanımı da pompalama için yüksek güç tüketimine neden olmuştur. Ek olarak, dolaylı soğutma sisteminin uygulanması, doğrudan soğutma sistemine göre çok daha kolaydır ve daha az viskozite nedeniyle sıvı pompalama için nispeten daha az miktarda güce ihtiyaç duyar. Sonuç olarak, dolaylı sıvı soğutma sistemlerinin kullanılması pratik sistemler için daha iyi bir seçenek olabilir. Dolaylı sıvı soğutma yöntemini kullanırken, kanal malzemelerinin eklenmesi ve elektriksel yalıtım kaplaması nedeniyle ısı direnci daha fazla dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı, dolaylı yöntemin ısı transfer performansı her zaman doğrudan sıvı soğutmalı yönteminkinden daha düşüktür. Dolaylı sıvı soğutma yöntemi, sıvının kanaldan geçme şekline göre soğuk plakalı soğutma, ayrıklı tüplü soğutma ve ceket soğutma yöntemi olarak sınıflandırılabilir (Thakur et al., 2020).

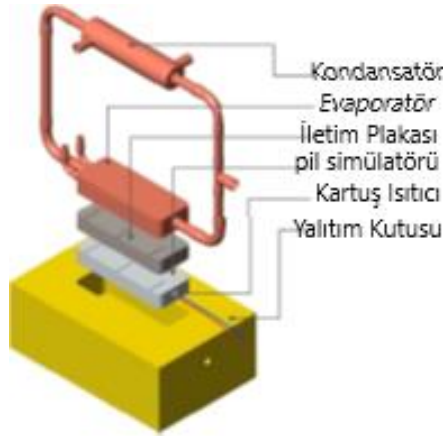
2.3. Isı Borusu Soğutmalı Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Isı boruları; buharlaşma yoluyla yüksek ısı transferi prensibine göre çalışan termal süper iletkenler olarak bilinirler. Isı borularının etkin ısı iletkenliği, aynı boyuttaki bir bakır çubuğunkinden 90 kata kadar daha yüksek olabilir (Ye et al., 2016). Verimli bir ısı transfer elemanı olarak ısı borusu, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısı direnci nedeniyle enerji endüstrisi tarafından tercih edilmektedir. Havacılık, askeri sanayi, mikroelektronik ısı dağılımı, yapı malzemeleri, metalurji, güneş enerjisi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Değişken yapı sayesinde, ısı borusu, bataryayı gerekli çalışma sıcaklığı aralığında tutmak için büyük miktarda ısıyı batarya takımının içinde hareket ettirebildiği gibi batarya paketinin içindeki ısıyı batarya paketinin dışına aktarmak içinde kullanılabilir. Bu sayede batarya hücrelerinin içindeki sıcaklık farkını önemli ölçüde azaltabilir ve sıcaklık dengesi sağlayabilir (Lu et al., 2020; Zhang et al., 2020).

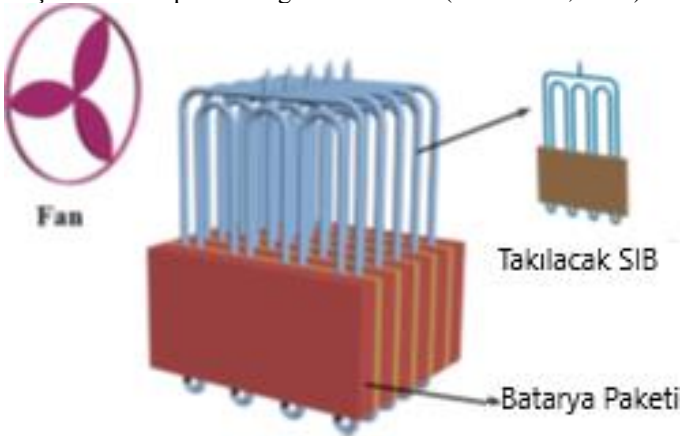
Faz değişimli ısı transferinden yararlanırlar, bir ısı kaynağında (buharlaştırıcı) buharlaşırlar ve bir ısı emicide (kondenser) yoğunlaşırlar. Ayrıca yüksek ısı iletkenlik, kompakt yapı, esnek geometri, çift yönlü ısı transfer özellikleri, uzun hizmet ömrü ve uygun bakım gibi mükemmel özelliklere sahiptirler (Liu et al., 2016). Evaporatör yüzeyini neredeyse sabit sıcaklıkta homojen bir şekilde tutabilmektedir. Bu çekici özellikler, ısı borusunu HEA/EA batarya soğutması için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir. Şimdiye kadar, ısı borusu sisteminin geniş kullanımını sınırlayan tek endişe, karmaşık üretim süreci, fitil ve duvar malzemesi olarak pahalı bir metal olan bakırın kullanılması nedeniyle yüksek maliyetidir. Ancak, alüminyum ısı borusu imalatı üzerine yapılan son araştırmalar ısı

borusu maliyetini düşürmenin verimli ve güvenilir yolunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, alüminyum kullanımı aynı zamanda HEA/EA uygulamasında oldukça önemli olan soğutma sisteminin ağırlığının azaltılmasına da yardımcı olur (Tran et al., 2014).

Isı boruları, hafif ve kompakt boyutları nedeniyle merkezi işlem ünitesi ve elektrikli araç akülerinin termal yönetiminde uygulanmaya uygun, harici güç kaynağı gerektirmeyen ısı eşanjörleridir. Düz plaka döngülü ısı boruları, elektrikli araç termal yönetim sistemine uygulanma potansiyeli yüksektir. LİB takımlarının çoğu düz yüzeylere sahiptir (Şekil 4) (Putra et al., 2016). Son yıllarda, Şekil 5’de görülen salınlımlı veya titreşimli ısı borusu sistemleri benzersiz yapı modeli, yüksek performansı ve çok yönlülüğü nedeniyle güç cihazı soğutmasında ve enerji hasadında büyük ilgi görmektedir (Wei et al., 2019).



Şekil 4. Düz plaka döngülü ısı borusu (Putra et al., 2016).



Şekil 5. Salınlımlı ısı borusu batarya termal yönetim sistemi (Wei et al., 2019).

Titreşimli/salınımlı ısı borusu, 1990'ların ortalarında tanıtılan yeni bir verimli ısı transfer cihazı türüdür. Basit tasarımı, küçük boyutu ve mükemmel termal performansı nedeniyle büyük ilgi görüyor. TIB, elektronik soğutma ile uzay ve aviyonik termal kontrol uygulamaları için gelecek vadeden bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Tasarım ve çalışma prensibi olarak geleneksel ısı borusundan farklıdır. Birçok dönüşe bükülmüş uzun, sürekli bir kılcal borudan yapılmıştır ve daha fazla çalışma sıvısı içerir. Ek olarak, yoğunlaşan çalışma sıvısının evaporatöre geri akmasına yardımcı olmak için herhangi bir fitil yapısına gerek yoktur. Ayrıca, halka devreli kapalı yapısı, buhar-sıvı taşınımını önleyerek termal sürüklenme limitini azaltmıştır. Titreşimli ısı borusu, daha küçük elektronik bileşenlerden daha yüksek ısı dağılımı için en umut verici çözümdür (Wang et al., 2009).

2.4. Faz Değişimli Malzeme (FDM) Kullanılan Batarya Bataryası Termal Yönetim Sistemi

Yüksek gizli ısı, iyi termal depolama ve soğuk depolama kapasitesi nedeniyle, faz değiştiren malzemeler enerji depolama ve sıcaklık kontrolünün çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Faz değişim formuna göre, faz değişim malzemeleri dört tipe ayrılabilir: katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar. Bunlardan katı-buhar ve sıvı-buhar faz değişim formları, faz değişiminden önce ve sonra büyük hacim değişimine sahiptir. Farklı faz geçiş sıcaklık aralığına göre, faz değişim malzemeleri; düşük sıcaklık faz değişim malzemeleri (-50°C - 90°C), orta sıcaklık faz değişim malzemeleri (90°C - 550°C) ve yüksek sıcaklık faz değişim malzemeleri ($>550^{\circ}\text{C}$) olarak ayrılabilir. Diğer bir sınıflandırma ise, organik faz değişim malzemeleri (parafin, yağ asitleri, esterler vb.), inorganik faz değişim malzemeleri (erimiş tuzlar, kristalli hidratlı tuzlar ve alaşımlar), kompozit faz değişim malzemeleridir (ikili veya çok bileşenli kompozit faz değişim malzemeleri). FDM boyut olarak küçüktür, maliyeti düşüktür, enerji depolama yoğunluğu yüksektir ve belirgin enerji tasarrufu etkileri vardır. Güç değiştirme zirvesi, atık ısı geri kazanımı, güneş enerjisi depolama, bina enerji tasarrufu, soğuk zincir lojistiği ve diğer enerji kullanımında önemli bir rol oynar. Aynı zamanda, FDM, çevre ortamın sıcaklık kontrolünü gerçekleştirerek, faz geçiş işlemi sırasında büyük miktarda ısı emer ve serbest bırakır. Aktif hava soğutma ve sirkülasyonlu sıvı soğutma gibi geleneksel sıcaklık kontrol teknolojileriyle karşılaştırıldığında, FDM tabanlı sıcaklık kontrol teknolojisi daha iyi sıcaklık kontrol etkisine sahiptir ve ayrıca çevre dostu, yüksek verimli ve yeşil özelliklere sahiptir (Lu et al., 2020). Şu anda, FDM uygulaması, binalarının ısıtılması ve soğutulması, güneş enerjisi santralleri, güneş kurutma sistemleri, fotovoltaik elektrik üretimleri, buzdolapları, atık ısı geri kazanımı ve sıcak su sistemleri gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Du et al., 2018).

Batarya termal yönetim sistemlerinde faz değişim malzemelerinin kullanımı, batarya soğutma sistemlerinde yeni bir gelişmedir ve modül içerisindeki bataryalar tarafından üretilen termal enerjiyi emmek için faz değişiminin gizli ısısının kullanılmasını içerir (Al-Zareer et al., 2017). Enerji arzı ve talebi arasındaki boşluğu doldurmak için fazla enerjiyi depolamak için kullanılan faz değiştiren malzemeler ile termal enerji depolama, faz değişimi geçiş süresi (şarj ve deşarj süreci) sırasında belirli bir sıcaklıkta büyük miktarda enerjiyi emdiği veya serbest bıraktığı gizli ısı termal enerji depolaması ilkesine dayanan umut verici bir teknolojidir (Du et al., 2018).

Termal iletkenliği artırmak ve böylece ısı transfer oranını arttırmak için, yamuk, dikdörtgen ve I-şekli vb. gibi çeşitli kanat yapılarına sahip birleşik bir FDM modülü şeklinde de kullanılmaktadır (Monika et al., 2021). Faz değiştirici materyallerin kullanıldığı pasif termal yönetim, motive edici bileşenlere ihtiyaç duymaz ve aktif yaklaşımlarla karşılaştırıldığında daha kompakttır. LİB ürettiği ısı, faz değiştirme işlemi sırasında FDM'ler tarafından emilebilir ve bataryaların sıcaklık artışı geciktirilebilir, bu da bataryaların çalışma süresini uzatmaya yardımcı olur. Normal olarak, organik FDM'lerin düşük termal iletkenliği, ısı emilimi sırasında FDM'lerin içinde önemli bir sıcaklık gradyanına neden olur, bu da ısı birikimine ve LİB daha fazla sıcaklık artışına yol açar. FDM'lere nano grafit levhalar, genişletilmiş grafit, metal köpük, metal kanatçıklar, nanopartiküller ve karbon bazlı malzemeler gibi termal iletkenlik arttırıcı malzemeler eklenerek, ısı hızla FDM'ye aktarılabilir ve bataryalarda ısı birikimi olması önlenmiş olur (Huang et al., 2019). Ancak bakır/alüminyum köpük veya karbon fiber eklense bile yetersiz uzun süreçli bir termal stabilizeye sahiptir. Ayrıca, yüksek maliyet ve erime sonrası hacim genişlemesinin neden olduğu olası sıvı sızıntısı, EA'lar için yaygın olarak uygulanan FDM sistemlerini sınırlamıştır (Akbarzadeh et al., 2021; Liu et al., 2016).

Batarya termal yönetimi için uygun bir FDM, batarya çalışmasının istenen sıcaklık aralığında bir erime noktasına, iyi termal iletkenliğe, yüksek gizli ısıya ve yüksek ısı kapasitesine sahip olmalıdır. Ayrıca, faz değişim süreci sırasında düşük hacim değişimi ve dondurma sırasında çok az (veya hiç) aşırı soğutma çok önemli faktörlerdir. Ek olarak, FDM stabil, yanmaz, zehirsiz, düşük maliyetli ve büyük miktarlarda mevcut olmalıdır (Akbarzadeh et al., 2021).

SONUÇ

Bu çalışmada, elektrikli araçlar için batarya termal yönetim sistemlerinin (BTYS) önemi ve farklı BTYS türleri incelenmiştir. Enerji verimliliğini artırmak, bataryaların kullanım ömrünü uzatmak ve termal

güvenliği sağlamak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Hava ve sıvı soğutmalı BTYS, bataryaların sıcaklığını düzenlemek ve aşırı ısınmayı önlemek için yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Hava soğutmalı sistemler, düşük maliyet ve basitlik avantajına sahipken, sınırlı ısı transfer kapasitesi nedeniyle yüksek sıcaklık koşullarında yeterli performans gösterememektedir. Sıvı soğutmalı sistemler ise daha yüksek ısı transfer verimliliği sunmakta, ancak karmaşıklık, maliyet ve bakım gereksinimleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Doğrudan ve dolaylı sıvı soğutmalı sistemler, bataryaların sıcaklığını etkin bir şekilde yönetmek için farklı yöntemler sunar. Doğrudan sıvı soğutmalı sistemler, yüksek termal performans sağlamasına rağmen sızıntı ve elektriksel kısa devre riskleri taşımaktadır. Dolaylı sıvı soğutmalı sistemler ise daha güvenli bir seçenek olarak öne çıkmakta, ancak termal performans açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Isı borusu soğutmalı sistemler, yüksek ısı iletkenliği ve düşük termal direnç ile dikkat çekmektedir. Bu sistemler, özellikle aşırı sıcaklık koşullarında etkin bir ısı yönetimi sağlayarak bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasına katkıda bulunmaktadır. Sonuç olarak, batarya termal yönetim sistemleri, elektrikli araçların güvenliği, performansı ve kullanım ömrü için kritik bir rol oynamaktadır. Gelecekte hem aktif hem de pasif soğutma yöntemlerinin avantajlarını birleştiren hibrit termal yönetim sistemlerinin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Bu sayede, elektrikli araçlarda daha yüksek enerji verimliliği ve güvenlik sağlanabilirken, bataryaların çevresel etkileri de minimize edilebilecektir.

REFERANSLAR

- Abdelbaky, M., Peeters, J. R., & Dewulf, W. (2021). On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe. *Waste Management*, 125, 1–9.
- Akbarzadeh, M., Jaguemont, J., Kalogiannis, T., Karimi, D., He, J., Jin, L., Xie, P., Van Mierlo, J., & Bercibar, M. (2021). A novel liquid cooling plate concept for thermal management of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 231, 113862.
- Akinlabi, A. A. H., & Solyali, D. (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109815.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2017). Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 363, 291–303.
- Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Sokkeh, M. A., Gandoman, F. H., Bercibar, M., & Van Mierlo, J. (2020). A new concept of

thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115280.

- Cheng, L., Garg, A., Jishnu, A. K., & Gao, L. (2020). Surrogate based multi-objective design optimization of lithium-ion battery air-cooled system in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 31, 101645.
- Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., & Liu, H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220, 242–273.
- Gou, J., Liu, W., & Luo, Y. (2019). The thermal performance of a novel internal cooling method for the electric vehicle battery: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114102.
- Hong, S. H., Jang, D. S., Park, S., Yun, S., & Kim, Y. (2020). Thermal performance of direct two-phase refrigerant cooling for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115213.
- Hossain Lipu, M. S., Hannan, M. A., Karim, T. F., Hussain, A., Saad, M. H. M., Ayob, A., Miah, M. S., & Indra Mahlia, T. M. (2021). Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126044.
- Huang, Y. H., Cheng, W. L., & Zhao, R. (2019). Thermal management of Li-ion battery pack with the application of flexible form-stable composite phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 182, 9–20.
- Kshetrimayum, K. S., Yoon, Y. G., Gye, H. R., & Lee, C. J. (2019). Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113797.
- Li, W., Cui, H., Nemeth, T., Jansen, J., Ünlübayir, C., Wei, Z., Zhang, L., Wang, Z., Ruan, J., Dai, H., Wei, X., & Sauer, D. U. (2021). Deep reinforcement learning-based energy management of hybrid battery systems in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 36, 102355.
- Li, Y., Guo, H., Qi, F., Guo, Z., Li, M., & Bertling Tjernberg, L. (2021). Investigation on liquid cold plate thermal management system with heat pipes for LiFePO_4 battery pack in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116382.
- Liu, F., Lan, F., & Chen, J. (2016). Dynamic thermal characteristics of heat pipe via segmented thermal resistance model for electric vehicle battery cooling. *Journal of Power Sources*, 321, 57–70.
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101155.

- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822–827.
- Mesbahi, T., Sugrañes, R. B., Bakri, R., & Bartholomeüs, P. (2021). Coupled electro-thermal modeling of lithium-ion batteries for electric vehicle application. *Journal of Energy Storage*, 35, 102260.
- Monika, K., Chakraborty, C., Roy, S., Dinda, S., Singh, S. A., & Datta, S. P. (2021). An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO₄ batteries for electric or hybrid vehicles. *Journal of Energy Storage*, 35, 102301.
- Putra, N., Ariantara, B., & Pamungkas, R. A. (2016). Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application. *Applied Thermal Engineering*, 99, 784–789.
- Shen, M., & Gao, Q. (2020). Structure design and effect analysis on refrigerant cooling enhancement of battery thermal management system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101940.
- Tete, P. R., Gupta, M. M., & Joshi, S. S. (2021). Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. *Journal of Energy Storage*, 35, 102255.
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J. Y., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771.
- Tian, Z., Gan, W., Zhang, X., Gu, B., & Yang, L. (2018). Investigation on an integrated thermal management system with battery cooling and motor waste heat recovery for electric vehicle. *Applied Thermal Engineering*, 136, 16–27.
- Tran, T. H., Harmand, S., & Sahut, B. (2014). Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 265, 262–272.
- Wang, S., Lin, Z., Zhang, W., & Chen, J. (2009). Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22), 5276–5279.
- Wei, A., Qu, J., Qiu, H., Wang, C., & Cao, G. (2019). Heat transfer characteristics of plug-in oscillating heat pipe with binary-fluid mixtures for electric vehicle battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 746–760.
- Ye, Y., Shi, Y., Saw, L. H., & Tay, A. A. O. (2016). Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal management system for fast charging lithium ion battery packs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 893–903.

Zhang, W., Qiu, J., Yin, X., & Wang, D. (2020). A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114571.

Açık kömür ocağı işletmelerinde oluşan ocak göllerinin madencilik faaliyetlerine etkileri

Mehmet ÖZÇELİK¹

1- Süleyman Demirel Üniv., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Böl.,32260-Isparta
Orcid.org/0000-0003-4511-1946

ÖZET

Açık kömür ocağı işletmelerinde oluşan ocak göllerinin madencilik faaliyetlerine etkileri, üretim faaliyetlerini etkileyecek şekilde olabilir. Genelde tüm açık ocak kömür madenciliğinde görülebilecek ocak gölü ve onun etkileri, doğal çevrenin özelliğine, maden ocağının yapısına, uygulanan madencilik tekniğine ve işletmenin yapı sına bağlı olarak kısmen farklılıklar da gösterebilir. Oluşan ocak göllerinin etkilerin gerçek anlamda tahmin edilmesi, önlenmesi ya da azaltılabilmesi faaliyetin planlanması aşamasında çevresel etkilere ilişkin etüdlerin ve değerlendirmelerin yapılmasına bağlıdır. Bu çalışmada; Tekirdağ ili, Saray ilçesi, Edirköy bölgesinde bulunan terk edilmiş maden ocağı ocak gölünün faaliyette olan açık kömür ocağına etkileri üzerinde durulmuştur.

Anahtar kelimeler: Ocak gölü, Açık ocak işletmeciliği, Madencilik, Stabilitite, Şev stabilitesi

GİRİŞ

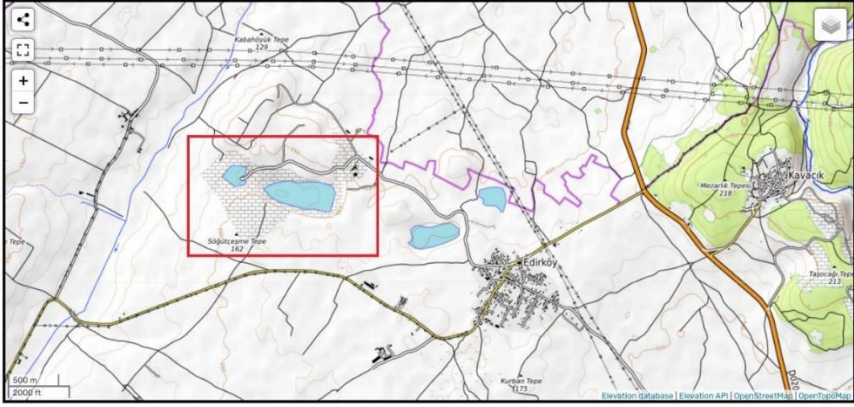
Madencilik faaliyetleri esnasında veya sonrasında, çevreyi kirletme potansiyeli olan ve düzgün yönetilmediği takdirde kullanılamayan kirli suyla dolu bir ocak gölü oluşumu meydana gelir (Lima vd., 2016; Setiawan vd., 2018). Ocak içine akan yeraltı suyu, doğrudan yağış ve yüzey akışı, ocak gölünün oluşumuna katkıda bulunur (Castendyk ve Eary, 2009). Ocak gölleri terkedilmiş veya halen faaliyette olan maden ocaklarında yüzey ve yeraltı suyuyla dolarak doğal çevreyi tehdit edebilmektedir (Miller vd., 1996; Huber vd., 2008; Gammons vd., 2009; Bargawa vd., 2019). Bu nedenle, yüzey ve yeraltı sularının fiziko-kimyasal özellikleri değişerek bazı parametrelerin kalite standardı değerlerine uymamasını sağlar. Ocak göllerinin hem potansiyel su kaynakları hem de potansiyel çevresel riskler olduğunu ve bu nedenle madencilik endüstrisi için önemli çevresel sorunlar ortaya çıkardığını belirtmektedir. Mevzuat ve düzenlemeler ile yerel halk tarafından istenen son kullanımlar gibi artan sosyal beklentiler, ocak gölleri için giderek daha yüksek Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) standartları gerektirmektedir (Müller vd., 2010). Bu nedenle, bir ocak gölünün nihai özelliklerinin belirlenmesi çevresel ve sosyal kaygılar açısından çok önemlidir. Az da olsa, ocak gölü, çeşitli kullanımlar için uygun potansiyele sahip olabilir. Uygun potansiyel yaratmak

için maden kapatma planlaması, arazi bozulması yönetimi, doğal peyzaj düzenlemesindeki değişikliklerin etkisi ve standart ve kullanım amaçlarına atıfta bulunulan su kalitesine uyum gibi bazı yönleri dikkate alınmalıdır (Naugle ve Atkinson, 1993; Nordstrom vd., 2015). Madencilik faaliyetinin sonlanma aşamasında, morfoloji, jeoloji, hidroloji, su kalitesi, dolum seviyesi ve biyoloji gibi daha ayrıntılı teknik çalışmalara ihtiyaç vardır (Braun, 2002; Soni vd., 2014). İklim değişikliklerinin hızla arttığı günümüzde ise su kalitesini yönetme çabaları bir zorunluluktur. Maden ocak gölünün su kalitesi, su kullanımına ve uyumluluğuna göre kullanılabiliriyorsa iyi olarak kategorize edilir. Su koşulları kalite standartlarına uygun olarak korunur ve ocak gölünden iyi bir akış suyu elde etmek için malzemeler veya parçacıklar veya diğer maddeler tarafından kirlenme önlenir ve daha sonra nihayetinde kullanılabilir (Bargawa vd., 2019). Maden ocağının terk edilmesi sonrasında ocak gölünde biriken suyunun kullanılması, madencilik faaliyetlerinin endüstriyel çıkarları veya çevredeki halkın ihtiyaçları dikkate alınarak yeniden değerlendirilmelidir (McCullough ve Schultze, 2018; McCullough vd., 2020). Bu çalışmada; Tekirdağ ili, Saray ilçesi, Edirköy Bölgesinde bulunan terk edilmiş maden ocağı ocak gölünün faaliyette olan açık kömür ocağına etkileri üzerinde durulmuştur.

MATERYAL VE METOD

Materyal

Tekirdağ ili, Saray ilçesi, Edirköy açık kömür ocağı yakınında (ocağına yaklaşık 20 m yatay mesafede) bulunan daha önce linyit üretimi yapılmış ve üretim işlemi bittikten sonra su ile dolmuş ocak gölü oluşmuştur (Şekil 1). Terk edilmiş sahaya ait ocak gölünün faaliyette bulunan ocağın üretim faaliyetleri açısından tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle eski ocak gölünde bulunan suyun ocağı faaliyette bulunan ocağı etkilemek bir bölgeye taşınması veya maden gölünün ocağına olan etkisinin incelenmiştir. Faaliyeti devam eden ocakta, ocak gölüne yatayda ve derinlikte ne kadar uzaklıkta güvende çalışılabileceğinin tespit edilmesi amacıyla kazı alanı iyileştirme metodları üzerinde durulmuştur.



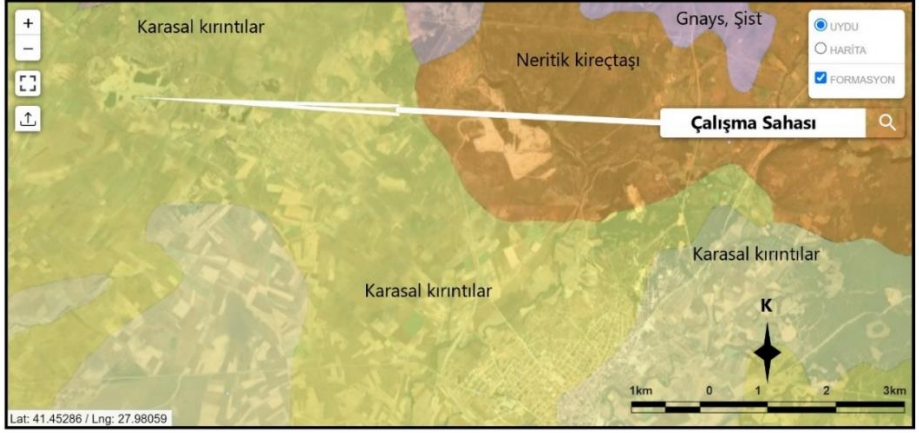
Şekil 1: Çalışma alanını gösterir Harita

Metot

Linyit üretimi yapılmış ve üretim işlemi bittikten sonra su ile dolmuş maden gölü faaliyeti devam etmekte olan açık maden işletmesi için emniyetli çalışma güvenliği açısından tehlike arz etmektedir. Öncelikle biriken su kütesinin kazı alanından uzaklaştırılması gerekmektedir. Yapılması gereken teknik işlemler olarak suyun başka bir alana drene edilmesi ya da sahaya dolgu yapılarak mevcut su hacminin azaltılması düşünülmüştür. Suyun drenajı sahanın morfolojik ve topoğrafik özelliklerinden dolayı kolay görülmemektedir. Ayrıca, başka bölgeye drene edilecek su çevre açısından olumsuzluklar oluşturabileceği göz önüne alınmıştır. Dolayısıyla, kazı alanına yakın güvenli dolgu yapılması en iyi yöntem olarak değerlendirilmiştir. Dolgu yapılarak zemin yüklendiğinde, yük başlangıçta gözeneklerdeki su tarafından taşınır (Terzaghi, 1943). Bu, aşırı gözenek suyu basıncında hızlı bir artışa neden olur. Daha sonra, bu basınçlar dağıldıkça bir konsolidasyon dönemi olur. İnce taneli malzemelerin konsolidasyon oranı, malzemenin tane boyutu tarafından belirlenen hidrolik iletkenliğin (geçirgenlik) bir fonksiyonudur; malzeme ne kadar ince olursa, aşırı gözenek suyu basıncının dağılması o kadar uzun sürer. Çok düşük hidrolik iletkenliğe sahip malzemelerin konsolide olması onlarca yıl alabilir. Wels ve diğerleri (2012), ek yükün üç katına çıkarılmasının, toplam çökme büyüklüğünü yalnızca yaklaşık %20 artırdığını ve konsolidasyon oranında ihmal edilebilir bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Dolgularda konsolidasyonunu hızlandırmanın tek uygulanabilir ve etkili yolu, fitil drenajları kullanarak drenaj yollarının uzunluğunu azaltmaktır. Bunlar, suyun dolgudan çıkmak için kat ettiği mesafeyi kısaltarak çalışır. Wels ve diğerleri (2012), çok ince, kil açısından zengin uranyum

atıklarında 4 m aralıklarla tam nüfuz eden fitil drenajları kullanmayı düşündüler. Modelleme, toplam çökmenin % 85'inin bir yıl içinde gerçekleştiğini öngördü; bu, konsolidasyonun toplam süresinde en azından bir büyüklük sırası kadar bir azalmayı temsil ediyordu. Gerçek fitil drenaj tasarımı (aralık ve derinlik), Rum Jungle atıklarının belirli malzeme özelliklerine dayanmalıdır. Son arazi şeklinin çökmesi, geri doldurma tamamlandıktan sonra zamanla meydana gelmesi muhtemeldir.

Jeolojik Özellikler: Tekirdağ ili, jeolojik olarak Trakya bölgesini doğudan batıya kat eden Ergene Nehri'nin hem kuzeyinde hem de güneyindeki birimleri kapsamaktadır. Genel olarak ilin kuzeydoğusunda Paleozoik yaşlı metamorfitler, güneybatısında ise Üst Kretase yaşlı Yeniköy karışığı yüzeylenmektedir. Bu temel kayalar üzerine Orta Eosen' den güümüze kadar benzer özellikler sunan çökel kayalar yüzeylenmektedir. Paleozoyik yaşlı birimler daha çok ilin kuzeyinde yer alıp, Istranca masifinin doğu kısmını oluştururlar. Permiyen-Triyas yaş aralığında oluşmuş bu birimler Saray ilçesi kuzeydoğusunda yüzeylenir (Şekil 2). Kömür oluşumu, Türkiye'nin kuzeydoğusundaki Türk Trakya Baseni'nin bir bölümüdür. Pre-Tersiyer kristal taban, Orta ve Geç Eosen'de basenin gelişmesinin erken aşamalarında fasiyes şablonu ve kalınlık dağılımı lokalizasyonuna neden olan platform ve derin basen birikme morfolojisi sergilemektedir (TKİ 2005). Kömür yatağı katmanları Oligosen'in sedimanter serilerinde bulunmaktadır. Bunlar delta tipi fasiyes olarak görünmektedir. Serinin üst tarafında, birçok düzeyde linyit oluşumu bulunmaktadır. Delta tipi fasiyes yüzünden, linyit damarlarının veya lenslerinin dağılımı değişkendir. Saray ilçesinin güneyindeki Çerkezköy ilçesi çevresinde MTA yürütülen önceki ve yeni sondaj sonuçlarına göre, 510 m derinliğe kadar Oligosen sekansta 17 linyit damarı görülmektedir. Sondaj raporlarının analizi ve sondaj kuyusu korelasyon sonuçları, Saray yöresindeki linyitlerin genişliğine yaygın damarlar değil, lensler biçiminde oluştuğunu göstermektedir (TKİ 2005; Başat 2007).



Şekil 2: Jeoloji Haritası (<http://yerbilimleri.mta.gov.tr>)

Hidrolojik Ve Hidrojeolik Özellikler: Ocak ve civarındaki mevsimsel yüzey suları ile yeraltı sularının kazı alanından tahliye edilmesi gerekmektedir. Bölgedeki mevsimsel yağışlarda dikkate alındığında yapılacak uygulamada geçici drenaj hendeği yapılması önerilmektedir. Bu amaçlarla; Bütün kazı alanı, yeraltı ve yüzey sularının ihtiyaçları karşılayacak şekilde tahliye edilebilmesi için, geçici bir drenaj sistemiyle desteklenmelidir. Şev kazısından sonra geri dolguya kadar ki zamanda dolgu üstünde oluşabilecek yağmur suyu, zemin suyu gibi kazıya ve dolguya zarar verecek etkenleri ortadan kaldırmak uzaklaştırmak için gerekli tüm tedbirler ve önlemler alınmalıdır. Kazı şevinin tabanına yapılacak olan 75 x 50 cm boyutlarındaki geçici drenaj hendeği yapılacaktır. Ayrıca; kazı yapılan alandaki açığa çıkan yeraltı suları ve kazı sahasına biriken yüzey sularının tahliye işlemi, derin kuyu pompaları veya kazı seviyesinde konuşlandırılmış portatif dalgıç pompalarla yapılması gerekmektedir.

Arazi Çalışmaları: Çalışma alanında; jeolojik, jeomorfolojik, hidrojeolojik, hidrolik, topoğrafik özellikleri hakkında incelemeler ve ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Ocağın bulunduğu sahadan ocağın ilerideki çalışma koşulları da dikkate alınarak teknik incelemeler yapılmıştır. Arazide yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda kritik noktalarda en az 2 m olarak açılan Araştırma Kuyularından (AK) örselenmiş ve örselenmemiş (UD) numuneler alınmıştır. Bunun yanında zemin koşulları izin verdiği ölçüde ince cidarlı numune alıcıları (sampler) ile örselenmemiş (UD) numuneler de alınmıştır. Litolojik yapı ve yeraltı suyu seviyesinin genel

durumu için olan bilgilerde sahada daha önce yapılan çalışmalardan faydalanılmıştır.



Şekil 3: Ocak ve civarının genel görünüşleri

Laboratuvar Çalışmaları: Bu çalışmada hem örselenmiş hem de örselenmemiş zemin örnekleri alınarak yürütülmüştür. Bu araştırma faaliyeti, literatür çalışması, yerinde zemin örnekleme, doğrudan saha testi ve laboratuvar testini içermektedir. Test örnekleri, **dolgu yapılan sahadan** alınmış ve her nokta arasında yaklaşık 200 metre mesafe bulunan 3 noktada gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testleri, toprağın fiziksel özelliklerinin test edilmesini ve doğrudan kesme testlerini içerir. Fiziksel özellik testleri, elek analizi, özgül ağırlık testi, nem içeriği, sıvı limiti ve plastik limiti içerir. Bu arada, mekanik özelliklerin test edilmesi, doğrudan kesme testi ve Dinamik Koni Penetrometresi (DCP) kullanılarak yapılan saha CBR testini içerir.

Fiziksel Özellikler: Zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, zemin test laboratuvarında bir dizi test yapılmasını gerektirir. Fiziksel özellik testi, elek analizi, özgül ağırlık, sıvı limiti, plastik limiti ve plastisite indeksini içerir. Elek analizi, toprağı her elek numarasından geçen toprak yüzdesine göre sınıflandırmak için gerçekleştirilmiştir. Tane boyutuna göre toprak

sınıflandırması, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) yöntemi kullanılarak gruplandırılmıştır. Likit limit, zeminin minimum su içeriğinin sıvı halden plastik hale geçme yüzdesidir. Bu test, ASTM yöntemi ile Cassagrande deney aletini kullanılarak tayin edilir. Plastik limit, toprağın su içeriğindeki plastik halden yarı katı hale geçiştir ve zeminin kuru ağırlığına göre su yüzdesine göre hesaplanır. Plastisite indeksi (PI), toprağın plastisitesini gösterir. Zeminin yüksek bir PI değeri varsa, toprağın çok sayıda kil tanesi içerdiği belirtilir. Zeminin silt gibi düşük bir PI değeri varsa, toprağın nem içeriğindeki hafif bir azalma toprağın kurumasına neden olabilir. Zemin sınıflandırılması işlemi Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS, ASTM D 2488) kullanılarak yapılmıştır. Bu sistemle zeminlere elek analizi ve kıvam limitleri sonuçlarına göre grup sembolü, grup sembolü belirlendikten sonra çakıl, kum, silt ve kil yüzdelere göre grup adı verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Araştırma kuyularına ait malzemelerin fiziksel özellikleri

Örnek No	Derinlik (m)	Wn (%)	γ_s (gr/cm ³)	C (gr/cm ³)	ϕ (°)	Kıvam Limitleri			Dane Boyu Dağılımı				Zemin Sınıfı
						LL (%)	PL (%)	PI (%)	Çakıl (%)	Kum (%)	Kil (%)	Silt (%)	
1	1.50	24	2.56	0.77	8	59	25	34	0	14	41	45	CH
2	1.20	29	2.56	0.75	10	56	21	35	0	11	49	40	CH
3	1.50	32	2.65	0.80	15	38	18	20	0	29	49	22	CL

Mekanik Özellikler: Zeminin mekanik özellikleri, konsolidasyon özellikleri, kesme dayanımı, basınç dayanımı ve çekme dayanımı dahil olmak üzere statik ve dinamik yükler altında zeminin kararlılığını ve performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Bu özellikler, zeminin fiziksel ve hidrolojik özelliklerini değiştirebilen ve mekanik davranışını etkileyebilen faktörlerdir. Mekanik özellikleri belirlemek amacı ile örselenmemiş numuneler üzerinde TS1900-2'e göre konsolidasyon deneyi yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Konsolidasyon deneyi numunelerine ait değerler

Örnek No	Derinlik	Zemin Sınıfı	Ring V (mm ²)	Wk	γ_s (gr/cm ³)	γ_n (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)	n	e_0	Sr (%)
1	1.50	CH	39.27	58.48	2.59	1.85	1.49	0.42	0.739	100
2	1.20	CH	39.27	59.67	2.63	1.89	1.51	0.42	0.730	100
3	1.50	CH	39.27	57.99	2.65	1.92	1.47	0.44	0.794	100

Ocağın gelecekte güvenli şekilde çalışması için önerilen dolgu alanının görseli Şekil 4 de, planlaması ise Şekil 5 de görülmektedir. Analizlerde kullanılan arazi modeli Şekil 6 da verilmiştir. Ayrıca, dolguda kullanılacak zeminlerden örselenmemiş (UD) deney numunesi alınmış, konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deney sonucu çizelge halinde verilmiştir (Tablo 3).

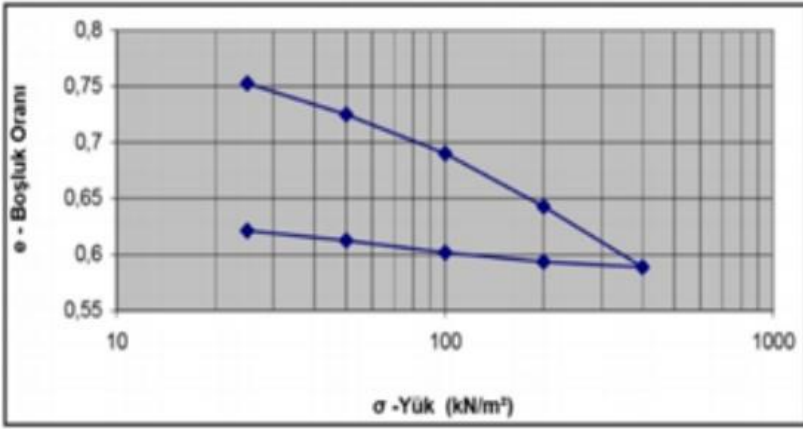
Tablo 3: Dolguda kullanılacak numuneye ait konsolidasyon deneyi hesaplama çizelgesi ve grafiği

Sondaj No		Y's (gr/cm ³)	2.65
Derinlik (m)		Y'n (gr/cm ³)	19.2
Numune		Y'd (gr/cm ³)	1.476713
Ring No		n (porozite)	0.44275
Ring R (cm)	5	Gs (Özgül Ağ)	2.65
Ring H (cm)	2	Wk (kuru ağırlık) (gr)	57.99
Ring W (cm)	71.71	e0 (baş. boş. or.)	0.794526
Ring A (cm ²)	19.63495	hs (tane yük) (mm)	11.14501

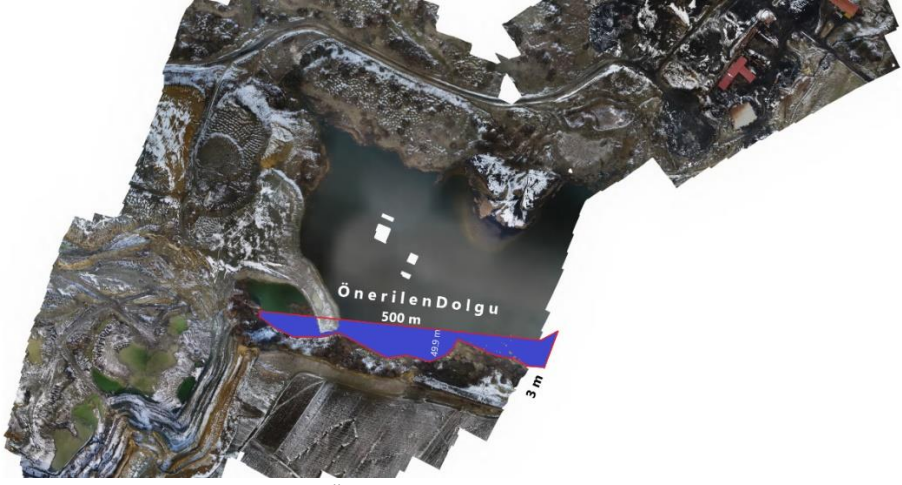
	Deney Başında	Deney Sonunda
Ring+Yaş N (g)	140.52	145.41
Ring+Kuru N (g)	129.7004	129.7004
Su Miktarı (g)	16.8196	15.7096
Su Muhtevası	0.29004111	0.270900011
Doy. Der. (sr) (%)	97	90

σ (kN/m ²)	Δ (mm)	H (mm)	Hv=h- hs	E=hv/ hs	Δe	$\Delta \sigma$ (kN/m ²)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)
0	0	20	8.8549 9	0.7945 3				
25	0.46 6	19.53 4	8.3889 9	0.7527 1	0.0418 1	25	0.0016 7	0.0093
50	0.31	19.22 4	8.0789 9	0.7249	0.0278 2	25	0.0011 1	0.0062
100	0.38 9	18.83 5	7.6899 9	0.6899 9	0.0349	50	0.0007	0.0003 9
200	0.52 5	18.31	7.1649 9	0.6428 9	0.0471 1	100	0.0004 7	0.0002 6

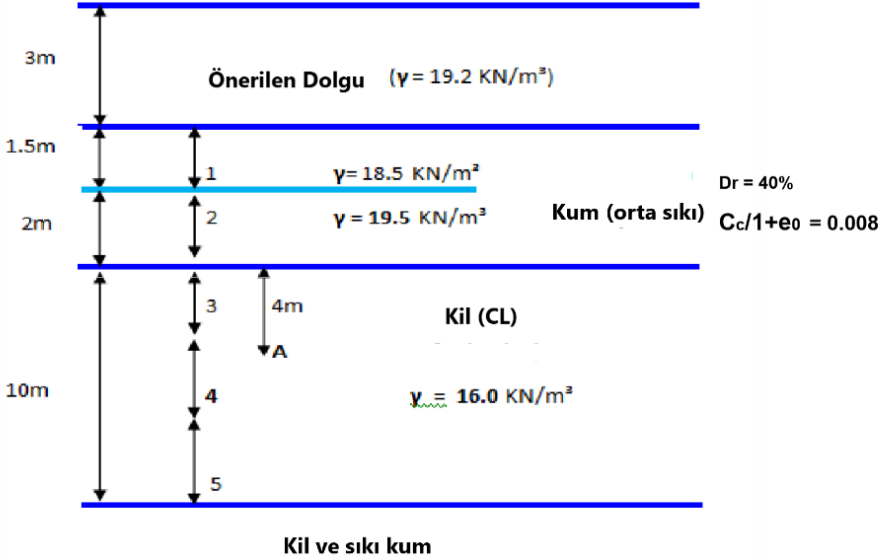
400	0.60 4	17.70 6	6.5609 9	0.5886 9	0.0541 9	200	0.0002 7	0.0001 5
200	0.05 4	17.76	6.6149 9	0.5935 4				
100	0.09	17.85	6.7049 9	0.6016 1				
50	0.12 2	17.97 2	6.8269 9	0.6125 6				
25	0.09 6	18.06 8	6.9229 9	0.6211 7				
0	0.27 7	18.34 5	7.1999 9	0.6460 3				



Şekil 4: Önerilen dolgu alanının görünümü



Şekil 5: Maden ocağı ve Önerilen Dolgunun Orta Photo Map gösterimi



Şekil 6: Analizlerde kullanılan arazi modeli

$$\sigma'_{zf} = \sigma'_{z0} + \gamma_{\text{fill}} \cdot H_{\text{fill}}$$

$$\sigma'_{zf} = \sigma'_{z0} + (19.2 \text{ kN/m}^3) \cdot (3.0 \text{ m})$$

$$\sigma'_{zf} = \sigma'_{z0} + 57.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{z0} = \Sigma \gamma H - U$$

$$\sigma'_{z0} = (18.5 \text{ kN/m}^3) (1.5 \text{ m}) + (19.5 \text{ kN/m}^3) (2.0 \text{ m}) + (16.0 \text{ kN/m}^3) (4.0 \text{ m}) - (9.8 \text{ kN/m}^3) (6.0 \text{ m})$$

$$\sigma'_{z0} = 72.0 \text{ kPa}$$

$\sigma_c \approx \sigma'_{z0}$ ise kil normal konsolide olmuş olur,

$$C_c / (1+e_0) = 0.40 / (1+1.10) = 0.190$$

Kumlu seviye için;

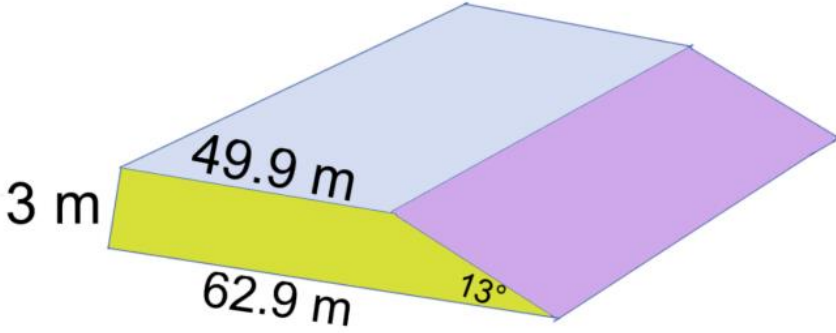
$C_c / (1+e_0) = 0.008$ (Dr değerine karşılık alınmıştır)

Tablo 4.Kritik A noktası için toplam oturma miktarı

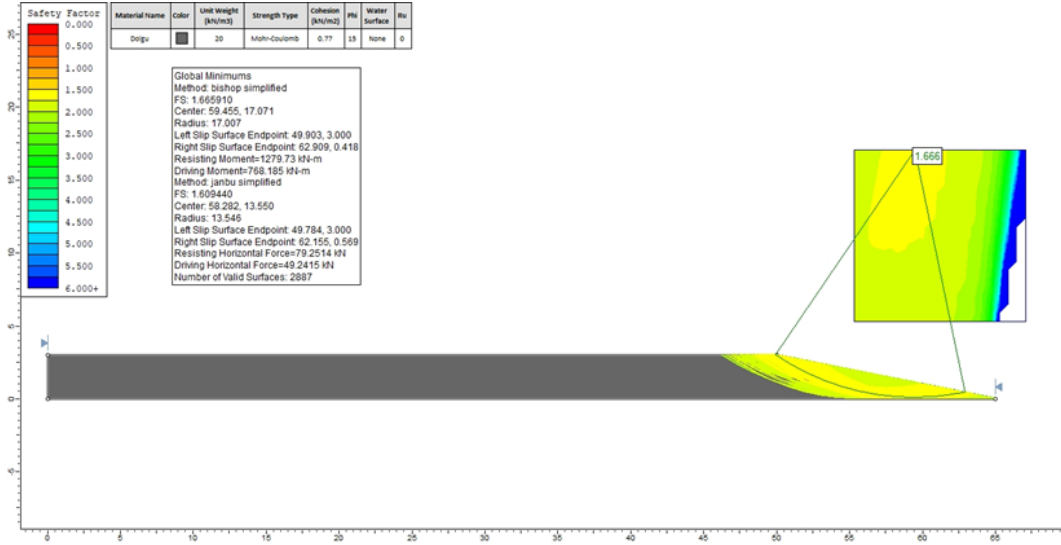
Seviye	H (m)	σ'_{z0} (kPa)	σ'_{zf} (kPa)	$C_c / (1+e_0)$	σ_c (mm)
1	1.5	13.9	71.5	0.008	8
2	2.0	37.4	95.0	0.008	6
3	3.0	56.4	114.0	0.190	174
4	3.0	75.0	132.6	0.190	141
5	4.0	96.7	154.3	0.190	154
				$\Sigma \delta_c$	483 mm

PLANLANAN DOLGUNUN BOYUTLANDIRILMASI VE STABİLİTE ANALİZİ

Sıkıştırılmış dolgu malzemesi, geri doldurma sırasında katmanlar halinde sıkıştırılan gevşek topraktır. Dolgu malzemesinin sıkıştırılmasının önemi, kayma mukavemetini artırmak, sıkıştırılabilirliğini azaltmak ve geçirgenliğini azaltmaktır. Dolgu malzemesi, geri doldurma sırasında malzemeyi etkili bir şekilde sıkıştırmanın farklı yollarına sahip iki toprak sınıflandırmasına göre kategorize edilebilir. İki sınıflandırma kohezyonlu toprak ve kohezyonsuz topraktır. Kohezyonlu toprak, ince dereceli, düşük mukavemetli ve kolayca deforme olan toprak türüdür. Bu malzemeler önemli kohezyon mukavemetine sahiptir ve plastisite gösterebilir. Kohezyonlu zemin, kil (ince taneli toprak) veya yüksek kil içeriğine sahip zemin anlamına gelir. Kohezyonlu zemin parçalanmaz, dikey yan eğimlerle kazılabilir ve nemliyen plastiktir. Kohezyonlu zemin kuru olduğunda parçalanması zordur ve su altında olduğunda önemli kohezyon gösterir. Kohezyonlu zeminler killi silt, kumlu kil, siltli kil, kil ve organik kil içerir. Kohezyonlu zeminler, malzemeyi sıkıştırmak ve bir arada kalıplamak için yüksek genlikli, yüksek darbe kuvvetleri gerektirir, bu nedenle tokmaklar veya sıkıştırma silindirleri gibi darbeleri aletler kullanılarak etkili bir şekilde sıkıştırılır. Faaliyeti devam eden açık işletmenin güvenli bir şekilde üretim yapabilmesi için 49.9 m X 62.9 m ölçülerindeki ve 3 m yüksekliğinde yapılacak dolguya göre, Slide (v.6.0) yazılımı (Rocscience Inc. 2010) kullanılarak stabilite analizi yapılmıştır. 13.0 ° lik açı ile hesaplanmış dolgu için güvenlik katsayısı 1.66 olarak tespit edilmiştir. Stabilite analiz sonuçları aşağıda verilmiştir (Şekil 7-8).



Şekil 7: Analizi yapılan dolgunun şematik görünümü



Şekil 8: Önerilen dolgu için stabilite analizi (Slide (v.6.0) Software Calculation)

Yukarıdaki sonuçlar özetlenirse görülüyor ki; lastik tekerlekli silindirler, ince daneli zeminleri, bilhassa uniform derecelenmiş kumları sıkıştırmak için en uygun olmaktadır. Bu tip silindirlerin kohezyonlu zeminlerde de kullanılması halinde en iyi sonuç, zeminin su muhtevası plastik limitin %2-4 altında olursa elde olmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıdaki ana başlıklar altında toplanmıştır;

A. Standartlar ve Mevzuata Uyum: Kazıdan elde edilen malzemenin yapılacak dolguya uygunluğu laboratuvar deneyleriyle araştırılmıştır ve gerekli mühendislik hesaplamaları yapılmıştır. Bu dolguda kullanılacak malzeme için, kullanılacak kompaksiyon ekipmanı, optimum su içeriği, geçiş sayısı ve sıkıştırma kontrol metodunun tayinini belirlemek üzere test dolgusu yapılmalıdır. En iyi sıkışma ancak zemin içinde yeterli miktarda su bulunması durumunda sağlanabilmektedir. Zeminin en iyi ve en kolay sıkışabileceği su içeriği optimum su içeriğidir. Ocakta yapılan kazı sonrası açığa çıkan malzeme aşağıdaki şekilde sınıflandırılacak olup, dolguda kullanılmayacak malzeme sahadan uzaklaştırılmalıdır. Dolgu kompaksiyonunda (sıkıştırma) kullanılacak ekipmanlar aşağıdaki Tablo 7 de verilmiştir. Dolgunun sıkıştırma işlemi için titreşimli silindirlerin dolu ağırlığı minimum 10 ton olmalıdır. Geçiş hızının sıkışmaya tesiri kesin olarak bilinmemekle birlikte araştırmalar göstermiştir ki sıkıştırmada ekonomik bir hız aralığı (5-13 km/h) vardır. Yapılan araştırma sonuçlarına göre hızın artması ile belli bir sıklığa erişebilmek için gerekli geçiş sayısı da artmaktadır.

Tablo 7: Dolgu kompaksiyonunda (sıkıştırma) kullanılacak ekipmanlar

Kompaksiyon Ekipmanı	Kum ve Killi Zeminler	Kohezyonlu Zemin (Kil)	Açıklama
Tokmak (Rammer)	Saha testi ile belirlenmeli	Önerilir	Dar ve sınırlı alanlarda kullanım
İleri Hareketli kompaktör	Saha testi ile belirlenmeli	Önerilmez	
İleri Geri Hareketli kompaktör	Önerilir	Önerilir	
Keçi ayağı Silindir (Sheep's-Foot Roller)	Önerilir	Önerilir	Duvar ve engellere yakın sıkıştırmada
Silindirli Vibratör (Vibrating Drum Rollers)	Önerilir	Saha Testi İle Belirlenmeli	

B. Yüzey ve Yeraltı Sularının Drenajı: Yapılacak uygulamada geçici drenaj sistemi yapılması önerilmektedir.

-Şev kazısından sonra geri dolguya kadar ki zamanda dolgu alanı ve dolgu üstünde oluşabilecek yağmur suyu, zemin suyu gibi imalata zara verecek etkenleri ortadan kaldırmak uzaklaştırmak için gerekli tüm tedbirler ve önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, kazı şevinin tabanına yapılacak olan 75 x 50 cm boyutlarındaki geçici drenaj hendeği yapılmalıdır.

-Kazı yapılan alanda ki açığa çıkan yeraltı suları ve kazı sahasına biriken yüzey sularının tahliye işlemi amacına uygun pompalarla yapılmalıdır.

C. Kazı (Hafriyat) Çalışmaları: Kazı alanındaki topoğrafyanın şekline ve kazı şevinin yüksekliğine göre şev üst kenarından uygun olan çalışma pay mesafeleri dahil edilmiş olarak kazı planı oluşturulmalıdır.

-Kazı işleminde zeminin toprak yapısına göre şev açımı gerektiği gibi belirlenecektir. Belirlenecek şev açısı 70° den az olmamalıdır.

-Kazı şevlerinde zeminin gevşekliği sebebiyle tehlike arz ediyorsa kenarda-yatayda 1.00 m ölçüsünde payeler oluşturulmalıdır.

D. Dolgu Yapım Çalışmaları: Dolgu malzemesi dökümü esnasında dozer veya greyderle yayılacak ve silindirle sıkıştırılma işlemi yapılacaktır. 49.9 x 62.9 m ölçülerindeki ve 3 m yüksekliğinde yapılacak olan dolguda toplam 86250 m³ malzeme kullanılacaktır. Bu boyutlardaki dolgunun stabilitesinin sağlanabilmesi için gerekli güvenlik sayısı 1.66 olarak hesaplanmıştır. Manüel sıkıştırma yöntemlerinin kullanılması durumunda ise dolgu tabakasının kalınlığı sıkıştırma işlemini olumsuz etkilemeyecektir.

-Sıkıştırma işlemlerinin uygun şekilde yapılabilmesi için dolgu malzemesinin optimum nemi belirlenen sınırlar içinde olmalıdır.

-Dolgu malzemesi yardımcı tesislere ve yapılara zarar verilmeyecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Dolgu malzemesinde en az 85% lik bir sıkışma sağlanmalıdır.

-Kazı şevinin tabanına yapılacak olan 75 x 50 cm boyutlarındaki drenaj hendeğinin dolgudan zarar görmesi engellenmelidir.

-Dolgu malzemesinin malzeme kaynağı değişirse standartlar ve yürürlükte olan resmi mevzuata uygun olarak yapılmasını öngörülmektedir.

E. Saha Kalite Kontrol: Dolgu yapım aşamasında teknik kontroller sürekli yapılmalı ve gerekli iş güvenliği önlemleri alınmalıdır. Sahada gerçekleştirilen incelemeler neticesinde ve yapılan deneylerden elde edilen verilere göre yapılması gerekenler belirlenmiştir.

REFERANSLAR

- ASTM D 422., Standard test method for particle- size analysis of soils.
- ASTM D 698., Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort.
- ASTM D 1140., Standard test methods for the amount of material in soils finer than No. 200 sieve (75- μ m)
- ASTM D 1557., Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.
- ASTM D 2487., Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System-USCS).
- ASTM D 4318., Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- Bargawa, W.S., Suchahyo, A.P.A., Andiani, H.F., (2019). Design of coal mine drainage system. E3S Web of Conferences 76:1-6, doi:10.1051/e3sconf/20197604006.
- Başat Electrical Producing Inc-Co. Türkiye., (2007). Tekirdağ İli, Saray İlçesi, (Edirköy – Küçükyoncalı Safaalan) Sektörleri Linyit Madeni İşletmesi ve Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi Mevcut Ön-Fizibilite Raporu, 73 s.
- Braun , T., (2002). Introduction to Pit Lakes in the Southwest, SRK Consulting, Southwest Hydrology.
- BS EN ISO 17892-12 (2018) Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil. Determination of liquid and plastic limits.
- Castendyk, D.N., Eary, L.E., (2009). Mine Pit Lakes: Characteristics, Predictive Modeling, and Sustainability (p. 304). Littleton, CO: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Gammons, C.H., Harris, L.N., Castro, J.M., Cott, P.A., and Hanna, B.W., (2009). Creating lakes from open pit mines: Processes and considerations - with emphasis on northern environments. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2826. https://digitalcommons.mtech.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=geol_engr
- <http://yerbilimleri.mta.gov.tr>
- Huber, A., Ivey, G.N., Wake, G., Oldham, C.E., (2008). Near-Surface Wind-Induced Mixing in a Mine Lake, Journal of Hydraulic Engineering, 134, 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10\(1464\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1464))
- Lima, A.T., Mitchell, K., O'Connell, D.W., Verhoeven, J. and Van Cappellen, P., (2016). The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. Environmental Science and Policy, 66:227-233, doi:10.1016/j.envsci.2016.07.011.

- McCullough, C.D. and Schultze, M. (2018). Engineered river flow-through to improve mine pit lake and river values. *Science of the Total Environment*, 640-641, 217-213. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.279.
- McCullough, C.D., Schultze, M. and Vandenberg, J., (2020). Realizing beneficial end uses from abandoned pit lakes. *Minerals* 10(2), 1-21. doi:10.3390/min10020133.
- Miller, G.E., Lyons, W.B., Davis, A., (1996). Understanding the water quality of pit lakes. *Environmental Science and Technology*, 30, 118A-123A.
- Müller, M., Eulitz, K., (2010). Characterizing Water Quality of Pit Lake through Modeling. In: Wolkersdorfer, Ch. & Freund, A., *Mine Water & Innovative Thinking*, p. 375 – 379; Sydney, Nova Scotia (CBU Press).
- Naugle, G.D., Atkinson, C.L., (1993). Estimating the rate of post-mining filling of pit lakes. *Mining Engineering*, 45(4), 402-404.
- Nordstrom, D.K., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J., (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16. doi:10.1016/j.apgeochem.2015.02.008.
- ROCSCIENCE INC., (2010). Slideversion 6.0-2D limit equilibrium slope stability analysis. Toronto, Ontario, Canada. www.rocscience.com
- Setiawan, A.A., Budianta, D., Suheryanto, S. and Priadi, D.P., (2018). Review: pollution due to coal mining activity and its impact on environment. *Sriwijaya Journal of Environment*, 3(1), 1-5. doi:10.22135/sje.2018.3.1.1-5.
- Soni, A., Mishra, B. and Singh, S., (2014). Pit lakes as an end use of mining: A review. *Journal of Mining and Environment*. <https://doi.org/10.22044/jme.2014.326>
- Terzaghi, K., (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172766>
- TKİ (Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü), (2005). *Tekirdağ-Saray Linyit Sahası Değerlendirme Raporu, Etüt Proje Dairesi Başkanlığı, Mart 2005, Ankara*, 17 s.
- TS 1500., (2014). *İnşaat Mühendisliğinde zeminlerin-sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, 16 s.
- TS 1900-1., 2006. *İnşaat Mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri bölüm 1: fiziksel özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü*, 93s.
- TS 1900-2., (2006). *İnşaat Mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri bölüm 2: mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü*, 63s.
- Wels, C., Mackie, D., Scibek, J., (2012). *Guidelines for Groundwater Modeling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia Ministry of Environment Water Protection & Sustainability Branch, Report No: 194001*.

Isıtma Sezonu ve Sezondaki Her Ay İçin Saatlik Serbest Isıtma Derece Saat Değerlerinin Şanlıurfa İçin Araştırılması

Erdem YAŞAR¹
Mustafa ERTÜRK²
Ömer SEÇGİN³

- 1- Makina Yüksek Mühendisi.; Sakarya Alfa Mühendislik.
erdemyasar@ucalfa.com, ORCID No: 0009-0004-4202-0429
- 2- Prof. Dr. Mustafa ERTÜRK; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina
Mühendisliği Bölümü. mustafaerturk@subu.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-0517-6940
- 3- Doç. Dr. Ömer SEÇGİN; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina
Mühendisliği Bölümü. omersecgin@subu.edu.tr, ORCID No:

ÖZET

Bina dış kabuğundaki ısı kaybı hesaplamalarında genelde fosil türü yakıtlar dikkate alınmaktadır. Bu durum, yakın gelecekte fosil yakıtlarda hem rezerv problemi yaşanmasına hemde sürekli olarak artan küresel ısınma hızının artmasına neden olacaktır. Dünya milletleri fosil türü yakıt yerine alternatif kaynaklara yönelmeyi ve sürdürülebilir enerji konularında önemli çalışmalar yapmaktadır. Bu konuda Türkiye yeni yapılan binalarda ısı yalıtımını zorunlu hale getiren TS 825 yönetmeliğini çıkarmıştır. Bu yönetmelikle bina dış kabuğunun yalıtılması ve pencerelerde çift cam uygulaması ısı kayıplarını en az 40 oranında azaltmıştır. Kış aylarında dış ortam sıcaklığı (DOS), iç ortam referans sıcaklığı(İORS) üzerinde olmasına rağmen mahallerin ısıtılma ihtiyacı olabilmektedir. Bu enerji ihtiyacının hepsini yada belirli bir bölümünün temini için serbest ısıtma sistemleri kullanılabilir. Bu sistemde DOS, İORS (20°C) üzerinde görülme zamanlarında ısıtma sistemleri dış havadan temin edilen taze havayı ön ısıtma ve son ısıtma serpantinlerini bypass edip direkt mahal içerine gönderip mahalın enerji ihtiyacı temin edilmektedir. Serbest ısıtma sistemlerinin projelendirilmesi için Serbest Isıtma Derece Saat Değeri(SIDS) hesaplanması gereklidir. Bu hesaplamalar için ısıtma sezonundaki her ayın 24 saatlik DOS meteorolojik veri seti kullanılmıştır. Bu meteorolojik veri setiyle visual basic tabanlı yazılan beş farklı yazılımla araştırmalar yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; Şanlıurfa'nın ısıtma periyodundaki tüm ayların ve sezonluk Isıtma Derece Saat Değerleri (IDSD)ve SIDSD araştırılmıştır. Şanlıurfa için; en büyük mevsimlik SIDSD 1247,2 saat 13-14'te olacağı, aylık bazda en büyük SIDSD ısıtma nisan ayında saat 14-15'te olacağı, mevsimlik SIDSD'nin 12456,2 olacağı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şanlıurfa, dış hava sıcaklığı, ısıtma derece saat, serbest ısıtma derece saat, enerji tasarrufu

1. GİRİŞ

Küresel bazda, teknolojiadaki ilerlemeler, sürekli artış eğiliminde olan dünya insan sayısı enerji gereksinimini artırmaktadır. Bu enerji ihtiyacı da ağırlıklı olarak fosil türü yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yeniden oluşması küresel enerji ihtiyacı hızının çok gerisinde olmasından dolayı dünya çok yakın zamanda enerji ihtiyaçlarını karşılamayacak duruma gelecektir. Fosil türü yakıtların yanması sonucunda atmosfere salınan baca gazları dünyanın küresel ısınma hızını da artırmaktadır. Dünya milletleri, artan enerji talebinin bir kısmını karşılamada alternatif enerji kaynaklarını devreye almaya başlamışlardır. Alternatif enerji kaynaklarının devreye alınmasıyla dünya enerji ihtiyacının tamamının karşılanamayacağı bir

gerçekdir. Bu enerji ihtiyaçlarının sürdürülebilirliği için, minimum fosil türü yakıt harcayan hibrit sistemler tercih edilmelidir.

Bina ısıtma yükleri günün belirli saatlerinde kısmen veya tamamen fosil türü yakıt kullanmadan Serbest Isıtma Sistemi (SIS) ile karşılanabilmektedir. Bir yapının serbest ısıtma kapasitesi, DOS, İORS, bina dış kabuğundaki bileşenlerin ısı iletim, toplam ısı transfer katsayılarına bağlıdır. Yapıların ısı performansı, dış duvarların termofiziksel niteliklerine bağlıdır. Bu özellik nedeniyle, dış duvar bileşenleri ve bu bileşenlerin termofiziksel özelliklerine göre hesaplamalar yapılmaktadır [1-7]. SIS'lerinde DOS'nın, iç ortam sıcaklığı ve/veya entalpisinde veya ortam sıcaklığı ve/veya entalpisinden büyük olduğu saatlerde direkt dış ortam havası iç ortama transfer edilerek mahalin ısıtma yükü karşılanır [8,9,10]. SIS'de doğrudan dış havanın direkt iç ortama gönderilmesi iç hava kalitesinde artırmaktadır [11]. Sadece SIDS, 24 saatlik ısıtma yüklerini karşılamayacaktır. Bu sistemler ısıtma sistemlerine destek amacıyla planlanabilir[12]. Erdem Türkiye'deki 15 büyükşehir için SIDS'de ilgili ayrıntılı çalışmaları ortaya koymuştur vardır [13,14].

BÖLÜM 2. MATERYAL VE METOD

İnsanların yaşadığı konutlarda, resmi dairelerde, sağlık binalarında, alışveriş merkezlerinde konfor şartları (havanın nemi, sıcaklığı, hızı, kalitesi vb)bu binalarda vaktini geçiren insanların sağlığı ve verimliliği bakımından önemlidir. Konfor şartları ısıtma, soğutma sistemleri, iklimlendirme sistemleriyle yerine getirilmektedir. Derece zaman ısıtma, soğutma yükleri tahmin edilmektedir. Ayrıca ülke, il, ilçe bazında ısıtma amaçlı kullanılacak yakıt miktarı tahmininde, doğalgaz boru çaplarının hesaplanmasında, optimum dış duvar yalıtım kalınlığı hesaplamalarında, tarımda kullanılmaktadır[15-20].

2.1 Derece-zaman yöntemlerinin açıklanması

Literatürde Derece Zaman hesaplamaları için birbirinden farklı üç yöntem (derece saat, derece bin, derece gün) bulunmaktadır[18]. Bu çalışma için daha hassas sonuçlar veren derece saat (DS)yöntemi kullanılmıştır.

2.1.1 Derece saat yöntemi

Bu hesaplama yönteminde denge noktasına göre DS değerleri hesaplanmaktadır. Denge noktası sıcaklığı, binanın soğutmaya ve ısıtmaya gerek olmayan DOS'dır. Bu değer yalıtımı olmayan binalarda 18°C alınarak IDS Denklem.1'le hesaplanabilir[20].

$$IDS = (1 \text{ saat}) \sum_{\text{saatler}} (T_{\text{ios}} - T_{\text{dhs}})^+ \quad (1)$$

Denklem 1'deki + işareti yalnız pozitif değerler ile hesaplama yapılacağını ifade etmektedir. IDS değerleri gözönüne alınarak, yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı(Q_1), kWh olarak denklem 2 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$Q_1 = \frac{K_{top}}{\eta} IDS \left(\frac{1}{1000} \right) \quad (2)$$

Eşitlik 2'de, toplam ısı transfer katsayısı K_{top} [W/°C], ısıtma sistemi verimi η , olarak verilmiştir.

2.3 Isıtma periyodundaki aylık ve sezonluk bazda IDS hesaplama aşamaları

IDS değeri hesaplamaları iki aşamada olmaktadır. Birinci aşamada yıllık 8760 saat içerisinde DOS'nın görülme sıklıkları bulunmaktadır. İkinci aşamada ise DOS dağılımları yazılıma aktarılarak 24 saatlik IDS değerleri hesaplanmaktadır.

2.3.1 Dış hava sıcaklık dağılımlarının bulunması

IDS hesaplamaları için son 10 yıla ait 24 saatlik veri seti en önemli parametrelerdir. Bu veri seti işlenerek yıllık 8760 saat içerisinde DOS görülme sıklıkları yılın 12 ayı için ve mevsimlik 24 saatlik görülme sıklıkları visual basic temelinde yazılan bilgisayar programıyla analiz edilmiştir. Analiz değerlendirmesinde maksimum, minimum sıcaklık ve bu iki sıcaklık için yıllık (8760 saat içerisinde) oransal olarak tespit edilmiştir. 1°C aralıklarla yılın 12 ayı temelinde, yıllık dış hava sıcaklık dağılımı Tablo 1'de saat 12:00-13:00 için verilmiştir. Tablo 1'deki çalışma günün 23 saati içinde yapılmış olup çalışma metnini artırmamak için diğer 23 tablo metin içerisine konulmamıştır. Bu tablonun 1. sütununda 1°C aralıkla DHS'ları, ay sütunlarında sıcaklıkların oransal olarak adeti 1 °C aralıkla, son sütunda yıllık ortalama dış hava sıcaklık dağılımı (YODHSD) verilmiştir.

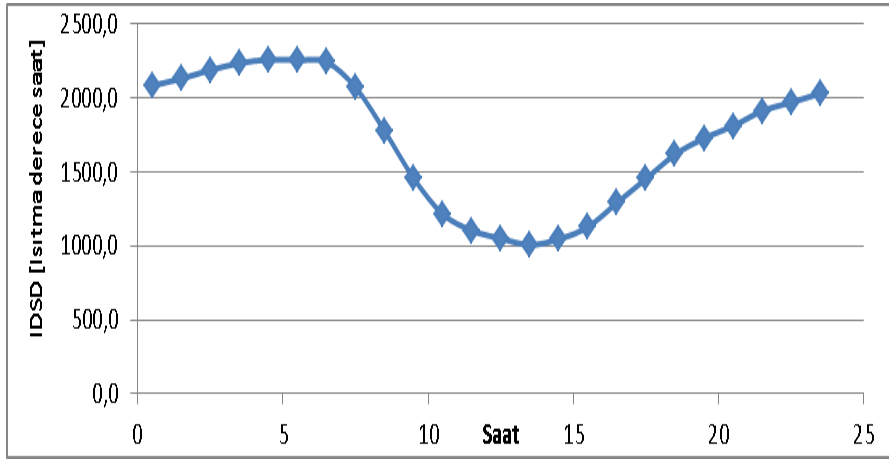
Tablo.1 Şanlıurfa saat 12:00- 13:00 yıllık ortalama dış hava sıcaklığı görülme sıklığı

ŞANLIURFA SAAT 12 00-13 00													
DHS (°C)	AYLIK VE YILLIK ORTALAMA DIŞ HAVA SICAKLIK DAĞILIMI (% ADET)												Y ODHSD (% ADET)
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	
-4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,5	0	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,014167
-2,5	0	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,014167
-1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,008333
-0,5	0,16	0,26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,19	0,050833
0,5	0,65	0,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,68	0,175833
1,5	1,06	1,72	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,88	0,325833
2,5	1,31	1,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,46	0,324167
3,5	2,78	1,98	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,19	1,36	0,5675
4,5	3,76	2,41	0,17	0	0	0	0	0	0	0	0,09	1,95	0,698333
5,5	4,5	3,02	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0,65	3,41	1,0275
6,5	8,26	4,4	1,32	0,08	0	0	0	0	0	0	0,28	4,97	1,609167
7,5	8,59	5,34	0,99	0,08	0	0	0	0	0	0	1,31	7,02	1,944167
8,5	9,08	4,91	3,48	0,25	0	0	0	0	0	0	1,59	9,16	2,3725
9,5	9,16	6,12	4,22	0,25	0	0	0	0	0	0	2,43	9,84	2,668333
10,5	9,24	9,14	4,22	0,93	0	0	0	0	0	0,09	3,08	9,26	2,996667
11,5	7,28	6,81	5,13	1,1	0	0	0	0	0	0,09	3,64	9,65	2,808333
12,5	5,15	6,64	4,64	1,35	0,09	0	0	0	0	0,09	4,95	9,75	2,721667
13,5	5,15	5,78	4,72	1,78	0,26	0	0	0	0	0,45	5,05	7,7	2,574167
14,5	2,7	5,26	8,11	2,2	0,26	0	0	0	0	1,07	5,7	6,14	2,62
15,5	1,55	4,4	7,78	3,47	0,68	0	0	0	0	0,98	6,17	5,26	2,524167
16,5	0,41	2,93	7,37	5,07	0,94	0	0	0	0	1,61	5,98	2,83	2,269167
17,5	0,25	2,07	5,63	5,24	0,68	0	0	0	0	1,52	7,2	2,14	2,060833
18,5	0	1,47	5,46	5,58	1,62	0	0	0	0	2,42	7,76	1,46	2,1625
19,5	0,08	0,6	5,46	7,52	1,36	0	0	0	0	2,59	5,05	0,68	1,945
20,5	4,66	0,26	4,14	8,54	2,89	0	0	0	0,09	3,67	6,82	0,19	2,605
21,5	4,25	0,17	2,81	6,26	2,64	0	0	0	0,09	4,56	5,98	0,49	2,278333
22,5	5,23	5,69	2,32	5,92	4,59	0	0	0	0,19	5,72	5,7	0,1	2,955
23,5	4,74	5,78	1,57	4,9	4	0	0	0	0,28	4,29	4,49	1,56	2,649167
24,5	0	6,98	0,91	5,16	7,31	0	0	0	0,75	5,81	2,34	0,97	2,549167
25,5	0	3,71	0,17	4,14	5,7	0	0	0	0,93	6,08	1,5	0,58	1,9825
26,5	0	0	0,17	3,63	6,12	0	0	0	1,21	7,25	0,93	0,19	1,744167
27,5	0	0	5,46	2,54	7,06	0	0,08	0	2,61	8,59	0,56	0	2,57
28,5	0	0	5,55	1,86	6,29	0	0,17	0,1	3,36	7,51	0,19	0	2,324167
29,5	0	0	6,71	1,35	6,21	0	0,51	0,5	4,76	6,71	4,02	0	2,974167
30,5	0	0	0	0,85	7,31	0	1,18	1,09	9,71	5,64	2,99	0	2,994167
31,5	0	0	0	0,68	6,8	0	2,2	1,99	9,34	5,1	2,62	0	3,125
32,5	0	0	0	0,42	4,34	0	2,28	3,78	10,55	3,85	0,65	0	2,894167
33,5	0	0	0	5,66	3,06	0	3,89	6,17	12,23	1,7	0	0	3,546667
34,5	0	0	0	6,85	1,87	0	6,93	8,96	12,32	1,07	0	0	3,995
35,5	0	0	0	3,63	0,94	0	9,04	12,74	8,22	0,27	0	0	3,59
36,5	0	0	0	2,7	0,68	0	10,65	15,72	5,98	0,09	0	0	3,634167
37,5	0	0	0	0	0,51	0	13,52	14,93	4,01	0,09	0	0	3,060833
38,5	0	0	0	0	0,09	0	11,5	10,75	1,59	7,25	0	0	2,926667
39,5	0	0	0	0	0,09	0	8,2	9,35	0,75	3,85	0	0	1,995
40,5	0	0	0	0	6,89	0	6,51	6,47	0,65	0	0	0	1,7625
41,5	0	0	0	0	3,66	0	3,72	3,78	3,83	0	0	0	1,271667
42,5	0	0	0	0	2,72	0	2,37	1,79	4,11	0	0	0	0,923333
43,5	0	0	0	0	2,38	0	0,51	0,6	1,77	0	0	0	0,445833
44,5	0	0	0	0	0	0	0,42	0,6	0,65	0	0	0	0,743333
45,5	0	0	0	0	0	0	0,08	0,5	0	0	0	0	0,369167
46,5	0	0	0	0	0	0	0,08	0,1	0	0	0	0	0,253333
47,5	0	0	0	0	0	0	7,35	0,1	0	0	0	0	0,620833
48,5	0	0	0	0	0	0	3,47	0	0	0	0	0	0,289167
49,5	0	0	0	0	0	0	3,72	0	0	0	0	0	0,31
50,5	0	0	0	0	0	0	1,61	0	0	0	0	0	0,134167
51,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.3.2 Şanlıurfa 24 saatlik IDS değerlerinin bulunması

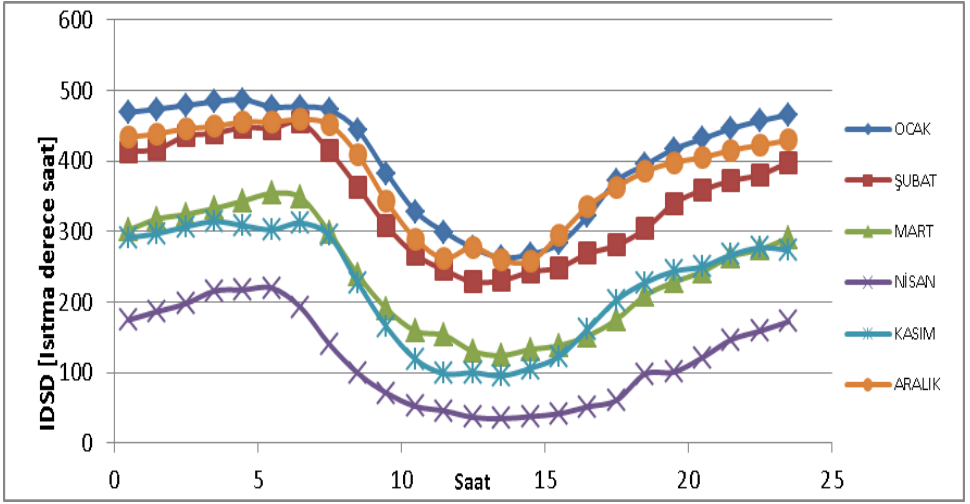
Şanlıurfa saat 12-13 için Tablo 1'deki ve diğer 23 saat içindeki görülme sıklıkları 2 yazılıma aktarılmıştır. Yalıtımsız binalarda DOS 18 °C ve ve daha düşük DOS'da ısınma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. İkinci visual basic tabanlı yazılımla, DOS'nın 18° C ve altındaki sıcaklıklarının görülme sıklıklarını dikkate alarak Şanlıurfa için, sezondaki tüm ayların 24 saatlik IDSD ayrı ayrı hesaplanmıştır. 24 saatlik yazılım sonuçları Şekil 1,2 ve Tablo 2'de görülmektedir.

Şekil 1'de kış dönemi en yüksek ısıtma enerji ihtiyacı saat 04 – 05'te 2258,5 IDS, en düşük ısıtma enerji gereksiniminde 1007,1 IDS, saat 13-14:00'de olduğu görülmektedir.



Şekil.Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı. Şanlıurfa sezonluk IDSD.

Şanlıurfa ısıtma dönemindeki her ayın IDS değerleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil.2 Şanlıurfa Aylık Bazda IDSD.

Şanlıurfa'nın ısıtma periyodundaki her ayın ve kış dönemi 24 saatlik IDSD'leri Tablo2'de verilmiştir. Bu tabloda Şanlıurfa ısıtma periyodundaki tüm ayların, kış periyodu IDSD'leri ortaya konulmuştur.

Tablo.2 Şanlıurfa IDSD

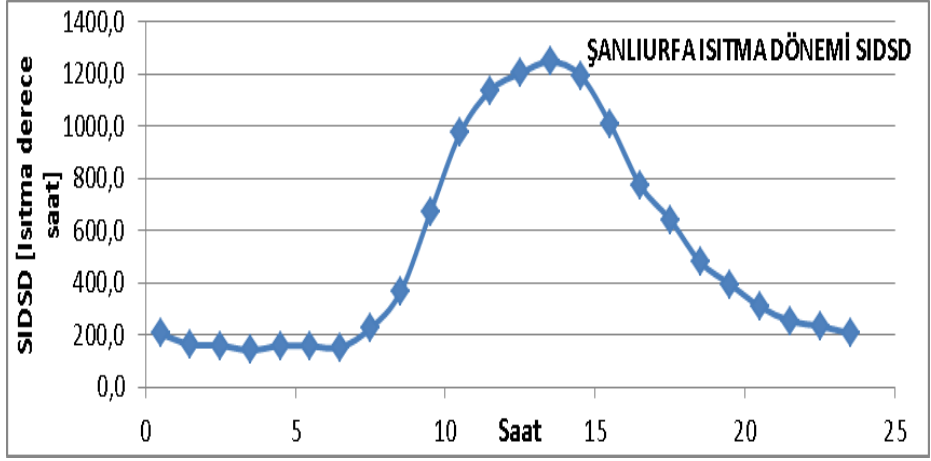
GÜNÜN 24 SAATI	20 °C İORS İÇİN ŞANLI URFAISITMA PERİYODU AYLARI İÇİN SIDSD [Derece-Saat]						SIDSD [Derece-Saat]
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Kasım	Aralık	Toplam
00:01	468,8	413,1	302	174,6	291,4	433,9	2083,7
01:02	473,5	416,7	317,7	186,5	297	438,4	2129,7
02:03	478,7	435,3	324,2	197,7	306,8	445,8	2188,3
03:04	484	439,2	332,7	215,7	314,1	448,9	2234,5
04:05	486,8	447,5	343,3	217,3	308,3	455,4	2258,5
05:06	476,7	446,5	354	219,9	302,6	455	2254,5
06:07	476,7	454,6	347,9	192,5	312	459	2242,6
07:08	472,2	414,3	298,9	140,3	293,8	451,5	2071
08:09	443,1	362,5	238	98,9	226,9	408,3	1777,7
09:10	382,7	307,5	190,2	70,8	164,3	342,2	1457,7
10:11	328,4	267,1	159	52,2	118,9	289,6	1215,3
11:12	299,5	245,7	152,7	45,8	98,6	262	1104,3
12:13	276,8	228,6	130,4	36,6	99,8	277,5	1049,8
13:14	262,8	230,5	124,3	34,7	95,5	259,2	1007,1
14:15	267,7	242,8	132,9	37,8	106	257,9	1044,9
15:16	282,4	248,7	138,2	41,8	122,8	294,4	1128,4
16:17	321,7	268,6	152	51,6	161,6	335,2	1290,8
17:18	371,5	280,3	175,1	60,7	202,6	363,2	1453,5
18:19	394,4	303,6	209,2	98	227,5	385,1	1617,7
19:20	416,7	339,7	228,1	100,8	243,6	397,9	1726,8
20:21	431,4	358,7	243,3	121,4	250,1	404,9	1809,8
21:22	446	372	264,6	146,7	267	415,3	1911,5
22:23	456,7	380,4	274,5	158,8	276,7	422,4	1969,6
23:24	465,5	398,1	291,1	172,2	274	429,2	2030,2
Toplam IDSD [Derece-Saat]	9664,5	8302	5724,3	2873,3	5361,8	9132,1	41058,1

3. ŞANLI URFA SERBEST ISITMA DERECE SAAT DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI

Serbest ısıtma sistemlerinde, DOS 20°C üzerinde olduğunda dış havadan transfer edilen taze hava ısıtma sistemlerini bypass ederek mahale taşınmaktadır. Şanlıurfa için yapılan çalışmada, ısıtma periyodundaki tüm ayların ve mevsimlik ısıtma yüklerini karşılayacak saatlik bazda SIDSD araştırılmıştır.

SIDSD hesaplamaları için 20°C üzerinde DOS görülme sıklıklarının belirlenmesi en önemli aşamadır. Tablo 1'deki DOS görülme sıklıkları 3 yazılıma transfer edilerek 24 saatlik Şanlıurfa serbest ısıtma DHS görülme sıklıkları bulunmuştur. Bu görülme sıklıkları visual basic tabanlı 4 yazılıma transfer edilip ısıtma periyodunun tüm ayları için ve sezonluk SIDSD hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Şekil 3,4 ve Tablo 3'te verilmiştir.

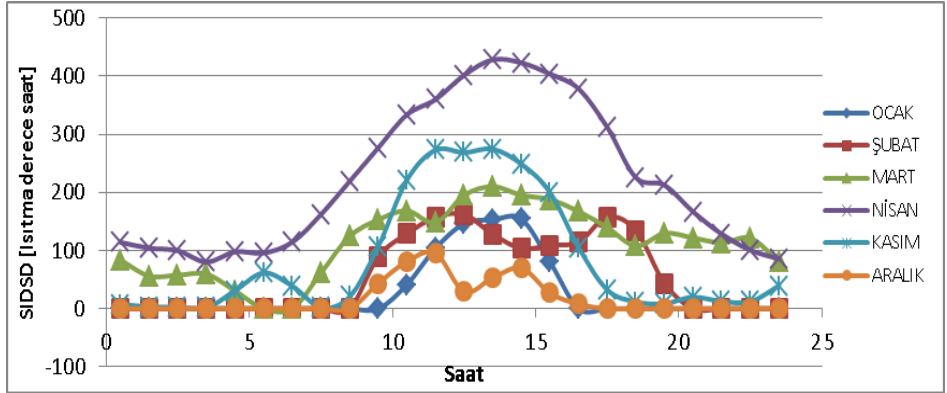
Şekil 3'te Şanlıurfa ısıtma sezonu SIDSD dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.3 Şanlıurfa Isıtma Dönemi SIDSD.

Bu şekilde en büyük SIDSD Saat 13-14'te e 1247,2 IDS olduğu görülmektedir.

Şanlıurfa ısıtma dönemindeki tüm ayların SIDSD Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil. 4 Şanlıurfa Isıtma Sezonu Ayları SIDSD.

Şekil 4'te ısıtma mevsiminde, SIDSD'leri; nisan, kasım, mart, şubat, aralık,ve ocak aylarında olduğu görülmektedir. Şekil 3, 4'ün daha iyi anlaşılması için iki şekil verileri birleştirilerek Tablo 3 verilmiştir. Bu tabloda ısıtma periyodundaki tüm aylarınve kış mevsimi SIDSD'leri verilmiştir. En yüksek SIDSD'nin saat 13:00-14:00'de büyükten küçüğe

sırasıyla nisan, kasım, mart, ocak, şubat ve aralık aylarında olacağı görülmektedir.

Tablo.3 Şanlıurfa SIDSD.

GÜNÜN 24 SAATİ	20 °C İORS İÇİN ŞANLIURFA SIDSD [Derece-Saat]						SIDSD [Derece-Saat]
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Kasım	Aralık	T oplam
00:01							
01:02	0	0	83,6	114,1	7,5	0	205,2
02:03	0	0	56,2	104,2	3,3	0	163,7
03:04	0	0	57,7	99,8	2,5	0	160
04:05	0	0	59,5	80,5	1,6	0	141,5
05:06	0	0	30,7	97,7	31	0	159,5
06:07	0	0	0	95,9	61,7	0	157,6
07:08	0	0	0	114,5	39	0	153,4
08:09	0	0	61,4	162	2,3	0	225,8
09:10	0	0	124,4	219,1	20,5	0	364
10:11	0	89,3	153	276,7	106,8	43,6	669,3
11:12	41,3	128,9	168,6	333,7	221,2	81,1	974,7
12:13	103,9	157	148	359,9	272,9	95,4	1137,1
13:14	146,1	162,2	195,1	401,8	268,6	29,4	1203,2
14:15	153,1	128,1	210,1	428,3	274,5	53,1	1247,2
15:16	154,1	103,7	195,3	423	248,8	69,7	1194,7
16:17	80,5	108,9	187,8	403,8	200,1	26,8	1007,9
17:18	0	114,8	167,2	378,2	105,2	7,9	773,3
18:19	0	157,6	139,6	312	32,4	0	641,6
19:20	0	134,5	107,9	225,4	11,7	0	479,5
20:21	0	43,5	129,7	212,5	8,7	0	394,4
21:22	0	0	121,7	166,6	19,9	0	308,2
22:23	0	0	113,4	128,3	12,5	0	254,3
23:24	0	0	121,2	100,8	12,1	0	234
Toplam SIDSD[Derece-Saat]	679,1	1328,6	2713	5324,3	2004,3	407	12456,2

4. ŞANLIURFA SIDSD’NİN ISITMA ENERJİ İHTİYACINA ETKİSİNİN AÇIKLANMASI

Şanlıurfa için ortaya konulan Tablo 2’deki toplam IDSD ’leriyle ve Tablo3’teki toplam SIDSD’leri karşılaştırmalı olarak Tablo4’te verilmiştir.

Tablo. 4 Şanlıurfa IDSD ve SIDSD Karşılaştırılması

GÜNÜN 24 SAATI	20 °C İÇİRSİ İÇİN ŞANLIURFA İÇİN IDSD VE SIDSD [Derece-Saat]						SIDSD [Derece- Saat]
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Kasım	Aralık	Toplam
Toplam IDSD [Derece-Saat]	9664,5	8302,0	5724,3	2873,3	5361,8	9132,1	41058,1
Toplam SIDSD [Derece- Saat]	679,1	1328,6	2713,0	5324,3	2004,3	407,0	12456,2
IDSD ve SIDSD arasındaki fark [%]	7,026	16,003	47,394	185,326	37,381	4,456	30,337

Şanlıurfa'nın en fazla SIDSD'nin IDSD'ne karşılama oranı en büyük nisanda %185,326, mevsimlik karşılama oranı ise %30,337 olacağı Tablo 4' le ortaya konulmuştur.

Bu ilde nisan ayında SIDSD'nin IDSD'ne karşılama oranının %185,326 olması ilde özellikle saat 13-16 arası soğutmaya ihtiyaç duyulacağı dikkat çekmektedir.

5. SONUÇ

Şanlıurfa için yapılan bu saatlik bazda IDSD ve SIDSD ortaya konulmuştur. Çalışmada visual basic tabanlı yazılan bilgisayar programlarıyla analizler yapılarak literatüre katkılarda bulunulmuştur. Bu bilgisayar programlarıyla; Şanlıurfa iline ait 12 aylık ve yıllık ortalama 24 saatlik dış hava sıcaklığı görülme sıklıkları bulunmuştur. Bu dağılımla ısıtma dönemi mevsimleri ve serbest ısıtma sıcaklık dağılımları araştırılmıştır. Araştırma sonuçları değerlendirilerek sezondaki ayların ve yıllık 24 saatlik IDSD ve SIDSD ortaya konulmuştur. Ayrıca sezonluk IDSD 'leri toplam SIDSD'leri karşılaştırılmıştır. Sezonluk IDSD 41058,1 iken sezonluk SIDSD 12456,2 olacağı yani bu il için SIDSD %30,37 oranında sezonluk ısıtma yüküne katkıda bulunacağı, ayrıca nisan ayı ısıtma dönemi ayları arasında olmasına rağmen bu ayın saat 13-16 arasında SIDSD'nin IDSD'den %85,326 oranında büyük olacağı ilk defa bu çalışmayla ortaya konulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Asan, Y.S. Sancaktar, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28 (1998) 159–166.
- [2] H. Asan, Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor, Energy and Buildings 28 (1998) 299–305.
- [3] V. Cheng, E. Ng, B. Givoni, Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, Solar Energy 78 (4) (2005) 528–534.
- [4] B. Givoni, Characteristics, design implications, and applicability of passive solar heating systems for buildings, Solar Energy 47 (6) (1991) 425–435.
- [5] J. Maloney, T. Wan, B. Chen, J. Thorp, Thermal network predictions of the daily

- temperature fluctuations in a direct gain room, *Solar Energy* 29 (3)(1982) 207–223.
- [6] M.S. Sodha, J.K. Nayak, N.K. Bansal, I.C. Goyal, Thermal performance of a solarium with removable insulation, *Building and Environment* 17 (1)(1982) 23–32.
- [7] R.J. Duffin, A passive wall design to minimize building temperature swings, *Solar Energy* 33 (3/4) (1984) 337–342.
- [8] Aktacir, M. A., Bulut, H. 2007. Kayseri İlının Serbest Soğutma Potansiyelinin İncelenmesi, Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 May – 2 June, 2007, Kayseri.
- [9] Kreider, J.F., Rabl, A., Heating and Cooling of Buildings, McGraw-Hill Inc., McGraw Hill Inc., New York, 1994.]
- [10] Isısan, Enerji Ekonomisi, Isısan Çalışmaları No:351, İstanbul, 2005.
- [11] Fanger, P.O., How to make indoor air quality one hundred times better while saving energy, VI. International HVAC+R Technology Symposium, İstanbul, 2004.].
- [12] Olsen, E.L., Qinyan, Y.C., Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate, *Energy and Buildings* 35, 561–571, 2003.
- [13] Yaşar E., “15 Büyükşehir İçin Isıtma Sezonundaki Her Ay Ve Sezonluk Serbest Isıtma Hesaplamaları İçin Farklı Bir Yöntemin Araştırılması” Master Tezi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği, (2023).
- [14] Yaşar, E., Ertürk, M. (2023). “Investigation Of A Different Method In Free Heating Degree Hours Calculations For Aydın Province”. *Electronic Letters On Science And Engineering*, 19(1), 17-28, (2023)
- [15] Işık, E., İnallı, M. & Celik, E. ANN and ANFIS Approaches to Calculate the Heating and Cooling Degree Day Values: The Case of Provinces in Turkey. *Arab J Sci Eng* 44, 7581–7597 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03852-4>
- [16] Işık E., İnallı M. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey, *Energy*, 154 (2018), pp. 7-16 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.069>
- [17] Büyükalaca, O. ve Bulut, H. (2003). Detailed weather data for the provinces covered by the Southeastern Anatolia Project(GAP) of Turkey. *Applied Energy*, 77, 187–204.
- [18] Dilmaç Kesen., “A comparison of new turkish thermal insulation in building”, *Energy & Building*, 35 (2) :161-174, (2003).
- [19] Ertürk M., “Isıtma ve soğutma derece saat hesaplamalarında farklı bir yöntemin araştırılması ve geliştirilmesi”. Doktora Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği, (2012).
- [20] Satman A., Yalcinkaya N., “Heating and cooling degree-hours for Turkey”, *Energy*, 24(10): 833–40, (1999).

Mikro Gaz Türbin Motorlar

Soner ŞEN¹

1- Doç. Dr.; Selçuk Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde-Motor Bakımı Bölümü.
sensoner@selcuk.edu.tr ORCID: 0000-0003-3385-5577

ÖZET

Gaz türbinli motorlar, boyutlarından bağımsız olarak benzer çalışma prensiplerine sahiptir. Mikro gaz türbinleri, 20 kW ile 500 kW arasında değişen güç üretim kapasitesine sahip olup, yüksek dönme hızlarına (yaklaşık 100.000 rpm) ulaşabilmektedir. Bu türbinler, otomotiv uygulamalarından, küçük jet motorlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Mikro türbin yapısı genellikle santrifüj kompresör, radyal türbin, yanma odası ve reküperatör bileşenlerini içerir. Reküperatörler, yakıt tüketimini azaltarak NO_x emisyonlarını düşürür ve verimliliği artırır. Mikro türbinlerin kontrol sistemleri, elektrik üretimi ve mekanik tahrik uygulamalarında önemli rollere sahiptir. Ayrıca, motor bileşenleri yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden üretilmektedir. Yanma odası tasarımı, kutu-halkalı ve halkalı konfigürasyonlar ile gerçekleştirilirken, mikro gaz türbinlerin yataklama sistemleri, hava ve gaz yataklarının kullanımıyla sürtünmesiz çalışma sağlar. Bu gelişmeler, mikro gaz türbinlerin verimliliğini ve güvenilirliğini artırarak geniş uygulama alanlarında tercih edilmesini sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Mikro gaz türbin; Yanma odası; Kompresör; Türbin; Reküperatör

GİRİŞ

Gaz türbininin boyutu veya tipi (ağır sanayi, aero-türev, mini türbin, mikro türbin) onun çalışma prensibini değiştirmemektedir. Tüm gaz türbinleri, kütle akış makineleri olarak kabul edilir ve termodinamik açıdan benzer özellikler taşır. Çıkış gücünü artırmak için, gaz türbini rotorlarının ses hızına yakın bir hızda dönmesi gerekir. Bu, türbin çapı küçüldükçe dönme hızının artması gerektiği anlamına gelir. Dolayısıyla, mikro türbinlerde güç çıkışı en üst düzeye çıkarmak için gereken dönüş hızı daha yüksektir. Havacılık ve ağır sanayi türevi gaz türbinleri genellikle 1 MW güç kapasitesinin üzerindedir (De Robbio, 2023:704). Tablo 1’de gaz türbin motorlarının güç değerlerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 1: Gaz Türbin Motorlarının Sınıflandırılması

Motor Tipi	Güç Seviyesi
Havacılık-Ağır Endüstri	1000 kW ve üstü
Mini Gaz Türbinleri	500 kW-1000 kW
Mikro Gaz Türbinleri	20 kW-500 kW

Gaz türbininde kullanılan malzemelerin özellikleri, gaz türbin motor kapasitesini belirleyen en önemli faktördür. Aero-türevi gaz türbin motorları, en büyük ağır sanayi makineleriyle aynı güç seviyelerine ulaşabilmektedir.

Bu performansı, gerekli kütle akışını sağlamak için (20.000 rpm'ye kadar) yüksek rotor hızlarında çalışarak elde ederler.

Mikro türbinler, 20 kW ile 500 kW arasında değişen yüksek hızlı gaz türbinleridir ve yaklaşık 100.000 rpm'ye kadar çıkabilen dönüş hızlarına sahiptir. Bu tür üniteler, otomotiv ve kamyon turbo şarj sistemlerinden, küçük jet motorları ve turbo-prop uygulamalarına kadar çeşitli alanlarda kullanılır. Ayrıca, uçaklar için yer gücü sağlamak amacıyla yaygın bir şekilde yardımcı güç ünitelerinde de tercih edilmektedir (Li ve Li, 2023:1).

Mikro türbinlerin yapısı genellikle, aynı şaft üzerinde bulunan bir santrifüj kompresör, radyal türbin, yanma odası ve bir reküperatörden oluşur. Bazı tasarımlar, ek olarak ayrı bir güç türbini çarkı da içerebilir. Reküperatör, kompresörün deşarj havasını ısıtmak için egzoz atık ısısından yararlanarak yakıt tüketimini azaltır, azot oksit (NO_x) emisyonlarını düşürür ve genel verimliliği artırır.

Mikro türbinler, elektrik üretimi için alternatör veya jeneratörlerle (endüktif ya da senkron türde) bağlanabilir. Mekanik tahrik uygulamalarında, soğutma hizmetindeki kompresörler veya pompa sistemleri ile entegre edilebilirler. Tek ve bölünmüş şaftlı tasarımlar, elektrik jeneratörünü kompresör ve türbin bileşenleriyle aynı şaft üzerinde monte edebilir ya da gaz türbini çıkış şaftı ile jeneratör arasında bir hız düşürücü dişli kutusu kullanabilir (Reale ve Sannino, 2022:900).

MİKRO GAZ TÜRBİN DONANIM YAPILARI

Mikro gaz türbinler ile daha büyük ağır sanayi ve havacılık-türevli gaz türbinleri arasındaki en önemli fark, boyutlarıdır. Mikro türbin bileşenleri, yüksek MW kapasiteli gaz türbinlerinden daha küçük olmalarına rağmen, benzer işlevleri yerine getirirler. Bu türbinler, termodinamik yasaları çerçevesinde çalışır ve Brayton çevrimi ile temsil edilir. Genellikle, mikro türbin bileşenleri, daha büyük gaz türbinlerinde kullanılan aynı malzemelerden imal edilir. Son dönemlerde, yanma odası ve reküperatör gibi bileşenlerdeki yenilikler, motor geliştirme çalışmalarında öncelikli alanlar haline gelmiştir (Simon ve Jiang, 2003:2-7).

Motor Kompresörü

Mikro gaz türbin motor kompresör bileşenleri genellikle santrifüjlü tasarımda olmaktadır. Bu tasarımın birkaç avantajı vardır: Yanma-patlama hızları, en yüksek çalışma hızlarının çok üzerindedir. Ayrıca, bu tür malzemelerin temini oldukça kolaydır ve bileşenler, minimum işlem gerektiren hassas döküm teknikleriyle üretilebilir.

Bunun yanı sıra, bazı bileşenler, küçük turbo prop motorları, turbo şarjlar ve yardımcı güç üniteleri (APU) gibi uygulamalardan türetilmiş ve mevcut kullanımları bulunmaktadır. Örneğin, United Technologies Corporation, DTE Technologies ve Kyocera ile iş birliği yaparak Pratt &

Whitney ST5 helikopter motoruna dayanan bir mikro gaz türbin geliştirmiştir. ST5 motoru, PWA200 modelinden türetilmiştir (şekil 1) ve bu da PT6 turbo prop motorunun bir alt ürünüdür. Bu motorlar, santrifüj ve eksenel bileşenlerin bir kombinasyonunu kullanır. Öte yandan, Ingersoll Rand'ın PowerWorks 250 modeli hem kompresör hem de türbin bileşenleri için santrifüj tasarımlarına sahip olan 1,7 MW'lık Ingersoll-Rand KG2 gaz türbininden küçültülerek türetilmiştir.



şekil 1: United Technologies Corporation, Pratt & Whitney Aircraft PW206 turbo prop motoru

Kaynak: Litalien, C., & Safah, F. (2007). Pratt & Whitney Canadat Turboshaft engines product and technology evolution.

Kompresör bileşeni, türbin bileşeni ve bazı tasarımlarda elektrik jeneratörü rotoru, ana şaft üzerine sabitlenmiştir. Kompresör ve ana şaft genellikle paslanmaz çelikten üretilir. Mikro gaz türbinlerin hava girişlerinde ve kompresörlerinde kullanılan özel malzemeler, daha büyük gaz türbinlerinde tercih edilen malzemelerle benzer özellikler taşımaktadır.

Motor Türbini

Mikro gaz türbinlerin büyük bir kısmı, genellikle kompresör bileşenine benzeyen ancak geometrisi ters çevrilmiş olan radyal akış türbin arkı tasarımını kullanmaktadır. Bazı tasarımlarda ise, büyük ölçekli gaz türbinlerinde olduğu gibi eksenel bir aşama, radyal bir aşamayla birleştirilmiştir. Türbin arkı tasarım tipi seçimi, mikro türbin tasarım sürecinin temel aşamalarından biridir. Günümüzde kullanılan türbin çarkları, daha büyük gaz türbinlerinde kullanılan malzemelerle aynı olup, monolitik silisyum nitrür gibi seramik malzemelerden üretilen türbin çarklarının geliştirilmesi üzerinde çalışmalar sürmektedir. Bu yeni malzemeler, yüksek sıcaklıklarda daha iyi sürünme dayanımı ve oksidasyona karşı direnç sunmayı amaçlamaktadır. Tasarım ve üretim süreçlerindeki bu ilerlemeler tamamlandığında, jet motoru teknolojisindeki gelişmelerin büyük gaz türbini motorlarına aktarılması gibi, bu yenilikler de çok yüksek güçlü MW'lık gaz

türbinlerine entegre edilecektir. Şekil 2’de türbin ve tersi olarak çalışan kompresör kanat yapıları görülmektedir.



Şekil 2: Türbin ve Kompresör Örnek Kanat Yapıları

Isı Geri Kazanım Eşanjörü (Rekuperatör)

Rekuperatörler, türbin egzozundan gelen ısıyı yanma odasına veya kompresör çıkışına ileterek ısı geri kazanımı sağlar. Isı transferi, sıcak egzoz gazları ve soğuk kompresör havası arasında yer alan geçiş duvarları aracılığıyla gerçekleşir. Mikro gaz türbinlerde verimliliği artırmak için rekuperatörlerin kullanımı oldukça önemlidir. Rekuperasyonlu sistemlerde elektrik verimlilikleri genellikle %27-35 aralığındayken, rekuperasyonsuz sistemlerde bu oran %15-20 arasında kalmaktadır. Ayrıca, rekuperatörlerin bir diğer faydası, NO_x emisyonlarında azalma sağlamasıdır. Bu azalma, hem yakıt tüketiminin düşmesiyle artan verimlilikten hem de yakıt kaynaklı nitrojen miktarındaki azalmadan kaynaklanır.

Rekuperasyonlu gaz türbinleri, daha düşük kompresör basınç oranları ve yanma sıcaklıkları kullanarak NO_x emisyonlarını azaltma avantajına sahiptir. Verimliliği %40'ın üzerine çıkarmak ve maliyetleri kW başına 500 doların altına çekmek amacıyla, yüksek sıcaklıklara dayanıklı rekuperatör malzemeleri geliştirilmektedir. Bu malzemelerin 700°C ile 1000°C arasında çalışabilmesi beklenmektedir. Üzerinde çalışılan malzemeler arasında 347SS, Alaşım 230, Modifiye Alaşım 803, Alaşım 120, Thermie Alaşımı, Alaşım 625 ve Alaşım 214 gibi seçenekler bulunmaktadır. Şekil 3'te bir ısı geri kazanım eşanjörü (Rekuperatör) görülmektedir.



Şekil 3: Isı Geri Kazanım Eşanjörü (Reküpreatör)

Kaynak: Xiao, G., Yang, T., Liu, H., Ni, D., Ferrari, M. L., Li, M. & Ni, M. (2017). Recuperators for micro gas turbines: A review. Applied Energy, 197, 83-99.

Yanma Odası

Mikro gaz türbin yakıcıları ile büyük ölçekli gaz türbini yakıcıları arasında belirgin bir fark bulunmamaktadır. Mikro türbinlerde kullanılan yakıcılar, tıpkı büyük gaz türbinlerinde olduğu gibi halka tipi veya tek yakıcı tasarımlar olabilir. Bu yakıcılar genellikle martensitik ve ferritik demir bazlı alaşımlar ya da nikel bazlı alaşımlar kullanılarak üretilir. Tek yakıcı, ters akış tasarım konsepti için en çok tercih edilen yapı haline gelmiştir. Ayrıca, katalitik yakıcılar da geliştirilmektedir. Katalitik yakıcılar, egzoz gazı arıtımına gerek kalmadan, doğal gazla çalışırken 3 ppm'nin altında emisyon değerlerine ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Şekil 4'te, bir FT8 aero-türev gaz türbinindeki dokuz yanma odasından birinin çıkış kısmı gösterilmektedir.



Şekil 4: Yanma Odası Çıkış Görünümü

Kaynak: Fox, T. G., & Schlein, B. C. (1992). Full annular rig development of the FT8 gas turbine combustor.

Yanma odası tasarımı oldukça karmaşık bir süreçtir. Gaz türbinlerinin gelişimi sırasında yanma odası tasarımları, iki temel konfigürasyona ayrılmıştır: kutu-halkalı yanma odası ve halkalı (tek yanma odası da dahil) yanma odası bölümleri. Kutu-halkalı yanma odalarının genellikle iki ana tipi bulunur: biri daha verimli olan düz akışlı yanma odası, diğeri ise ters akışlı yanma odasıdır. Ters akışlı yanma odaları, özellikle ağır endüstriyel gaz türbinlerinde tercih edilir, çünkü bu tasarım rejeneratör kullanımını kolaylaştırarak genel termal verimliliği artırır.

Kutu-halkalı tasarımda dikkat çeken bir diğerk yaklaşımdır, yanma odası başına tek bir yakıt nozulu veya çoklu yakıt nozulu kullanılmasıdır. Teorik olarak, çoklu yakıt nozulu, yakıt gazının daha iyi dağıtılmasını veya sıvı yakıtın daha iyi atomize edilmesini sağlayarak daha hızlı, daha dengeli yanma ve ısı salınımı elde edilmesini amaçlar. Ancak pratikte, yakıtı her bir nozul eşit şekilde dağıtma zorlukları nedeniyle kullanılan nozul sayısı sınırlı kalmaktadır (Waitz vd., 1996:777-788).

Diğerk yanma odası tasarım konsepti ise halka veya tek yanma odasıdır. Tek yanma odası, genellikle kompresör ve türbin zarfının dışında yer alan bağımsız bir yanma odasıdır. Halka yanma odası ise yine tek bir yanma odası olmakla birlikte, kompresör ve türbinin zarfının içinde bulunur. Tek yanma odası çoğunlukla tek bir yakıt nozuluyula donatılırken, halka yanma odasında birden fazla yakıt nozulu kullanılması gerekmektedir.

Mil Yataklama Sistemleri

Mikro daz türbinlerde yüksek dönme hızları (100.000 rpm'ye kadar) nedeniyle çalışma koşulları oldukça zordur, bu yüzden yataklar mikro gaz türbinin kritik bir bileşeni olarak kabul edilir. Geleneksel hidrodinamik ve sürtünme önleyici yataklar, bir pompa ve yağ soğutucusunu içeren basınçlı yağlama sistemleriyle çalışır ve bazı üreticiler tarafından hâlâ kullanılmaktadır. Ancak, "hava", "gaz" veya "film" yataklarının kullanımı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu yataklar, şaftı desteklemek için ince bir basınçlı hava filmi kullanır. Sıvı film yatakları, dönen şaft ile sabit gövde arasında ince bir hava filmi oluşturarak, kuvvetlerin bir taraftan diğerkine aktarılmasını sağlar. Hava filmi, yatak bölmesine iletilen hava akışıyla elde edilir.

Bu teknolojiye farklı tasarım teknikleri mevcuttur. Bir yaklaşım, delikli bir hava filmi oluştururken, başka bir tasarım havayı gözenekli bir malzemeden geçirerek tüm yatak yüzeyinde tekdüze bir basınç sağlar. Hava yataklarının en önemli avantajı, birbirleriyle temas edecek yüzeyler arasında sürtünmesiz bir yük taşıma arayüzü sağlamalarıdır. Temassız çalışma prensibi sayesinde, hava yatakları sürtünme, aşınma ve yağlayıcıya duyulan ihtiyaç gibi geleneksel yataklarda karşılaşılan problemlerin önüne geçer.

Motor Kontrol Sistemi

Mikro gaz türbinlerde kullanılan kontrolörler, genellikle çok MW'lık gaz türbinlerinde kullanılanlarla aynıdır. Ancak elektrik üretimi uygulamalarında bazı ek kontrol görevleri bulunmaktadır. Mikro gaz türbinlerin ve yüksek hızlı jeneratörlerin gelişimi, güç çıkışının düzenlenmesinin gaz türbini motor kontrolü ile entegre edilmesini gerektirmiştir. Bu kontrolör, yalnızca Başlatma, Durdurma ve Yönetim aşamalarında yakıt valfini yönetmek, makineleri aşırı titreşim, hız ve sıcaklığa karşı korumakla kalmaz, aynı zamanda jeneratör tarafından üretilen yüksek frekanslı ve yüksek voltajlı enerjiyi şebeke kalitesine uygun hale getirir.

Ayrıca, kontrolör, tesisin Dağıtılmış Kontrol Sistemi (DCS) ve İnsan Makine Arayüzü (HMI) gibi diğer sistemlerle iletişim kurabilmelidir. Bu iletişim, Modbus, Ethernet TCP/IP, Ethernet UDP, OPC (Ethernet), DDE (Dinamik Veri Değişimi) ve EGD (Ethernet) gibi protokoller aracılığıyla sağlanmalıdır, böylece operatör mevcut veya yeni sistemlere ve bakım sistemlerine kolayca entegre olabilir (Soares, 2011). Yakıt valfi de mikro gaz türbin için doğru boyutta olmalı ve hızlı tepki verebilmelidir. Valfin iki farklı akış yolunu yönetebilmesi avantaj sağlar: biri başlatma (pilot) akışı, diğeri ise çalışma (birincil) akışıdır.

Güç üretimi uygulamalarında kontrolör, güç koşullandırmasını, yük (kW) kontrolünü, frekans ayarını, senkronizasyonu, yük paylaşımını ve kW düşüş yönetimini içermelidir. Mekanik tahrik uygulamalarında (kompresör veya pompa tahrikleri gibi) ise kontrolör, emme ve tahliye basıncı ile sıcaklık kontrolü, baypas veya devridaim akışı, soğutma, dalgalanma kontrolü (santrifüj kompresörlerde) ve çeşitli tesis valflerinin kontrolünü sağlamalıdır.

SONUÇ

Mikro gaz türbinleri, yüksek verimlilik ve esneklik sağlayan, enerji üretiminde ve mekanik tahrik uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmiş tasarım ve malzeme kullanımı sayesinde, bu türbinler yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında etkili bir şekilde çalışabilmektedir. Reküperatörlerin kullanımı, yakıt tüketimini azaltırken, NO_x emisyonlarının düşürülmesine de katkı sağlar. Ayrıca, mikro gaz türbinlerinin kontrol sistemleri, güç çıkışının düzenlenmesini sağlayarak güvenilir enerji üretimini garanti edebilmektedir.

Yenilikçi yakıcı tasarımları ve gelişmiş yataklama sistemleri, bu türbinlerin performansını daha da artırmaktadır. Genel olarak, mikro gaz türbinleri, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyele sahip olup, gelecekteki enerji sistemlerinde önemli bir yer tutacaklardır. Bu durum, enerji dönüşüm süreçlerinin daha etkin ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

- De Robbio, R. (2023). Micro gas turbine role in distributed generation with renewable energy sources. *Energies*, 16(2), 704.
- Fox, T. G., & Schlein, B. C. (1992). Full annular rig development of the FT8 gas turbine combustor.
- Li, J., & Li, Y. (2023). Micro gas turbine: Developments, applications, and key technologies on components. *Propulsion and Power Research*, 12(1), 1-43.
- Litalien, C., & Safah, F. (2007). Pratt & Whitney Canadat Turboshift engines product and technology evolution.
- Reale, F., & Sannino, R. (2022). Numerical modeling of energy systems based on micro gas turbine: a review. *Energies*, 15(3), 900.
- Simon, T. W., & Jiang, N. (2003, November). Micro-or small-gas turbines. In *Proc. Int. Gas Turbine Congress* (pp. 2-7).
- Soares, C. (2011). *Microturbines: applications for distributed energy systems*. Elsevier.
- Waitz, I. A., Gauba, G., & Tzeng, Y. S. (1996, November). Combustors for Micro-Gas Turbine Engines. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 15373, pp. 777-788). American Society of Mechanical Engineers.
- Xiao, G., Yang, T., Liu, H., Ni, D., Ferrari, M. L., Li, M., & Ni, M. (2017). Recuperators for micro gas turbines: A review. *Applied Energy*, 197, 83-99.

Geleneksel Yöntemle Üretilen Bitlis Tulum Peynirinin Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi*

Hacer AÇAR¹

Şenol KÖSE²

Yağmur ERİM KÖSE³

- 1- Yüksek Gıda Mühendisi,; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. heracr.13@gmail.com, ORCID No: 0000-0003-0947-9217
- 2- Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. senolkose28@gmail.com , ORCID No: 0000-0003-0599-6030
- 3- Doç. Dr.; Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. yagmurerim@gmail.com , ORCID No: 0000-0002-8008-0009

*Bu çalışma Hacer AÇAR'ın "Geleneksel Yöntemle Üretilen Bitlis Tulum Peynirinin Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Tez No:80238) üretilmiştir.

ÖZET

Bu çalışmada, Bitlis merkez ve ilçelerinden temin edilen geleneksel yöntemle üretilmiş 29 adet Bitlis Tulum peyniri örneklerinin fizikokimyasal, biyokimyasal, mineral madde ve antioksidan aktivite içeriği belirlenmiştir. Örneklerin fizikokimyasal analiz sonuçlarına göre ortalama kuru madde % 58.70, yağ % 30.96, protein % 21.10, tuz % 3.37, kül % 4.38, pH 5.23, asitlik % 1.25 (l.a) olarak saptanmıştır. Biyokimyasal analiz sonuçlarına göre ortalama % WSN 13.78, % TCA-SN 10.66, % PTA-SN 8.11, lipoliz 9.11 ADV olarak tespit edilmiştir. Peynir örneklerinde ortalama Ca 2516.58 mg/kg, Na 2945.90 mg/kg, Mg 331.61 mg/kg, K 657.90 mg/kg, Fe 6.92 mg/kg, P 5224.67 mg/kg, Cu 1 mg/kg, Mn 0.32 mg/kg ve Zn 24.80 mg/kg olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Bitlis Tulum peyniri örneklerinin suda çözünen ekstraktlarının ortalama toplam fenolik madde içeriği 1554.13 mg GAE/kg, DPPH inhibisyonu % 35.52 ve TEAK değeri ise 2.75 mmol TE/g olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Bitlis Tulum peyniri, mineral madde, antioksidan aktivite, lipoliz, proteoliz.

GİRİŞ

Peynir, dünya çapında pek çok farklı üretim şekillerinin kullanılmasıyla üretim ve tüketimi fazla olan önemli fermente süt ürünlerinden biridir. Üretildiği ilk zamanlarda temel amaç süt bileşenlerini korumak iken şu anda hem besleyiciliğiyle hem de duyuusal anlamda insanları tatmin etmesiyle değerli bir mutfak ürünü haline gelmiştir (Hastaoğlu ve ark., 2021). Dünya genelinde 4000'e yakın peynir çeşidi olduğu tahmin edilmektedir (Demirci, 1990). Ülkemizde ise üretiminde kullanılan sütün bileşiminden ve uygulanan işlemlerdeki farklılıklardan dolayı yaklaşık 130 peynir çeşidi olduğu bildirilmektedir. Bunlar içinde en fazla üretilip tüketilenler beyaz peynir, kaşar peyniri ve tulum peynirleridir (Tekinşen, 2017). Kaşar ve beyaz peynirden sonra tulum peyniri üretimi üçüncü sırada yer almaktadır (Adıgüzel vd., 2009). Tulum peyniri adını olgunlaştırılması için içine konulan ve daha sonra içinde satışının gerçekleştirildiği yani ambalaj materyali olarak da kullanılan hayvan tulumlarından almaktadır. Tulum olarak çoğunlukla dayanıklılığı diğerlerine göre daha fazla olduğu için keçi derisi tercih edilmekle birlikte koyun derisi de kullanılmaktadır. Eskiden alternatif ambalajlama materyallerinin kısıtlılığı nedeniyle peynirlerin olgunlaştırılması ve korunması amacıyla tulumlara koyulduğu düşünülmektedir. Günümüzde ise tulumların yerine tahta, plastik ambalajlar veya çömlükler tulum peynirlerinin olgunlaştırılmasında kullanılmaktadır. Hem kullanım kolaylığı hem de ucuz olmasından dolayı

daha çok plastik ambalajlar tercih kullanılmaktadır (Sert ve Akın, 2008). Tulum peyniri taze olarak tüketilmeyen ve orta sertlikte olan bir peynir türüdür. Çoğunlukla çiğ süttten üretilir ve 3-5 aylık olgunlaşma süresinin ardından tüketime sunulur. Olgunlaşma süreci mağara, obruk (mağara benzeri küçük doğal yapılar) veya mahzen gibi yerlerde gerçekleştirilir. Tulum peynirleri, tam yağlı veya yağsız her türlü süttten üretilir, ancak tüketiciler tarafından en lezzetli kabul edilenleri tam yağlı koyun süttünden yapılanlardır (Kamber, 2007). Tulum peyniri üretiminde geleneksel olarak çoğunlukla koyun ve keçi süttü tercih edilirken, son yıllarda tüketim miktarının artmasıyla birlikte talebi karşılayabilmek için inek süttü de kullanılmaktadır (Adıgüzel ve ark., 2009). Ülkemizde üretim ve tüketim açısından önemli bir yere sahip olan tulum peynirleri çoğunlukla yerel üreticiler ya da küçük aile işletmeleri tarafından üretildiğinden herhangi bir standart sağlanamamıştır. Bu da çok farklı özellikte ve kalitede tulum peyniri üretilmesine neden olmaktadır. Üretilen tulum peynirler çoğunluğu kuru olmak üzere salamura şeklinde (İzmir Tulum) de üretilmektedir. Çoğunlukla geleneksel şekilde üretilen tulum peynirleri üretildikleri bölgeye göre farklı isimlerle anılırlar. Yaygın olarak bilinenleri Erzincan Tulum, İzmir Tulum, Divle Tulum ve Çimi Tulum peynirleridir (Arslaner ve Türkmen, 2020; Morul ve İşleyici, 2012). Bu peynirlerin dışında Bitlis yöresinde geleneksel olarak üretilen Bitlis Tulum peyniri de mevcuttur.

Geleneksel yöntemle Bitlis Tulum Peynirlerinin üretiminde genellikle koyun süttü kullanılmakta, fakat koyun süttünün yetersiz olduğu durumlarda bu süte bir miktar keçi süttü de katılmaktadır. Süt sağıldıktan sonra temiz tülbent ya da bez yardımıyla süzülerek kaba kirlerinden arındırılmakta ve o sıcaklıkta (30 ± 2 °C) ticari olarak satılan sıvı maya ile mayalanmaktadır. Maya miktarına bağlı olarak 2-4 saat içerisinde süttün pıhtılaşmasından sonra, pıhtı parçalanarak bez torbalara konulmakta ve 2-3 gün süzme işlemi gerçekleştirilmektedir. Süzülme işlemini takiben teleme elle küçük parçalara ayrılmakta ve göz kararı kaya tuzu kullanılarak tuzlanmaktadır. Eklenen tuzun pıhtıya tamamen işemesi ve suyun uzaklaşması için teleme bez torbalara konularak 2-3 gün tekrar baskıya alınmaktadır. Daha sonra elle küçük parçalara ayrılarak plastik bidonlara hiç boşluk kalmayacak şekilde sıkı bir şekilde basılmaktadır. Ambalajlanan peynirlerin ağız kısmı temiz bir bezle kapatılıp üzeri çamurla kaplanmakta ve ağız kısmı aşağı gelecek şekilde ters çevrilmektedir. Bu şekilde hazırlanan Bitlis Tulum peynirleri toprağın yaklaşık 1-1.5 m altına gömülerek 3-4 ay olgunlaştırılmaktadır. Bölgede üretimi çok yaygın olmamakla birlikte otlu Tulum peyniri de yapılmaktadır. Bu şekilde üretimde Hizan ve Mutki ilçeleri başta olmak üzere yüksek rakımlı yaylalar ile Tatvan ve Reşadiye çevresinden bahar aylarında toplanan otlar kullanılmaktadır. Van Otlı peyniri üretiminde de kullanılan Sirmo (*Allium* sp.), Heliz (*Ferula* sp., *Prangos* sp.) ve Mendi (*Anthriscus nemorosa*) ile birlikte, Bitlis ve çevresinde so (soy; *Heracleum*

sp.) ve ağarce (ağırce; *Allium* sp.) isimleriyle bilinen otlar kokusu daha az hissedildiği ve hafif bir lezzete sahip olduklarından otlu Tulum peyniri üretiminde tercih edilmektedir (Sancak ve ark., 2018). Otlu Tulum peyniri üretiminde pıhtı elde edildikten sonra ot ilavesi gerçekleştirilmektedir (Açar, 2023).

Bu çalışma kapsamında, geleneksel yöntemle üretilen Bitlis tulum peyniri ile ilgili literatürdeki eksikliklerin giderilerek süt endüstrisine katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, tüketimi her geçen gün artan, bölgede sevilerek tüketilen, geleneksel yöntemle üretilen Bitlis tulum peynirinin bazı fizikokimyasal, biyokimyasal ve mineral madde analizleri yapılarak sonuçlar ülkemizde üretilen bazı geleneksel tulum peynirleri ile karşılaştırılmıştır. Konuya ilişkin tek bir çalışma (Sancak ve ark., 2018) mevcut olup bu çalışmada Bitlis tulum peynirinin sadece bazı kimyasal değerleri (kuru madde, yağ, kuru maddede yağ, protein, tuz, kuru maddede tuz, kül ve titrasyon asitliği değerleri) ortaya konmuştur. Yapılan çalışma ile daha kapsamlı analizler yapılarak Bitlis tulum peynirinin bazı kalite özellikleri ve besin değeri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Böylece ülkemizin yöresel zenginliklerinden biri olan, bölgenin kalkınması açısından önemli potansiyele sahip Bitlis Tulum peyniri ile ilgili bir durum tespiti yapılması ve bu konuda yapılacak araştırmalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Araştırma materyali olarak Bitlis merkez ve ilçelerden farklı üreticilere ait geleneksel yöntemle üretilen 29 adet Bitlis Tulum peyniri temin edilmiştir. Peynir örnekleri polietilen poşetlerde hızlı bir şekilde laboratuvara getirilmiş ve burada steril cam kavanozlara konularak analiz süresince 4 ± 1 °C’de muhafaza edilmiştir.

Yöntem

Kimyasal ve Biyokimyasal Analizler

Peynir örneklerinin kurumadde, yağ, kül, tuz, asitlik, protein oranı Kurt ve ark. (2003)’na ve pH tayini Kosikowski (1982)’ye göre belirlenmiştir. Örneklerin suda çözünen azot (WSN), protein olmayan azot (NPN), aminonitrojen oranı Bütikofer ve ark. (1993)’na ve lipoliz oranı ise ADV cinsinden IDF (1991)’e göre tespit edilmiştir.

Mineral Madde Tayini

Bitlis tulum peyniri örneklerinin mineral madde içeriği TS 3606’da belirtilen kuru yakma metodu kullanılarak saptanmıştır (Anonim, 1995). Yaklaşık olarak 2.5- 3 g örnek porselen krozeeye tartılarak kül fırınında 550 °C’de yakılmıştır. Yakma sonucu oluşan küller nitrik asit çözeltisi ile çözündürülerek süzme işlemine tabi tutulmuş ve son hacim 1 N nitrik asit

çözeltisi ile 50 ml'ye tamamlanmıştır. Örneklerin Ca, Na, K, Mg, Fe, Cu, Mn ve Zn konsantrasyonları ICP-OES cihazı kullanılarak saptanmıştır.

Toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite tayini için suda çözünen ekstraktların hazırlanması

Kuchroo ve Fox (1982) tarafından belirlenen yöntemin modifiye edilmesiyle suda çözünebilir ekstraktların elde edilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla 10 g peynir örneği 20 ml deiyonize su ile birlikte 10 dk'da 20 °C' de bir Stomacher (Mayo, homogenius) içerisinde homojenize edilmiştir. Homojenize örnekler 40 °C' de bir saat su banyosunda bekletilmiş ve 10000 g'de 4 °C' de 20 dk santifrüj işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında deney tüplerinin üstünde biriken yağ fazı alınmış, süpernatantlar membran filtreden (0,45 µm çaplı) geçirilerek elde edilen ekstraktların toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite değerleri belirlenmiştir.

Toplam fenolik madde tayini

Suda çözünen ekstraktların toplam fenolik madde miktarı Folin & Ciocalteu's yöntemine göre yapılmıştır. Bu amaçla deney tüplerine 150 µL örnek ve 3 ml Na₂CO₃ (%2) eklenerek yaklaşık 2 dk. bekletilmiştir. Bu süre sonunda tüplere, ultra saf su ile 1:1 oranında seyreltilmiş Folin-Ciocalteu's ayırıcından 150 µL ilave edilmiştir. Elde edilen karışım vorteks yardımıyla karıştırılmış, oda sıcaklığında ve karanlık bir yerde 45 dk. bekletilerek spektrofotometrede (UV Mini-1240, Shimadzu, Japan) 765 nm' de okuma yapılmıştır. Toplam fenolik madde içeriği, galik asit tarafından oluşturulan kalibrasyon grafiğinden hesaplanarak galik asit eşdeğeri olarak ifade edilmiştir (Bae ve Suh, 2007).

Antioksidan aktivite tayini

DPPH testi

DPPH testi Brand-Williams ve ark. (1995)' nın belirlediği yöntemle göre analiz edilmiştir. Öncelikle suda çözünen ekstraktlardan 100 µL tüplere konulmuş, üzerlerine 2.4 ml günlük olarak hazırlanan DPPH çözeltisinden (25 mg DPPH/L metanol) eklenerek vorteks ile hızlıca karıştırılmıştır. Karıştırmayı takiben 30 dk. karanlıkta bekletilen örneklerin absorbansı spektrofotometrede (UV Mini-1240, Shimadzu, Japan) 520 nm'de okunmuş ve antiradikal aktivitesi % inhibisyon olarak saptanmıştır.

TEAK testi

TEAK değeri Kırca ve Özkan (2007) tarafından bildirilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bunun için önce 2.45 mM potasyumpersülfat içeren 7 mM ABTS^{•+} radikal çözeltisi hazırlanmış, karanlık bir ortamda ve oda sıcaklığında en az 12-16 saat bekletilerek ABTS^{•+} radikal çözeltisinin

oluşması sağlanmıştır. Bu radikal çözelti %80' lik etanol kullanılarak 734 nm' de 0.700 ± 0.2 absorbans verecek şekilde seyreltilmiştir. Seyreltilen çözeltiden 2.97 ml bir deney tüpüne alınmış ve üzerine suda çözünen ekstraktlardan 30 µL eklenmiştir. Bu karışım hızlıca karıştırılarak 6 dk. karanlıkta bekletilmiş ve süre sonunda spektrofotometre (UV Mini-1240, Shimadzu, Japan) kullanılarak 734 nm'de okuma yapılmıştır. Aynı işlemler troloks için de yapılarak antioksidan aktivite değeri mmol/g troloks eşdeğeri olarak ifade edilmiştir.

İstatistiksel Analizler

Bitlis Tulum peynirlerinin analiz sonuçlarına ait ortalama, standart sapma, en düşük ve en yüksek değerler Microsoft Office Excel 2016 programında hesaplanarak belirtilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Geleneksel yöntemle üretilen Bitlis Tulum peynirlerinde ortalama kurumadde % 58.70, yağ % 30.96, protein % 21.10, laktik asit % 1.25, tuz % 3.37, kül % 4.38 ve pH 5.23 olarak tespit edilmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi örneklerin kimyasal içeriğinin geniş bir aralıkta değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun Bitlis Tulum peyniri üretiminde standart bir yöntem olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim Canözer ve Köse (2022), Köse ve ark. (2022) ve Kara ve Köse (2020) tarafından geleneksel yöntemle üretilmiş ve standart bir üretim yöntemine sahip olmayan Diyarbakır Örgü peyniri, Malatya peyniri ve Van Otlı peyniri üzerine yapılan çalışmalarda da peynirlerin kimyasal içeriğinin geniş bir aralıkta değişim gösterdiği saptanmıştır.

Türk Gıda Kodeksi Peynir Tebliği'ne göre yarım yağlı ve az yağlı tulum peynirlerinde nem miktarının en çok %50 olması gerektiği belirlenmiştir (Anonim, 2015). Çalışmamızdaki örneklerin kuru madde değerlerine baktığımızda sadece 1 örneğimizin (17. örnek %49.22) kuru madde değerlerinin tebliğle uyumlu olmadığı, diğer örneklerin kuru madde değerinin ise tebliğle uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Bitlis Tulum peyniri örneklerine ait kimyasal analiz sonuçları

Örnek No	KM(%)	Yağ(%)	Protein (%)	l.a (%)	Tuz (%)	Kül (%)	pH
1	54.29	30.50	18.21	1.41	3.48	3.89	5.21
2	59.57	33.00	21.12	1.36	3.49	3.78	5.54
3	59.80	33.00	19.94	1.49	4.01	4.43	5.58
4	60.34	30.50	21.37	1.46	3.86	4.57	5.16
5	61.65	31.50	24.85	1.22	3.43	3.68	4.96
6	59.88	31.00	21.21	1.26	4.30	5.33	5.47
7	58.84	28.50	25.74	1.38	3.05	3.33	5.01
8	55.92	27.00	20.61	1.49	4.48	5.42	5.09
9	58.54	30.50	19.11	1.33	3.35	5.63	5.31
10	62.45	34.00	21.72	1.19	2.57	3.36	5.07
11	60.08	34.50	20.86	1.38	2.29	3.47	5.09
12	57.78	30.50	21.25	1.55	2.54	3.39	5.15
13	57.19	26.50	23.29	1.52	5.53	6.38	5.22
14	66.18	36.25	22.55	1.06	4.02	5.18	4.48
15	60.99	34.50	21.25	1.27	3.21	3.69	4.97
16	55.61	31.00	18.53	1.41	3.11	3.85	4.93
17	49.22	25.50	18.79	1.03	2.26	3.23	4.61
18	64.52	33.00	23.03	1.22	3.10	4.75	5.38
19	62.04	31.20	22.52	1.22	2.54	4.71	5.72
20	60.32	33.50	20.26	1.30	3.52	5.75	5.23
21	58.77	30.50	20.61	1.27	4.02	6.00	5.20
22	51.76	27.00	19.27	1.11	2.47	3.63	5.69
23	57.18	30.00	22.55	1.33	2.54	3.41	5.16
24	61.17	35.50	19.84	1.41	2.68	3.40	4.98
25	60.40	29.50	23.03	1.03	3.03	4.92	5.80
26	56.80	30.00	21.60	0.38	1.69	3.85	6.01
27	52.47	25.75	18.95	1.22	3.52	5.21	5.05
28	59.06	30.50	19.65	0.89	3.95	5.86	5.57
Ortalama	58.70	30.96	21.10	1.25	3.28	4.41	5.23
Min.	49.22	25.50	18.21	0.38	1.69	3.23	4.48
Max.	66.18	36.25	25.74	1.55	5.53	6.38	6.01
S.S.	3.58	2.80	1.80	0.23	0.79	0.95	0.34

Bitlis Tulum peyniri örneklerinin WSN değerinin % 6.97 ile 24.38, % 12 TCA-SN değerinin % 5.03 ile 18.48, %5 PTA-ÇN değerinin % 3.17 ile 12.82 ve lipoliz oranının 3.34 ile 24.82 ADV aralığında değişim gösterdiği saptanmıştır. Çizelge 2 incelendiğinde peynir örneklerinin WSN, TCA-SN, PTA-SN ve lipoliz değerlerinin geniş bir aralıkta değişim gösterdiği tespit

edilmiştir. Bu durumun kullanılan süt çeşidinden, tuz oranından ve olgunlaşma süresinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim, Köse ve Ocak (2022) tarafından Otlı peynir üzerine yapılan çalışmada salamurada depolanan peynirlerin WSN, TCA-SN, PTA-SN ve lipoliz oranının vakum ambalajda depolanan peynirlere göre daha düşük olduğu, peynirde tuz oranı arttıkça proteoliz ve lipoliz değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Aynı çalışmada depolama süresi boyunca zamana bağlı olarak WSN, TCA-SN ve PTA-SN değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Eser ve ark. (2020) yılında kefir kültürü kullanarak çiğ süttten ürettikleri tulum peynirlerinde proteoliz ve lipoliz değerlerinin pastörize süttten üretilen peynirlere göre daha yüksek olduğunu ve bu durumunda çiğ sütteki mikroorganizma ve enzim çeşitliliğinden kaynaklandığını bildirmiştir. Benzer şekilde Ocak ve ark. (2015) çiğ süttten yapılan peynirlerdeki mikrobiyal yükün fazla olduğunu ve pastörizasyon işleminin süttün doğal lipazını tahrip ettiğini bildirmiştir (McSweeney, 2004).

Çizelge 2. Geleneksel Bitlis Tulum peyniri örneklerine ait biyokimyasal analiz sonuçları

Örnek No	WSN %	TCA-SN %	PTA-SN %	Lipoliz (ADV)
1	13.73	11.04	7.61	4.81
2	13.62	10.50	7.46	11.92
3	21.77	16.74	10.28	8.52
4	12.79	9.29	6.86	9.80
5	11.50	6.69	4.31	12.56
6	22.65	11.68	8.62	7.24
7	11.03	9.55	6.06	11.76
8	13.00	10.48	7.02	9.68
9	12.81	9.56	6.54	7.52
10	13.40	10.44	7.24	12.99
11	10.53	7.62	3.94	20.61
12	13.29	10.01	8.45	4.38
13	11.05	8.51	6.49	6.00
14	6.97	5.03	3.17	24.82
15	14.21	10.18	6.14	4.86
16	9.16	7.00	4.86	6.96
17	12.65	7.74	3.99	3.96
18	11.87	8.56	5.47	3.69
19	12.77	8.57	5.39	5.13
20	11.73	8.87	6.97	18.39
21	8.93	6.89	4.63	14.90

22	24.38	18.48	12.82	8.51
23	15.45	11.18	8.71	4.57
24	11.43	8.18	5.67	4.59
25	18.85	13.42	8.76	4.28
26	17.21	12.66	7.79	4.40
27	21.02	12.69	8.15	3.34
28	12.55	7.94	4.36	7.44
29	9.25	6.85	4.81	6.52
Ortalama	13.78	9.87	6.64	8.76
Min.	6.97	5.03	3.17	3.34
Max.	24.38	18.48	12.82	24.82
S.S.	4.20	2.88	2.08	5.31

Bitlis Tulum peyniri örneklerinde ortalama Ca 2516.58 mg/kg, Na 2945.90 mg/kg, Mg 331.61 mg/kg, K 657.90 mg/kg, Fe 6.92 mg/kg, P 5224.67 mg/kg, Cu 1 mg/kg, Mn 0.32 mg/kg ve Zn 24.80 mg/kg olarak saptanmıştır. Çizelge 3’de görüldüğü gibi Bitlis Tulum peynirlerinin mineral madde içerikleri arasında önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen bu farklılıklar kullanılan süt çeşidi, laktasyon periyodu, genetik faktörler ve olgunlaşma düzeyi gibi faktörlerden kaynaklanabileceği gibi, peynir üretiminde kullanılan ot çeşidi ve miktarı farklılığından ve standart bir üretim metodu kullanılmamasından da kaynaklanabilmektedir (Ocak ve Köse, 2015; Altun ve Köse, 2016; Köse ve Ocak, 2019).

Çizelge 3. Geleneksel Bitlis Tulum peyniri örneklerine ait mineral madde sonuçları
(mg/kg)

Örnek No	Ca	Na	Mg	K	Fe	P	Cu	Mn	Zn
1	2328.81	2719.70	307.76	646.83	9.56	3224.15	1.20	0.39	15.47
2	2533.59	3014.18	264.83	685.13	5.31	3206.26	0.41	0.08	23.35
3	2470.29	2959.81	413.11	605.55	2.98	4158.00	0.38	0.26	17.13
4	2539.45	2994.09	321.69	533.42	0.56	4029.70	0.72	0.36	21.57
5	2091.42	2564.63	326.46	590.65	6.16	3267.91	0.61	0.32	17.63
6	2714.78	3029.16	310.87	669.07	2.98	5077.09	0.27	0.08	22.23
7	2226.19	2530.77	252.71	573.83	2.40	3745.78	1.06	0.25	15.21
8	2728.83	3258.88	279.23	704.41	3.05	4827.35	1.22	0.15	20.33
9	2329.18	3057.01	274.39	583.35	2.08	3185.47	0.59	0.20	21.74
10	2390.48	2671.13	325.56	567.90	1.54	4165.89	0.65	0.21	25.75
11	2605.39	2902.53	313.19	559.98	3.40	4225.18	0.86	0.14	26.71
12	2365.76	2601.58	320.06	615.61	1.82	6620.03	0.33	0.34	26.39
13	3086.82	3478.61	424.80	738.07	4.20	6218.45	0.88	0.24	37.06
14	2281.20	3111.68	220.58	568.62	2.35	3358.53	0.48	0.06	20.10
15	2164.16	2374.34	294.11	649.75	4.71	4410.31	1.23	0.42	27.55
16	2804.41	3077.01	312.17	538.22	6.32	5556.21	0.86	0.10	20.55
17	2016.51	2727.35	302.89	843.58	7.15	2722.59	0.65	0.12	16.96
18	2530.85	2893.80	366.27	712.01	4.24	5854.17	1.48	0.30	35.57
19	2583.27	3064.56	340.66	583.56	8.67	5938.76	1.18	0.45	31.45
20	2613.35	3038.53	413.90	727.89	9.97	7631.51	1.64	0.56	43.65
21	2605.35	3300.92	298.83	666.11	7.98	4840.28	0.87	0.24	17.05
22	2976.01	3240.02	566.14	779.92	17.45	11649.32	1.97	1.11	41.30
23	2648.92	2966.66	308.72	638.83	17.18	5257.85	1.69	0.53	25.41
24	2587.41	2832.93	370.34	559.09	12.68	10119.93	0.73	0.84	35.45
25	2538.32	2844.28	309.17	710.40	5.98	6732.14	1.33	0.15	29.42
26	2259.89	2843.17	388.61	680.44	19.32	3873.59	1.90	0.55	18.86
27	2406.78	2749.23	353.14	942.46	11.54	6297.24	1.40	0.33	26.88
28	2806.29	3502.14	334.30	766.89	7.55	5476.96	1.51	0.51	23.21
29	2746.99	3082.24	302.25	637.61	11.72	5844.85	0.85	0.07	15.17
Ortalama	2516.58	2945.90	331.61	657.90	6.92	5224.67	1.00	0.32	24.80
Min.	2016.51	2374.34	220.58	533.42	0.56	2722.59	0.27	0.06	15.17
Max.	3086.82	3502.14	566.14	942.46	19.32	11649.32	1.97	1.11	43.65
S.S.	247.60	264.62	64.28	94.00	4.95	1985.73	0.47	0.23	7.71

Süt yapısında yer alan proteinler, enzimler, vitaminler, fenolik bileşikler, karotenoidler ve organik asitler sayesinde antioksidan etki

gösteren kompleks bir gıda maddesidir (Taşkın ve Bağdatlıoğlu, 2011). Sütte fenol, kresol, timol ve karvakrol gibi çeşitli fenolik bileşikler bulunmaktadır. Fenolik bileşikler, sütün hem duyuşal özellikleri hem de mikrobiyolojik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynayan hem besleyici hem de fonksiyonel bileşenlerdir (O'Connell ve Fox, 2001).

Geleneksel yöntemle üretilen Bitlis Tulum peyniri örneklerinin TFM değeri en düşük 833 mg GAE/kg, en yüksek 2279.11 mg GAE/kg ve ortalama ise 1554.13 mg GAE/kg olarak bulunmuştur. Canözer ve Köse (2022), geleneksel yöntemle üretilen Örgü peyniri örneklerinin ortalama TFM değerini 811.14 mg GAE/kg, Köse ve ark. (2022) geleneksel yöntemle üretilen Malatya peynirlerinin ortalama TFM konsantrasyonunu 514.97 mg GAE/kg, Kara ve Köse (2020) geleneksel yöntemle üretilen salamurada muhafaza edilen Otlı peynirlerin ortalama TFM içeriğini 647.72 mg GAE/kg olarak tespit etmişlerdir. Elde edilen TFM verilerinin literatürdeki verilerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun kullanılan süt çeşidinden, tuz oranından, üretim yönteminden ve olgunlaşma koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Gıdalarda antioksidan maddeler, yapıda bulunan oksidasyona hassas olan yağ gibi maddelerin oksidasyonunu engelleme ya da geciktirme görevine sahip maddeler olarak tanımlanmıştır (MacDonald-Wicks ve ark., 2006). Gıdaların antioksidan kapasitesinin belirlenmesi için kullanılan radikal sistemin sonuçları etkileyebileceği bilindiğinden seçilen bir antioksidanın radikal yakalama kapasitelerini araştırmak için iki veya daha fazla radikal sisteme ihtiyaç duyulmaktadır (Phanturat ve ark., 2010). Bu amaçla, Bitlis Tulum peyniri örneklerinin antioksidan aktivitesini belirlemek amacıyla DPPH ve ABTS testleri kullanılmıştır.

Bitlis Tulum peyniri örneklerinin DPPH inhibisyon değeri en düşük %11.35, en yüksek %57.86 (Şekil 4.22) ve ortalama %35.52 olarak bulunmuştur. Köse ve ark. (2022), geleneksel yöntemle üretilen Malatya peynirlerinin DPPH inhibisyon oranını % 13.89, Kara ve Köse (2020) geleneksel yöntemle üretilen salamura Otlı peynirlerin ortalama DPPH inhibisyon değerini % 6.58, Canözer ve Köse (2022) geleneksel yöntemle üretilen Diyarbakır Örgü peynirlerinin ortalama DPPH inhibisyon oranını % 5.17 olarak saptamıştır. Elde edilen verilerin literatürdeki değerlerden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durumun kullanılan süt çeşidinden, üretim yönteminden ve olgunlaşma koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bitlis Tulum peyniri örneklerinin TEAK değeri en düşük 1.53 mmol TE/g, en yüksek 4.17 mmol TE/g ve ortalama 2.75 mmol TE/g olarak bulunmuştur. Canözer ve Köse (2022) geleneksel yöntemle üretilen Diyarbakır Örgü peynirlerinin ortalama TEAK değerlerini 3.19 mmol TE/g, Kara ve Köse (2020) basma yöntemiyle olgunlaştırılan Otlı peynirlerin ortalama TEAK değerlerini 1.62 mmol TE/g, Yaşar (2021) geleneksel yöntemle üretilen Malatya peynirinin TEAK değerini en düşük 1.25 mmol

TE/g (2. gün), en yüksek 5.24 mmol TE/g (120.gün) olarak tespit etmiştir. Elde edilen verilerin literatürle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge **Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı..** Bitlis Tulum peyniri örneklerinin toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite içerikleri

Örnek No	TFM (mgGAE/kg)	DPPH inhibisyon %	TEAK (mmol TE/g)
1	1656.33	15.54	2.85
2	1522.44	12.24	3.01
3	1884.11	11.80	2.99
4	1842.44	11.35	2.80
5	2112.44	57.10	2.22
6	1703.00	12.05	4.17
7	1676.89	17.03	2.91
8	1411.33	15.81	2.40
9	1099.11	19.19	2.94
10	1901.89	49.10	3.27
11	1213.00	15.50	2.92
12	1904.67	45.20	3.35
13	1175.22	15.79	2.51
14	833.00	15.95	1.53
15	1536.33	40.25	3.23
16	1090.78	53.56	2.00
17	1780.22	43.23	2.48
18	1736.89	19.68	2.87
19	1866.89	35.55	3.60
20	1036.33	55.24	2.45
21	1165.78	57.86	2.47
22	2279.11	52.89	3.84
23	1559.11	49.66	2.81
24	1190.78	50.81	2.14
25	2006.89	56.38	3.02
26	1958.00	46.20	1.93
27	1731.33	44.20	2.35
28	1096.89	55.38	2.52
29	1098.56	55.58	2.15
Ortalama	1554.13	35.52	2.75

Min.	833.00	11.35	1.53
Max.	2279.11	57.86	4.17
S.S.	375.71	17.87	0.57

SONUÇ

Bu çalışma, Bitlis Tulum peynirinin proteoliz ve lipoliz derecesi, toplam fenolik madde, antioksidan aktivite ve mineral madde içeriği konusunda literatürdeki eksikliklerin giderilmesi açısından bir referans olarak kabul edilebilir. Çalışmada elde edilen veriler incelendiğinde örnekler arasında önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu varyasyon birçok faktörden etkilenebileceği gibi peynir yapımında kullanılan ot çeşidi ve miktarı farklılığından ve üretimde standart bir tekniğin olmayışından kaynaklanabilmektedir. Bu bakımdan Bitlis Tulum peyniri üzerine daha detaylı bilimsel çalışmalar yapılarak en yakın zamanda standart bir üretim yönteminin belirlenmesi ve coğrafi işaret tescili alması büyük önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Hacer AÇAR'ın Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri koordinasyon birimi FYL-2022-10001 nolu proje kapsamında desteklenen “Geleneksel Yöntemle Üretilen Bitlis Tulum Peynirinin Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yök Tez No:80238) üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Açar, H. 2023. Geleneksel Yöntemle Üretilen Bitlis Tulum Peynirinin Bazı Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Van.
- Altun, İ., ve Köse, Ş. (2016). Geleneksel Kelle peynirinin bazı özelliklerinin belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(4), 642-647.
- Anonim, 1995. TS 3606 Gıdalarda Metal İyonlarının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar, Ankara.
- Anonim. (2015). Türk Gıda Kodeksi Peynir Tebliği (Tebliğ No: 2015/6). 29261 Sayılı Resmî Gazete. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı. Ankara.
- Arslaner, A., ve Türkmen, Ö. (2020). Erzincan Tulum Cheese. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(4), 932-940

- Adiguzel, G., Atasever, M., Karakaya, Y., Aydemir, M., ve Unsal, C. (2009). Chemical, microbiological and sensorial properties of Tulum Cheese. *Asian Journal of Chemistry*, 21(1), 572.
- Bae, S. H., ve Suh, H. J. (2007). Antioxidant activities of five different mulberry cultivars in Korea. *LWT-Food Science and Technology*, 40(6), 955-962.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., ve Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Butikofer, U., Ruegg, M., ve Ardö, Y. (1993). Determination of nitrogen fractions in cheese: Evaluation of a collaborative study. *Lebensmittel wissenschaft und Technologie*, 26(3), 271-275.
- Canozer, C., ve Köse, Ş. (2022). Comparison of some characteristic properties of Diyarbakir Örgü cheese produced by traditional and industrial method. *Food Science and Technology*, 42, e16921.
- Demirci, M., (1990). Peynirin beslenmedeki yeri ve önemi. *Gıda*, 15(5).
- Eser, S., Coşkun, H., ve Sarıca, E. (2020). Kefir starteri kullanılarak üretilen tulum peynirlerinde olgunlaşma boyunca meydana gelen değişimler. *GIDA* (2020) 45(4)710-720 doi: 10.15237/gida.GD20050
- Hastaoğlu, E., Erdoğan, M., ve Işkın, M. (2021). Gastronomi turizmi kapsamında Türkiye peynir çeşitliliği haritası. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25(3), 1084-1113.
- Kara, S., ve Kose, S. (2020). Determination of some quality parameters and bioactivity of Herby cheese produced by traditional method. *GIDA-The Journal of Food* 45(5): 942-953.
- Kırca, A., ve Ozkan, M. (2007). *Değişik amaçlı bazı test ve analiz yöntemleri*. In: Cemeroglu B (ed.), *Gıda Analizleri*. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, Ankara, Türkiye, 535.
- Kose, S., ve Ocak, E. (2019). Mineral composition of Herby cheese produced from raw and pasteurized milk. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 7189-7201.
- Kose, S, Ceylan, M.M., Altun, I., ve Erim Kose, Y. (2022). Determination of some basic properties of traditional malatya cheese. *Food Science and Technology* 42: e03921.
- Köse, Ş., ve Ocak, E. (2022). Otlı peynir örneklerinin lipoliz ve proteoliz değerleri üzerine farklı depolama koşullarının ve otların etkisi. *Yüzyüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(3), 595-611.
- Kamber, U. (2007). Peynirin tarihçesi. *Veteriner Hekimler Derneği Dergisi*, 77(2), 40- 44.
- Kurt, A., Çakmakçı, S., ve Çağlar, A. (2003). *Süt Mamülleri Muayene ve Analiz Metotları Rehberi*. 8.Baskı. Atatürk Üniversitesi Yayınları. Yay. No: 252-D. Erzurum. 284.
- Kuchroo, C. N., ve Fox, P. F. (1982). Soluble nitrogen in Cheddar cheese: comparison of extraction procedures. *Milchwissenschaft: Milk Science International Journal*, 37, 331-335.
- MacDonald-Wicks, L.K., Wood, L.G., ve Garg M.L. (2006). Methodology for the determination of biological antioxidant capacity in vitro: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86: 2046-2056.

- Morul, F., ve İşleyici, Ö. (2012). Divle tulum peynirinin kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 23(2), 71-76.
- McSweeney, P.L.H. (2004). Biochemistry of cheese ripening: Introduction and overview. In: *Cheese: Chemistry, physics and microbiology* Fox PF, McSweeney, P.L.H., Cogan, T.M., Guinee, T.P. (Ed.), Vol.1, Elsevier Academic Press, London. pp 347-360.
- Ocak, E., Tunçtürk, Y., Javidipour, I., ve Köse, Ş. (2015). Farklı tür sütlerinden üretilen Van Otlı peynirlerinde olgunlaşma boyunca meydana gelen değişiklikler: ii. Mikrobiyolojik değişiklikler, lipoliz ve serbest yağ asitleri. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 25(2), 164-173.
- O'Connell, J.E., ve Fox, P.F. (2001). Significance and applications of phenolic compounds in the production and quality of milk and dairy products: a review. *International Dairy Journal*, 11(3): 103-120.
- Phanturat, P., Benjakul, S., Visessanguan, W., ve Roytrakul, S. (2010). Use of pyloric caeca extract from bigeye snapper (*Priacanthus macracanthus*) for the production of gelatin hydrolysate with antioxidative activity. *LWT Food Sci Technol*, 43:86–97. doi: 10.1016/j.lwt.2009.06.010.
- Sancak, H., İşleyici, Ö., Tuncay, R. M., ve Sancak, Y. C. (2018). Geleneksel olarak üretilen Bitlis Tulum peyniri ve kimyasal kalite nitelikleri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 380-389.
- Sert, D., ve Akın, N. (2008). Türkiye’de bazı önemli Tulum peyniri çeşitlerinin geleneksel üretim metotları. *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, 21-23 Mayıs 2008, Erzurum.
- Tekinşen, K. K. (2017). Erzincan Tulum peyniri. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 12(2), 218-226.

Türkiye'de Güneş Enerjisi Görünümünün Genel Değerlendirilmesi

Tarkan KOCA¹

1- Doç. Dr.; İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
tarkan.koca@inonu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6881-4153.

ÖZET

Dünya genelinde artan enerji talebi, nüfusun artması ve teknolojik ilerlemelerle birlikte, güvenilir ve uygun maliyetli yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır. Güneş enerjisi, fosil yakıtların çevresel olumsuz etkileri ve sınırlı kaynakları nedeniyle umut verici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi endüstrisi, gelişmekte olan ülkelerde ekonomik durumun iyileştirmesi ve insanların yaşam kalitesini artırma potansiyeline sahiptir. Güneş fotovoltaiik sistemleri, sınırsız ve temiz bir enerji kaynağı olmaları nedeniyle geleceğin elektrik ihtiyacını karşılamakta önemli bir rol oynayacaktır. Güneş enerjisi endüstrisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha iyi kullanılabilirlik, maliyet etkinliği, erişilebilirlik, kapasite ve verimlilik sunduğu için gelecekteki enerji talebini karşılamak için en ideal seçeneklerden biri olmaktadır. Farklı ülkeler, fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak ve yerel enerji üretimini artırmak için güneş enerjisi politikalarını geliştirmektedirler. Sürdürülebilir kalkınma açısından kritik öneme sahip olan bu teknolojiler, enerji sektöründe büyük bir kapasite oluştururken istihdam yaratma potansiyelini de artırmaktadır. Güneş enerjisi, gelecekteki enerji talebini karşılamak için en iyi seçeneklerden biri olarak belirtilmektedir. Bu çalışmada, güneş enerjisinden elektrik üretmek amacıyla fotovoltaiik sistemler başta olmak üzere Türkiye'nin mevcut durumu ve gelecekteki beklentileri analiz edilmiştir. Türkiye 2023'te 2,7 GW güneş enerjisi ile elektrik üretimi için kurulum yapmıştır. Türkiye, güneş paneli üretiminde Avrupa'da birinci, dünyada ise dördüncü sıradadır. 2024'te ise 4,6 GW kurulum yaparak önemli bir pazar büyümesi sağlayabilecektir.

Anahtar Kelimeler – Enerji, Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, Fotovoltaiik paneller (PV), Güneş potansiyeli.

GİRİŞ

Dünya genelindeki enerji talebi, nüfus artışı ve sanayileşme nedeniyle hızla artmakta, bu durum enerji krizinin önlenmesini zorunlu kılmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler, artan nüfus ve ekonomik kalkınma hedefleri nedeniyle enerji kaynaklarına daha fazla erişim arayışındadırlar. Ancak mevcut fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hayati hale getirmektedir (Nadarajah ve Divagar, 2016:1093).

Güneş enerjisi, en temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Güneş, her saniye insanlığın toplam enerji ihtiyacından çok daha fazla enerji üretebilmektedir (Solangi vd., 2011:2152). Fosil yakıtların giderek azalması, güneş enerjisine olan ilginin artmasına neden olmakta; bu enerji türü, çevre dostu olması ve minimum ekolojik risk taşıması nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir (Sanjay vd., 2016:125).

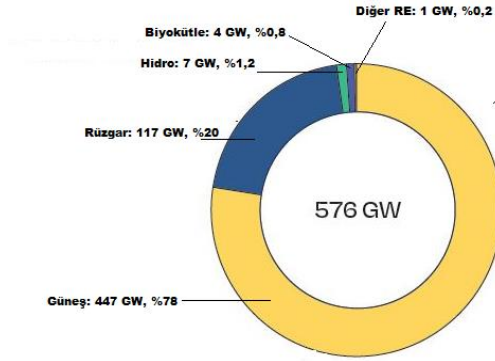
Ancak güneş enerjisi şu anki küresel enerji taleplerinin sadece küçük bir kısmını karşılamaktadır.

Güneş enerjisi teknolojileri, binalarda, tarımda, su pompalamada ve uzaktan elektrik temininde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu teknolojiler, artan verimlilikleri ve esneklikleri ile dikkat çekmektedir. Sürdürülebilir bir gelecek için çevre dostu enerji kaynaklarına geçiş yapmak, iklim değişikliği ve doğal afet risklerini azaltmak açısından kritik öneme sahiptir. Güneş enerjisi, gelecekte enerji güvenliğini sağlamak için en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir (Ehsanul vd., 2018:897).

Güneş enerjisi, Türkiye için büyük bir potansiyel taşımaktadır (Şen, 2004:371). Ülkede elektrik üretimi 2013 ile 2023 yılları arasında %36 oranında artış gösterirken, yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki oranı %29'dan %42'ye çıkmıştır. Türkiye'nin güneş ışınım seviyesi ve güneş enerjisinden elektrik üretme kapasitesi, birçok ülkeye kıyasla oldukça yüksektir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'de güneş enerjisi kurulu gücü ilk kez 10 GW'ı aşarak toplam kurulu gücün %10'undan fazlasını elde etmiştir. 2024-2028 dönemi için planlanan kurulu güç artışının yaklaşık %65'inin güneş enerjisinden geleceği ve toplam kurulu gücün içinde bu enerjinin payının hızla %20'ye yükselebileceği öngörülmektedir (gunder.org.tr). Bu durum, güneş enerjisinin Türkiye'nin yeşil dönüşümünde ve ulusal enerji stratejilerinde merkezi bir rol oynayacağını açıkça ortaya koymaktadır.

GÜNEŞ ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ DURUMU VE GELECEK İÇİN HEDEFLER

2023 yılında, dünya şebekesine bağlı 447 GW yeni güneş kapasitesi, bir kez daha yeni eklenen küresel güç üretim kapasitesine hakim olmuştur. Güneşten elektrik üretimi, 2023 yılında eklenen 576 GW'lık güneş enerjisi kapasitesi ile yeni yenilenebilir kapasitenin %78'ini oluşturmaktadır (<https://www.pwc.com.tr>). Güneşin yeni yenilenebilir enerjideki kapasitedeki payı, 2022'deki %66'lık orandan 12 puan ve 2021'deki %56'lık orandan 22 puan daha fazla artarak önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, güneş enerjisinin dünyada önemli bir enerji kaynağı olduğunu göstermekte olup diğer tüm yenilenebilir teknolojilerin toplamından üç kat daha fazla kapasite oluşturmaktadır.

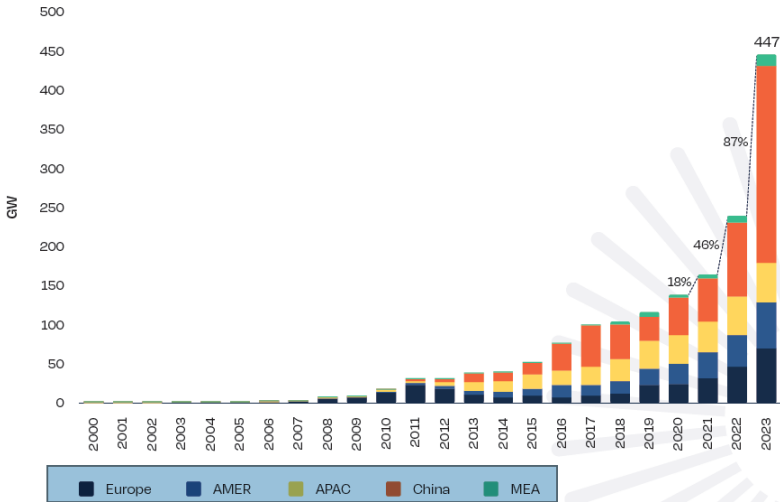


Şekil 1: 2023 Yılında Kurulan Net Yenilenebilir Güç Üretim Kapasitesi (Kaynaklar: GWEC (2024), IRENA (2024), SolarPower Europe.)

Şekil 1’de görüldüğü gibi 447 GW’lık yeni güneş kapasitesi, %78’ lik bir büyüme ile önemli bir yol katetmiştir. 2022 yılında 239 GW’lık bir artış gerçekleşmiş ve yıllık %46 büyüme elde edilmiştir.

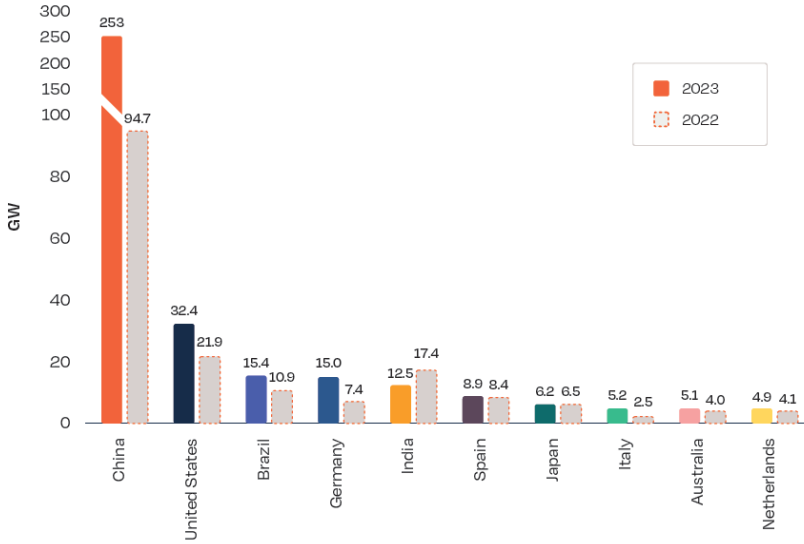
Dünyada çeşitli nedenlerden dolayı oluşan tedarik zinciri sorunları ve farklı zamanlarda yaşanan küresel enerji krizleri de kurulu güneş kapasitesindeki artışa neden olmuştur. Ayrıca güneş panellerinin maliyetlerinin düşmesi kapasite artışına oldukça yardımcı olmuştur. Ayrıca güneş potansiyeline sahip çoğu ülkeler yüksek enerji fiyatlarına güvenilir ve uygun maliyetli bir çözüm olarak güneş enerjisine yönelmişlerdir (Mekhilef vd, 2011:1778).

Şekil 2 ‘de 2023’teki büyümenin oldukça fazla olduğu görülmekte olup bu küresel pazar genişlemesinin büyük kısmının Çin tarafından olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 2: Yıllık Güneş Pv Kurulu Kapasitesi 2000-2023 (Kaynak Solarpower Europe 2024)

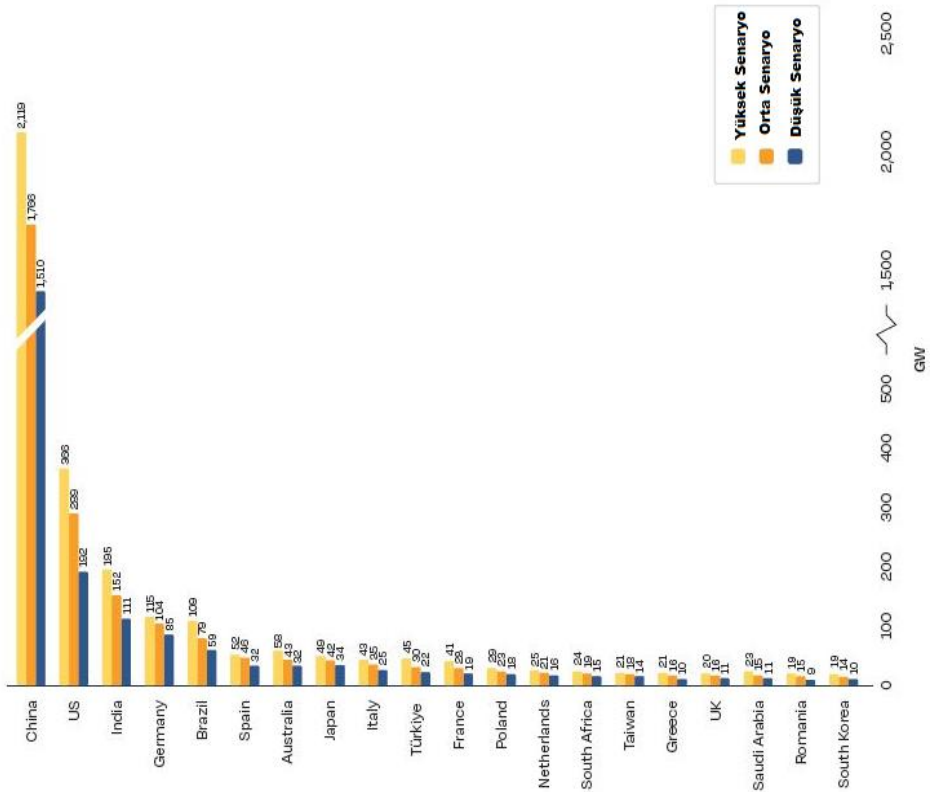
Şekil 3'te görüldüğü gibi Dünyanın en büyük güneş enerjisi ürünü tedarikçisi ve pazarı olan Çin, 2023'te 253 GW yeni güneş PV kapasitesi ekleyerek bir önceki yıla göre %167'lik bir büyüme oranına ulaşmıştır. Diğer tüm ülkeler 194 GW yeni güneş PV kurmuş ve 2022'de kurulan 144 GW'a göre %35'lik bir artışı sağlamıştır (www.solarpowereurope.org).



Şekil 3: 2022-2023 Yıllarında Güneş PV Pazarı (Kaynak Solarpower Europe 2024)

Amerika Birleşik Devletleri, 2023'te 32,4 GW'lık güneş PV şebekesine bağlı olarak %48'lik bir büyüme oranı kaydetmiştir. Almanya ise 2023'te 15 GW kurulum yapmıştır. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde ilk 10 ülke 2023'te küresel güneş PV pazarının %80'ini temsil etmektedirler. Dünyada toplam yenilenebilir enerji kapasite artışı 2022 yılına göre 214 GW daha yüksektir. 2023 yılı yenilenebilir enerjinin küresel elektrik üretiminin %30'una ulaştığı bir yıl olmuştur. Güneş enerjisi hala toplam elektrik talebinin düşük bir kısmına karşılık gelip 2023'te küresel güç üretiminin yalnızca %5,5'ini oluşturmaktadır. Tüm dünyada güneş enerjisinin payı 2023'te yüzde 1 puan artarken, 2022'de yüzde 0,8 puan ve 2020 ile 2021 arasında yüzde 0,5 puan artmıştır (www.solarpowereurope.org). Bütün yenilenebilir enerji kaynakları 2023 yılı itibarıyla toplam dünyanın güç üretiminin %24,7'sini sağlamıştır. 2023'te Asya-Pasifik ve Çin dışında hiçbir bölge pazar payını artırmayı başaramamıştır. Şekil 4'de görüldüğü gibi Çin devletinin kurulumu, dünyadaki 2023 yıllık kurulumlarının yarısından fazlasını yani küresel payın %57'sini oluşturmaktadır. Bu durum 2022'de %40 ve 2021'de %33 civarındadır. Avrupa'da güneş enerjisi pazarı güçlü performansını sürdürmektedir. 2021'de %34 ve 2022'de %45 büyüme oranlarının ardından

bölge, 2023'te 70,1 GW'a çıkarak yıllık %51'lik bir pazar artışı yaşamıştır. Yani dünya pazarına %16'lık bir katkı sağlamıştır. Avrupa'da, 2023 yılı itibariyle Almanya ilk sırada yer almaktadır. Yerleşik güneş enerjisi pazarları açısından İtalya 5,2 GW, Hollanda 4,9 GW, Polonya 4,6 GW ve Fransa 3,2 GW kurulum gücüne sahiptir. Ayrıca Türkiye %69' luk artışla 2,7 GW'ı aşmıştır. Avrupa Birliği ise 2022 yılında %50 büyümeye kaydetmiş olup 2023 yılında güneş enerjisi kurmayan tek ülke Danimarka'dır. Türkiye 2023'te 2,7 GW güneş enerjisi ile elektrik üretimi için kurulum yapmıştır. 2024'te ise 4,6 GW kurulum yaparak önemli bir pazar büyümesi sağlayabilecektir. Birleşik Krallık'ın ise 2024'te 2,4 GW'a ulaşması ve AB dışında ikinci büyük pazar konumunu sürdürmesi beklenmektedir. İsviçre'nin ise 2024'te 1,9 GW'lık kurulum ilave etmesi ile yıllık %23 büyümeye kaydetmesi düşünülmektedir. Dünya sıralamasında ilk 10 arasında, Brezilya İspanya'yı geçerek ilk 5'e girmiştir (www.solarpowereurope.org). İtalya 10. sıradan 9. sıraya yükselmiş ve Türkiye 2023 yılında 18. sıradan üst sıralara doğru hızlı bir yükseliş göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 4: 2024-2028 Yılları Arasında Güneş Pv Artışları İlk 20 Pazarı (Kaynak Solarpower Europe 2024)

Tablo 1’ de, 2024-2028 döneminde yaklaşık 1,8 TW kurulu güç ilavesi yapması beklenen Çin’in güneş enerjisi konusunda oldukça önemli bir yerde olduğu görülmektedir. Çin ve Amerika Birleşik Devletleri’nin ardından Hindistan’ın 152 GW yeni kurulum yapması beklenmektedir. Almanya’nın ise 104 GW ilave kurulum yapması tahmin edilmektedir (www.solarpowereurope.org).

Tablo 1: Önde Gelen Güneş PV Pazarlarının Beklentileri (Kaynak: Global Market Outlook Supported by: www.solarpowereurope.org, For Solar Power 2024-2028)

Ülke	2023 Toplam Kapasite (MW)	2028’e kadar Toplam Kapasite Orta Senaryo (MW)	2024-2028 Yeni Kapasite (MW)	2024-2028 Yıllık Büyüme Oranı
Çin	656.045	2.422.149	1.766.104	%30
ABD	173.185	462.443	289.258	%22
Hindistan	90.069	241.738	151.669	%22
Almanya	82.979	186.498	103.519	%18
Brezilya	39.443	118.356	78.913	%25
İspanya	36.273	82.251	45.978	%18
Avustralya	36.109	79.043	42.934	%17
Japonya	90.357	131.889	41.532	% 8
İtalya	29.844	64.388	34.544	%17
Türkiye	12.239	42.553	30.314	%28
Fransa	18.912	47.401	28.489	%20
Polonya	16.832	39.442	22.610	%19
Hollanda	22.916	44.061	21.145	%14
Güney Afrika	9.291	28.634	19.343	%25
Tayvan	12.443	30.591	18.148	%20
Yunanistan	7.149	23.436	16.287	% 27
Birleşik Krallık	17.697	33.419	15.722	%14
Suudi Arabistan	3.181	18.649	15.468	% 42
Romanya	3.350	18.130	14.780	%40
Güney Kore	27.252	41.100	13.848	% 9

GÜNEŞ ENERJİSİNİN TÜRKİYE’DEKİ DURUMU VE GELECEK İÇİN HEDEFLER

2023 yılı itibarıyla Türkiye’nin toplam kurulu güç kapasitesi 106.668 MW’a ulaşırken, bu kapasitedeki artış 2.859 MW olmuştur. Yeni güneş enerjisi santralleri devreye alındığında, toplam güneş PV gücü 11 GW’ı geçmiştir. Türkiye’deki PV sistemleri, çatı güneş enerjisi santralleri, öz tüketim amaçlı arazi sistemleri, hibrit ve depolama tesisleri gibi çeşitli kategorilere yayılmaktadır. Son on yılda PV modülü üreten fabrika sayısı 3’ten 70’e yükselmişken, yıllık toplam üretim kapasitesi 25-30 GW arasındadır. Hücre geliştiren iki firma ise 1,8 GW kapasiteye ulaşmıştır; hücre

yatırımcılarının sayısı da artış göstermektedir. Güneş modülü fabrikalarında yaklaşık 15.000 kişi, alt sanayide 8.000 kişi, inşaat ve alüminyum sektörlerinde ise 5.000 kişi istihdam edilmektedir. Türkiye'nin güneş PV sektörü, toplamda 40.000 ile 45.000 arasında tam zamanlı çalışana sahiptir ve doğrudan 150.000, dolaylı olarak ise 200.000 kişiye istihdam sağlamaktadır (www.gunder.org.tr).

Türkiye, güneş enerjisi kapasitesini 2035 yılına kadar 52,9 GW'a çıkarmayı hedeflemekte ve 2028 yılına kadar 30 GW'a ulaşacağı öngörülmektedir. Bu hedefe ulaşmak için 2024-2028 yıllarında her yıl 3,4 GW eklenmesi gerekecektir. 2013-2023 yılları arasında elektrik üretimi %36 artarken, yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı %29'dan %42'ye yükselmiştir (www.gunder.org.tr).

Güneş enerjisi üretimi, tarımsal GES, yüzer GES ve hibrit depolama tesisleriyle önemli ölçüde artış göstermektedir.

SONUÇ

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici olanlardan biridir. Mevsimsel hava değişimlerine karşı dayanıklılığıyla dikkat çekmektedir. Güneş enerjisi, güneş termal ve fotovoltaiik (PV) sistemler aracılığıyla çeşitli uygulamalara yönlendirilebilmektedir. Fosil yakıtlar ve kömürle üretilen enerjiye göre, daha basit ve çevre dostu bir alternatiftir. Küresel enerji talebinin artışı göz önünde bulundurulduğunda, güneş enerjisine geçiş oldukça mantıklı bir seçenek olarak görünmektedir.

Güneş enerjisi, Türkiye'nin enerji çeşitliliğinde önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye son yıllarda bu pazarda payı artırma yönünde ilerleme kaydetmiştir. Türkiye, güneş kapasitesi açısından oldukça önemli bir bölgededir. Birkaç yıl içinde güneş paneli alanında en büyük üreticilerden biri olma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, Türkiye'de üretilen güneş hücreleri, güneş santrali kurmak isteyenler için maliyeti oldukça düşürmektedir. Bu çalışma, karar vericiler ve proje geliştiriciler için stratejik bir rehber olabilir. Ülkenin fosil yakıtı gerçekten temiz, yenilenebilir ve güvenli olan yeni yakıt kaynaklarına doğru değiştirmeye yönelmesiyle birlikte Türkiye'deki yenilenebilir enerjilerin önümüzdeki yıllarda temel bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir.

REFERANSLAR

- Dünyada ve Türkiye'de Güneş Enerjisi Sektörü, <https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/enerji/yayinlar/2024/pdf/dunyada-ve-turkiyede-gunes-enerjisi-sektoru.pdf> adresinden 10 Ağustos 2024 tarihinde alınmıştır.
- Ehsanul, K., Pawan, K., Sandeep, K., Adedeji, A. A., ve Ki-Hyun, K. (2018). Solar energy: Potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (1), 894-900.

Global Market Outlook Supported by: www.solarpowereurope.org, For Solar Power 2024-2028), adresinden 8 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

Mekhilef, S., Saidur, R., ve Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 1777-1790.

Nadarajah, K., ve Divagar, V. (2016). Solar energy for future world: - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.

Solangi, K.H., Islam, M.R., Saidur, R., Rahim, N.A., ve Fayaz H. (2011). A review on global solar energy policy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 2149-2163.

Sanjay, K. K., Atul, S., ve Biswajit R. (2016). Solar energy market developments in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 121-133.

Şen, Z. (2004). Solar energy in progress and future research trends, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (4), 367-416.

Türkiye’de Güneş Enerjisi Sektörü, gunder.org.tr adresinden 12 Ağustos 2024 tarihinde alınmıştır.

Güneş Paneli Üretimi

Tarkan KOCA¹

1- Doç. Dr.; İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
tarkan.koca@inonu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6881-4153.

ÖZET

Enerji, çeşitli biçimleri aracılığıyla zenginliğin önemli nedenlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Suyun, kömürün, petrolün ve diğer değerli madenlerin yanı sıra rüzgâr ve güneş gibi kaynaklar da önemli zenginlik unsurlarıdır. Yenilenebilir enerji son yıllarda enerji kaynakları arasında giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Her yeni gün artan enerji talebi, artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte sürekli olarak yükselmektedir. Bu durum, fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en dikkat çeken güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik artan küresel talep karşısında kritik bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek için güneş enerjisi hem çevresel avantajları hem de ekonomik potansiyeli ile öne çıkmaktadır. Güneş paneli üretimi, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için hayati bir sektör olup, hem ekonomik hem de çevresel avantajlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerjiye artan ilgi ve yatırımlar, güneş enerjisinin potansiyelini maksimize ederek daha temiz ve sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adım atılmasını sağlamaktadır. Güneş paneli üretim süreci, karmaşık ve çok aşamalı bir yapıya sahiptir. Bu süreç, hammadde temininden nihai ürünün montajına kadar birçok aşamayı içermektedir.

Bu çalışmada, güneş paneli üretim tesisi analiz edilerek örnek bir tesis dizayn edilmiştir. Güneş paneli üretim tesisinde olması gereken makineler hakkında bilgi verilmiştir. Bu alanda çalışacak ve yatırım yapacak insanlara katkı sunulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Enerji, Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, Fotovoltaik paneller (PV), Güneş Paneli Üretim Tesisi

GİRİŞ

Güneş panelleri, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren cihazlardır. Genellikle monokristal ve polikristal panel olmak üzere iki ana tipte üretilirler. Monokristal paneller, daha yüksek verimlilik sunar ve genellikle daha az alan kaplamaktadırlar. Ancak, üretim maliyetleri daha yüksektir. Polikristal paneller ise daha ucuzdur ama verimlilikleri genellikle daha düşüktür ve daha fazla yer kaplamaktadırlar (Nadarajah vd., 2016:1095).

Güneş panelleri, fotovoltaik hücreler içerir. Bu hücreler, güneş ışığını absorbe ederek elektrik akımı üretir. Güneş panellerinin avantajları arasında sürdürülebilir enerji kaynağı olmaları, düşük işletme maliyetleri ve çevre dostu olmaları yer almaktadırlar. Ancak, başlangıç maliyetleri ve yerel iklim koşullarına bağlı olarak verimlilik değişkenlik gösterebilmektedirler. Güneş

enerjisi, hem bireysel kullanımlar (örneğin, evlerde) hem de büyük ölçekli enerji üretimi (güneş tarlaları) için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde ışığın elektriğe çevrilmesi fotovoltaik hücreler aracılığı ile olmaktadır (www.energy.gov). Fotovoltaik hücreler, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Güneş hücreleri yüzeyleri genellikle kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilmektedirler. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışmaktadır (Christian, 2019).

Güneş panelleri, fotovoltaik (PV) hücreler aracılığıyla aşağıda belirtilen sıraya göre elektrik üretmektedirler:

- ✓ Güneş Işığının Emilmesi: Güneş panelleri, genellikle silikon gibi yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Güneş ışığı bu malzemelere çarptığında, fotonlar (ışık parçacıkları) silikondaki elektronları uyarır.
- ✓ Elektronların Serbest Kalması: Güneş ışığı ile uyarılan elektronlar, atomlarından ayrılarak serbest hale gelir. Bu serbest elektronlar, elektrik akımını oluşturmak için hareket etmektedirler.
- ✓ Elektrik Alanı Oluşumu: Güneş hücrelerinde, pozitif ve negatif yüklerin oluşturduğu bir elektrik alanı bulunur. Bu alan, serbest kalan elektronları yönlendirmekte ve akım üretmektedirler.
- ✓ Akımın Toplanması: Elektronlar, panelin iletken metal şeritleri aracılığıyla toplanarak dış devreye yönlendirmekte olup elektrik akımı sağlamaktadırlar.
- ✓ Dönüşüm ve Kullanım: Üretilen doğru akım (DC) elektrik, genellikle bir inverter aracılığıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülmekte olup evlerde ve iş yerlerinde kullanılabilir hale gelmektedir.

Bu süreç, güneş ışığı ile elektrik üretiminde temel bir döngüdür ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır (Mekhilef vd., 2011:1780). Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilmektedirler. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilmektedir (Singh vd.,2024). Bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilmektedir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak farklı sistemler oluşturulmaktadır (www.yegm.gov.tr).

GÜNEŞ PANELİNDEKİ GELİŞMELER

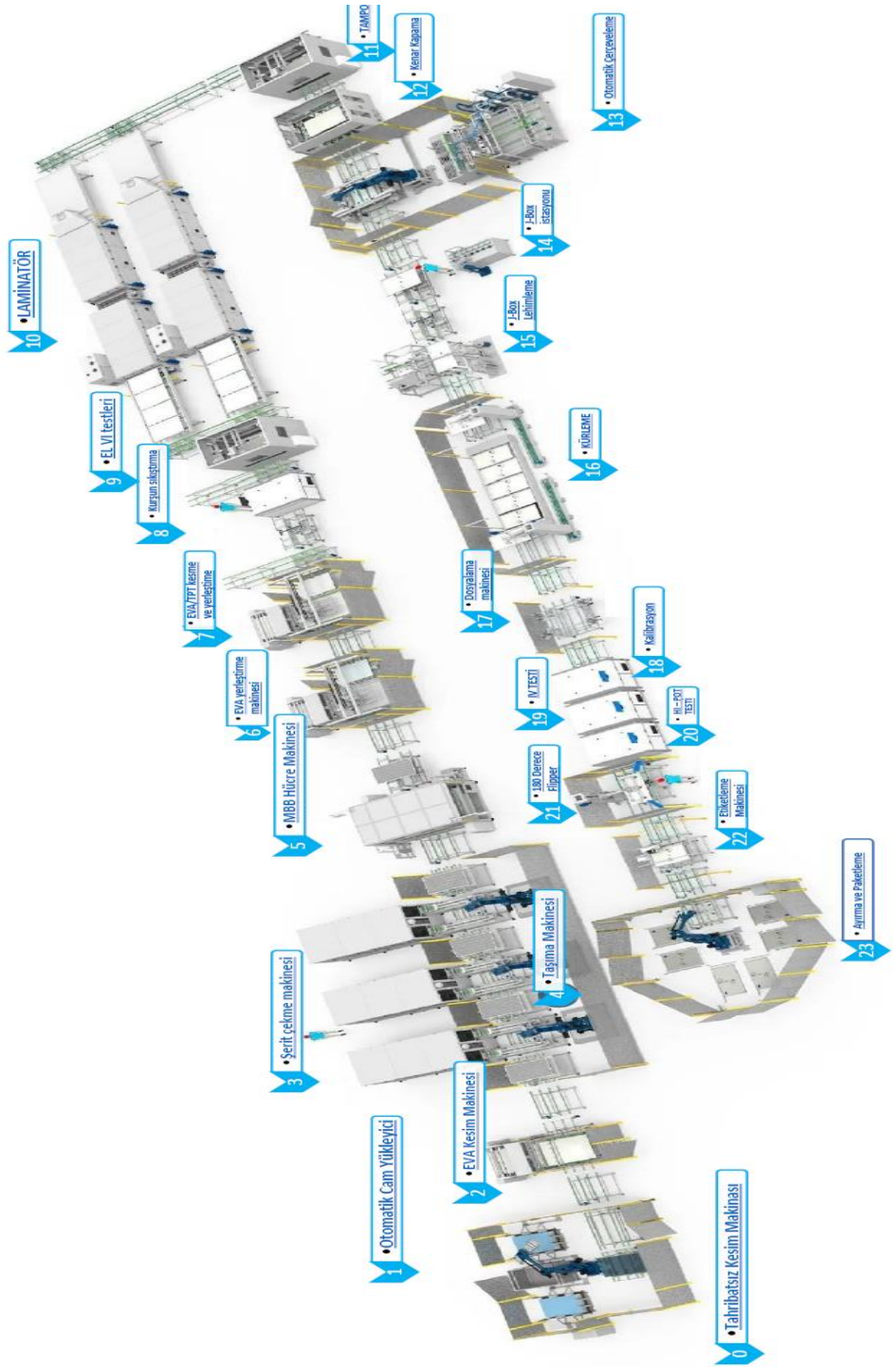
Güneş panellerinde son yıllarda birçok önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Bazı önemli gelişmeler maddeler halinde verilmiştir. Bu gelişmeler, güneş enerjisinin daha yaygın ve etkili bir şekilde kullanılmasını desteklemektedir.

- ✓ Verimlilik Artışı: Gelişmiş malzeme teknolojileri sayesinde, güneş panellerinin verimliliği sürekli artmaktadır. Monokristal paneller, %20'nin üzerinde verimlilik sağlarken, bazı yeni teknolojiler %25-30 ların üzerine çıkabilmektedir.
- ✓ Hafif ve Esnek Tasarımlar: Esnek güneş panelleri, çeşitli yüzeylere uygulanabilir hale gelmekte olup binalarda ve taşınabilir cihazlarda kullanım alanları oldukça genişletmektedir.
- ✓ Bifacial Paneller: Bu paneller, hem ön hem de arka yüzeylerinden ışık alarak daha fazla enerji üretebilmekte olup yansıtma etkisiyle verimlilik artışı sağlanmaktadır.
- ✓ Entegre Çözümler: Güneş panelleri, binaların çatısına entegre edilen yapılar olarak tasarlanmakta olup estetik görünüş ile enerji üretimini birleştirmektedirler.
- ✓ Akıllı Teknolojiler: Güneş panelleri, performans izleme ve bakım süreçleri optimize edilerek takip edilebilmektedir.
- ✓ Depolama Sistemleri: Güneş enerjisi depolama sistemlerinin gelişimi, üretilen elektriğin daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır.
- ✓ Düşük Maliyetler: Üretim süreçlerindeki iyileşmeler ve teknolojik ilerlemeler, güneş paneli maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir.
- ✓ Sürdürülebilir Malzemeler: Çevre dostu ve sürdürülebilir malzemeler kullanarak güneş paneli üretimini daha ekolojik hale getirmektedir.

Güneş panellerinin geleceği yenilenebilir enerjiler arasında oldukça önemli bir yer tutmaktadır (Ehsanul vd., 2018:895). Güneş paneli üretim endüstrisi, verimliliği artırma, maliyetleri düşürme ve ürün kalitesini geliştirme amacıyla önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Molinaro 2017). Bu ilerlemeler, üretkenliği artırmanın yanı sıra, güneş endüstrisini yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişte öncü bir konuma yerleştirmektedir.

GÜNEŞ PANELİ ÜRETİMİ

Güneş paneli için örnek bir tesis Şekil 1'de görülmektedir. Üretim hattındaki makinalar optimum şartlara göre sıralanmıştır.



Şekil 1: Güneş Paneli Üretim Tesisi Şeması

Güneş paneli üretim tesisleri, fotovoltaik (PV) hücrelerin ve güneş panellerinin üretimi için özel olarak tasarlanmış fabrikalardır. Bu tesisler, güneş enerjisinin kullanımını artırmak amacıyla gerekli olan güneş panellerinin seri üretimini gerçekleştirmektedirler (Michael, 2017). Güneş paneli üretim süreci birkaç aşamadan oluşmakta olup bu aşamalar;

- ✓ Hammadde Temini: Üretim için gereken ana hammadde genellikle silikondur. Yüksek saflıkta silikon, PV hücrelerin üretiminde kullanılmaktadırlar.
- ✓ Silikon İşleme: Silikon, blok formuna getirilir ve ardından dilimlenerek ince levhalar haline getirilmektedirler.
- ✓ Fotovoltaik Hücre Üretimi: Wafers, yüzey kaplamaları ve elektriksel bağlantılar ile fotovoltaik hücrelere dönüştürülmektedir.
- ✓ Modül Montajı: Bir araya getirilen hücreler, cam ve arka plaka gibi malzemelerle birleştirilerek güneş panelleri haline getirilmektedirler.
- ✓ Kalite Kontrol: Üretilen paneller, belirli standartlara uygunluk açısından test edilmektedir.

GÜNEŞ PANELİ ÜRETİMİNDE BULUNAN MAKİNELER

Güneş paneli üretim tesisindeki makinalara ait bilgiler aşağıda verilmektedir.



Şekil 2:Tahribatsız Kesim Makinası

Şekil 2’de verilen tahribatsız hücre kesme makinesi, monokristal hücreleri kesebilen tam otomatik bir ekipmandır. Mevcut yeni güneş modülü teknolojisi, küçük aralıklı, negatif aralıklı, büyük boyutlu ve ince film bileşenlerinin paketlenme verimini etkili bir şekilde iyileştirebilmekte ve maliyetleri düşürüp verimliliği artırabilmektedir. Hücreleri 1/2, 1/3 ve 1/4 oranlarında otomatik olarak kesebilmektedir.



Şekil 3: Otomatik Cam Yükleyici (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Otomatik Cam Yükleyci, camı montaj hattındaki tepsiye otomatik ve doğru bir şekilde yerleştirmekte olup cam kağıdını otomatik olarak geri dönüştirmektedir. Camı montaj hattındaki sehpaye otomatik olarak yerleştirmektedir.



şekil 4: Otomatik Yerleştirme Makinası (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Otomatik Yerleştirme Makinası, modülleri yükleme ve boşaltma, panelleri merkezleme ve şeritleri veya baraları doğru şekilde yerleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. EVA yerleştirme makinesi folyoyu otomatik olarak yerleştirmektedir.



şekil 5: EVA Kesim Makinesi (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

EVA kesme ve yerleştirme makinesi, EVA film yükleme, kesme, yerleştirme ve delik delme için kullanılmaktadırlar. Sırt folyosunu otomatik olarak kesmektedir.



Şekil 6: Şerit Çekme Makinesi (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Güneş modülü yapmak için güneş şerit çizme makinesi, esas olarak PV şerit, tel, bakır, kalay ve diğer metal filmler veya diğer şerit malzemeleri için kullanılan güneş fotovoltaik kaynak şeritlerinin kesilmesi için tasarlanmıştır. Genellikle hizalama ve kırık hücre tespiti için kameraları mevcut olup, hücrelerin üzerine şerit lehimler yapmaktadır.



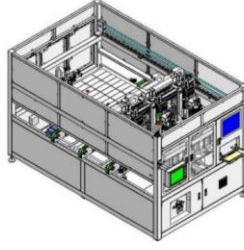
Şekil 7: MBB Hücre Dizici (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

MBB Hücre Dizici ile modüller bu makinede oluşturulup hücreler birbirine lehimlenmektedirler.



Şekil 8: EVA/TPT Kesme ve Yerleştirme Makinesi (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

EVA/TPT kesme ve yerleştirme makinesi ikinci EVA(folyo) ve TPT'yi otomatik olarak kesip yerleştirmektedir.



Şekil 9: Kurşun sıkıştırma makinesi

Kurşun sıkıştırma makinesi laminasyon işleminde kurşun tellerini presleme görevini üstlenmektedir.



Şekil 10: Laminatör

Laminatör modülleri ısıtma ve vakumlama yoluyla kapsülleme görevi görmektedir.



Şekil 11: Tampon (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Tampon modüllerin üretim hattında birikmesini engellemektedir.



Şekil 12: Kenar Kapatma

Kenar kapatma laminasyon sonrasında çift cam modülünün kenar kesimini yapmaktadır.



Şekil 13: Otomatik Çerçeveleme (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Otomatik çerçeveleme modül çerçevelemeyi otomatik olarak gerçekleştirmektedir.



Şekil 14: J-Box istasyonu

J-Box istasyonu bağlantı kutusunu otomatik olarak silikonlamaktadır. J-Box istasyonu Bağlantı kutusunu otomatik olarak lehimlemektedir.



Şekil 15: Kürleme (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Kürleme makinesi ile kürlemeden önce ve sonra, PV modülünün bir bütün olarak getirmekte olup yerleşimi sağlanmaktadır. Daha sonra modüllerin dört köşesinde pah kırma işlemi gerçekleştirmektedir.



Şekil 16: Etiketleme Makinesi (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Etiketleme Makinesi panelin etiketlemesini tam otomatik olarak yapmaktadır.



Şekil 17: Ayırma ve Paketleme (Kaynak: <https://en.confirmware.com>)

Ayırma ve Paketleme ile panel teslim edilecek hale getirilmektedir.

Tüm üretim boyunca önemli testler yapılmaktadır. Bu testler panellerin istenilen güç ve verimde olması için oldukça önemlidir. EL VI testleri ile laminasyondan önce çatlama, kısmi lehimleme veya eksik köşeler, kırılmalar, yabancı nesneler ve hizalamaların görüntüsünde olası hataları otomatik olarak tespit edilmektedir. Kalibrasyon makinesi ile üretim hattındaki modüllerin standartlara uygun olması sağlanmaktadır. IV testi ile güneş panelinin güç testi yapılmaktadır. HI – Pot testi akımda kaçak olup olmadığını tespit etmektedir. 180 Derece Flipper ile panel 180 derece döndürülerek kontrolü sağlanmaktadır.

SONUÇ

Güneş paneli üretimi, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi açısından son derece önemlidir. Artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların çevresel etkileri, güneş enerjisi gibi temiz enerji alternatiflerine yönelimi teşvik etmektedir.

Güneş panellerinin üretim süreçlerindeki teknolojik yenilikler, hem verimliliği artırmakta hem de maliyetleri düşürmektedir. Bu da güneş enerjisinin daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlarken, piyasada rekabeti artırmaktadır. Güneş paneli üretim tesisleri, yerel ekonomilere katkıda

bulunmanın yanı sıra, istihdam yaratma ve çevresel sürdürülebilirliği destekleme konusunda da önemli bir rol oynamaktadır.

Özetle, güneş paneli üretimi, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kritik bir sektör olup, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunmaktadır. Yenilenebilir enerjiye yönelik artan ilgi ve yatırımlar, güneş enerjisinin potansiyelini en üst düzeye çıkararak daha temiz ve sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adım atmaktadır. Güneş paneli üretimi, karmaşık ve çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreç, hammadde temininden son ürünün montajına kadar çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Bir güneş paneli üretim fabrikasının organizasyonu, verimliliği artırmak ve kaliteyi sağlamak amacıyla özenle planlanmalıdır.

REFERANSLAR

- Christian, M. (2019). The history of the invention of the solar panel summary, Energymatters.com. Energymatters.com, adresinden 7 Temmuz 2024 tarihinde alınmıştır.
- Ehsanul, K., Pawan, K., Sandeep, K., Adedeji, A. A., ve Ki-Hyun, K. (2018). Solar energy: Potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (1), 894-900.
- Mekhilef, S., Saidur, R., ve Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (4), 1777-1790.
- Michael, O. (2017). Factors That Can Affect Solar Panel Production, solar.com adresinden 9 Ağustos 2024 tarihinde alınmıştır
- Molinaro, H. (2007). NJIT develops solar-panel production process, Hoboken: Wiley-Blackwell, 63, 16-17.
- Nadarajah, K., ve Divagar, V. (2016). Solar energy for future world: - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1092-1105.
- Singh, V. P., Arya, S. K. ve Shankar, A. (2024). The critical review of solar panels. In AIP Conference Proceedings, 2900 (1). AIP Publishing.
- Solar Panel Production Line, <https://en.confirmware.com>, adresinden 17 Ağustos 2024 tarihinde alınmıştır.
- Photovoltaics Basics, <https://www.energy.gov> , 14 Haziran 2024 tarihinde alınmıştır.
- www.yegm.gov.tr. adresinden 10 Şubat 2024 tarihinde alınmıştır.

Açık Gözenekli Alüminyumun EPS Strafor Üretiminde Kullanılması

Hayrettin EKEL¹
Yahya ALTUNPAK^{1*}

1-Makine Mühendisliği/Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi,
Türkiye*(altunpak_y@ibu.edu.tr)

ÖZET

Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS) üretim prosesinde, polistiren hammaddesi kalıplara iletilmeden önce ön şişirme prosesinde hazırlanır. Hammadde; ön şişirme prosesinde hazırlık işlemi tamamlandıktan sonra EPS enjeksiyon makinasında bağlı olan enjektörler yardımıyla kalıplara doldurulur, buhar kamerasına ürünün pişmesi için kızgın buhar verilir, ürünün ve kalıbın soğuması için soğutma işlemi yapılır, vakumlama işleminden sonra nihai EPS ürünler kalıptan iticiler yardımıyla aşağı düşürülerek kalıptan ayrılmaktadır. EPS üretim sürecinde kullanılan enerjinin çoğunluğu kalıp ısıtma ve soğutma işlemlerinde kullanıldığı için prosesteki bu adımlar oldukça önemlidir. Bu çalışmada, enerji verimliliği açısından karşılaştırma yapabilmek için üretimde kullanılan kalıplar hem geleneksel alüminyumdan (GA) hem de açık gözenekli alüminyumdan (AGA) imal edilmiştir. Geleneksel yöntemle GA malzeme kullanılarak üretilen kalıplarda pişecek ürüne kızgın buhar verebilmek ve daha sonra soğutabilmek için nozul delikleri açılmıştır. Ancak AGA malzemelerden yapılan kalıplara nozul delikleri açılmamıştır. Bu kalıplar enerji verimliliği açısından değerlendirilerek elde edilen bulgular ve deneyimler sonucunda bazı önerilerde bulunulmuştur. Yapılan üretim çalışmaları sonucunda AGA kalıp kullanılan yöntemle de EPS ürünler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Ancak nozul delikleri açılmış GA kullanılan kalıplara göre AGA malzeme kullanılan kalıbın çevrim süresinde yaklaşık % 3,6 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Bunların en büyük nedeninin söz konusu AGA yapılan kalıplarda nozul deliklerinin kullanılmaması olduğu düşünülmektedir. Ancak nozul deliklerinin gözenekli malzeme içerisine de açılmasının kalıp dayanımını düşürebileceği ve konusunda bazı bulgular elde edilmiştir. Ayrıca AGA kalıplardaki sözkonusu gözeneklerden dolayı nihai EPS ürün yüzey kalitesinde bir miktar bozulma gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – EPS Strafor, Açık Gözenekli Alüminyum

I. GİRİŞ

Enerji tüketen ekipmanların enerji verimliliği perspektifiyle iyileştirilmesi, üretim kapasitelerinin artırılması için sürekli eylem planlarının yapılması oldukça önemlidir. Üretim kapasitesini artırmak için de tüm operasyon birimlerinde çevrim sürelerinin araştırılması ve kritik çevrim sürelerinin bulunması ilk yapılması gereken çalışmalardan biridir ([1], [2]). Özellikle Polimer endüstrisinde enerji verimliliği açısından açık gözenekli köpük malzemelerden bazı kalıp uygulamaları, deneme çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Bunun en güzel uygulanabilir örneği olarak termoform ve vakum ile şekillendirme prosesleridir. Bu proseslerde, genel olarak açık gözenekler vakum uygulamalarında ve buhar geçmesi

proseslerinde kullanılmak amacıyla gözenekli metaller tercih edilebilmektedir. AGA malzemeler döküm yöntemiyle üretildiğinden herhangi bağlayıcı malzemesi (tutkal ve reçine gibi) içermediği için 550 °C dereceye kadar yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir [3] Ayrıca AGA malzemeler gözenekli boşluklu yapısı ve aşınmaya karşı dayanımı gibi nitelikleri sayesinde filtre malzemesi olarak, ısı iletkenliğinin çok iyi olmasından dolayı iklimlendirme cihazlarında, soğutucu dolaplarda, elektronik çiplerin soğutulmasında, alev önleyici, eşanjör ve susturucu malzemesi olarak kullanılabilir [4].

Açık gözenekli alüminyum üretiminde döküm yöntemi ve toz metalürji yöntemi gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Döküm yöntemi kullanılarak AGA üretiminde geleneksel döküm kalıpları kullanılmaktadır. Öncelikle döküm kalıbının içi tamamen kristal tuzla doldurulur ve daha sonra erimiş olan alüminyum kalıba dökülerek ve tuz parçacıkların arasından geçmesi sağlanır. Farklı boyutlarda ve şekillerde gözenek elde edilmesi için, farklı boyutlarda tuzlar kullanılmaktadır. Kullanılan bütün tuz tanecikleri birbirlerine temas ettiğinden dolayı, döküm sonrası kristal tuzların temizlenmesi sonrasında arzu edilen açık gözenekli alüminyum malzemeler üretilebilmektedir. Örneğin AA6061 alüminyum alaşımı kullanılarak döküm yöntemiyle açık gözenekli köpük malzeme üretilmiş ve daha sonra bu malzemelere T6 ısıl işlemi de uygulanarak dayanımını artışı sağlanmıştır [5]. Sutygina ve arkadaşları sünger çoğaltma ve dondurma tekniği kullanarak toplam gözenekliliği %87 olan AGA malzeme üretimini yapmışlardır [6]. Diğer bir çalışmada, Fischer ve arkadaşları, farklı kalıp ve döküm sıcaklıklarının denendiği açık gözenekli A356 alüminyum köpük numunelerin üretiminde; kalıp sıcaklığının azaltıldığı ve döküm sıcaklığının ise artırıldığı durumlarda numunelerin basma dayanımının arttığını rapor etmişlerdir [7]. Toz metalürjisi (TM) yöntemiyle de AGA üretimiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır ([7], [5], [9]). Ancak dökümle üretilmiş AGA malzemelerde hacim gözeneklilik oranı yaklaşık %55-65 iken TM üretilen AGA malzemelerin gözeneklilik oranı yaklaşık %30-35 arasındadır. Ayrıca dökümle üretilen malzemeler daha yüksek bir stabiliteye sahiptir ve sinterlenmiş AGA metallerin aksine kolaylıkla parçalanmaz [3].

Genleştirilmiş Polistiren köpük (EPS) malzemeler, şoku emmek ve ürünlerin zarar görmesini önlemek için ekipman ve ürünlerin koruyucu ambalajlanmasında yastıklama malzemesi olarak kullanılır. EPS köpükler, farklı statik gerilme değerleri için yeterli bir basınç dayanımına ve yastıklama özelliğine sahip olmalıdır. EPS köpükler, genellikle buhar enjeksiyon kalıplama tekniği kullanılarak üretilir.

Bu çalışma kapsamında yapılacak kalıplar ve üretimler Mefa Endüstri A.Ş. bünyesinde yapılacaktır. Mefa Endüstri A.Ş. bünyesinde, çeşitli paketleme köpüklerin imalatlarında, EPS enjeksiyon makinelerinde yaklaşık 750 adet kalıp kullanılmaktadır. Mefa firmasının; yıllık EPS üretim

kapasitesi 1.006.500 kg, EPS üretim prosesinde kullanılan yıllık doğalgaz tüketimi 85.606.550 kWh, EPS üretim prosesinde kullanılan yıllık elektrik tüketimi 126.500.000 kWh ve EPS üretim prosesinde kullanılan yıllık su tüketimi ise 161.400 ton' dur. İlgili firma proses sürecini azaltarak üretim kapasitesini arttırmayı ve dolayısıyla enerji verimliliğini, kar oranının ve uluslararası pazarda rekabet gücünü arttırmayı hedeflenmektedir. Firma bünyesinde kullanılan enerjinin yoğunluğu kalıp ısıtma-soğutma çevriminde tüketildiği tespit edildiği için üretim sürecini azaltacak farklı bir kalıp malzemesi arayışı içerisine girilerek üretimde geleneksel alüminyum (GA) malzeme yerine açık gözenekli alüminyumla (AGA) malzemelerin kullanımının denenmesine karar verilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak kalıplar hem GA hem de açık gözenekli alüminyumla AGA imal edilmiştir. Deneme üretimleri sonucunda EPS üretiminde kullanılan bu kalıplar enerji verimliliği açısından değerlendirilerek elde edilen bulgular ve deneyimler sonucunda bazı önerilerde bulunulmuştur. Ayrıca literatürde EPS enjeksiyon kalıp tasarımı ile ilgili yeterli doküman ve çalışma mevcut değildir. Bu çalışma ve sonuçları EPS üretimi alanında çalışan araştırmacılara ve ilgili firmalara fayda sağlayacaktır.

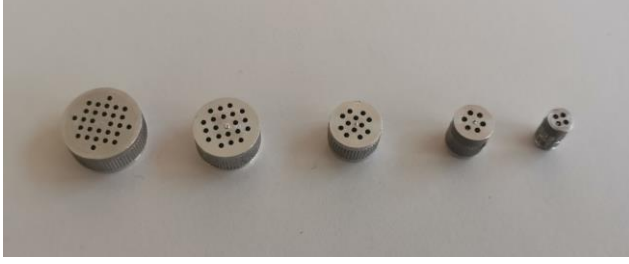
II. MATERYAL VE YÖNTEM

Tüm çalışmalar Mefa Endüstri A.Ş. bünyesinde, EPS köpük üretiminde kullanılan enjeksiyon makinelerinde gerçek çalışma koşulları altında yapılmıştır. Geleneksel kalıp yöntemi ile yapılan kalıpların üretiminde, Seykoç firmasından temin edilen Alurex 5083 serisi GA plakalar kullanılmıştır. Bu çalışma için yeni tasarlanan kalıpların yapımında kullanılan AGA kütük malzemesi özel olarak dökülmüş ve Rusya'daki bir seri üretim firması tarafından temin edilmiştir. Bu AGA malzemelerin özellikleri aşağıdaki gibidir;

Gözenek boyutu: 0,2-0,4 mm arasında

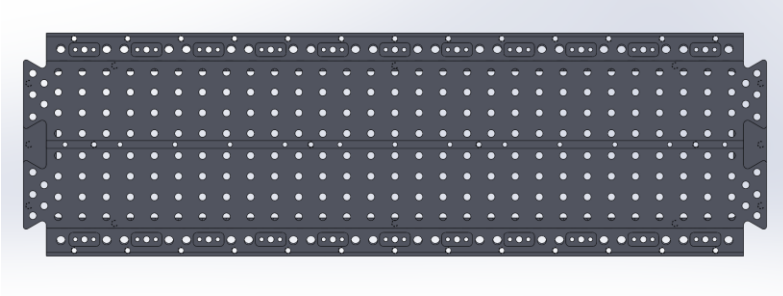
- Açık gözenekli alüminyum malzeme yoğunluğu: 1,05-1,35 g/cm³
- Katı malzemedeki gözeneklilik oranı: %55-60

EPS kalıplarında, dişi ve erkek haznelerdeki ürünü pişirmek için buhar geçirmek, hammadde doldurmak, kalıbı soğutmak ve ürünü kalıptan çıkarmak gibi birçok işlem için alüminyum nozullar kullanılır. Şekil 1'de görülen alüminyum nozullar gözlere sıkı geçme yöntemiyle montajlanmaktadır. Şekil 2'de GA kalıpta erkek çekirdeğe açılacak nozul deliklerinin konumu gösterilmektedir. Eğer mümkünse, EPS kalıplarında genellikle büyük çaplı alüminyum nozullar kullanılması tercih edilir. Bunun sebebi ise, çap küçüldükçe delik sayısının azalması, bunun sonucunda da üretim sürelerinin uzaması ve daha fazla alüminyum nozul kullanılmasıdır. GA kalıplarda aynı boyutta ve konumda yaklaşık 750 nozul kullanılmıştır.

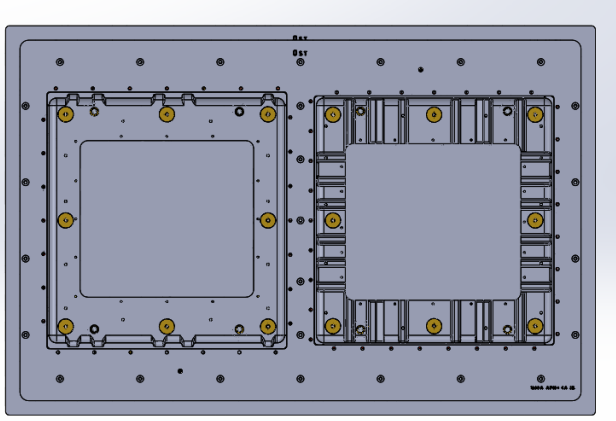


Şekil.1 Farklı Ölçülerde Alüminyum Nozullar

Çalışma için tasarlanan nozul deliği açılmayan ve AGA ile yapılan EPS kalıpta, ürünlerin kalıptan çıkması için toplam 2 gözde 16 adet itici vardır. Şekil 3’de kalıp üzerinde itici dağılımı gösterilmiştir. Bu çalışmada; GA ve AGA kullanılarak yapılan kalıplarda üretim deneme verileri (çevrim süreleri ve buharlama süreleri) karşılaştırılacaktır. Bu nedenle, çevrim sürelerini önemli ölçüde değiştirebilen kalıptaki itici-enjektör konumları her iki kalıpta da aynı yapılıdır.



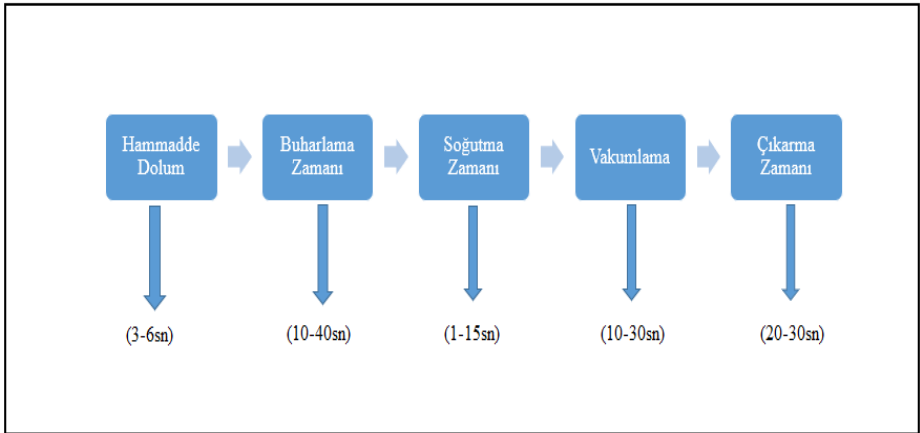
Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı. GA kalıpta açılacak nozul deliklerinin konumu



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Nozul deliği açılmamış

AGA kalıpdaki itici konumları

Denemesi yapılacak kalıpların EPS enjeksiyon makinesi proses aşamalarındaki sürelerin analizi yapılmıştır (Şekil 4). Üretim prosesinde; buharlama menüsünde (Aşama 2), hammaddeler doldurulduktan sonra, ürünü pişirmek için buharlama yapılır. Enjeksiyon makinesinin sabit ve hareketli her tarafında 4 adet buhar girişi bulunur. Buharlama süresi, ürünün pişme durumuna göre 10 ile 40 saniye arasında değişir. 3. Aşamada, soğutma/vakum menüsü bulunur. Burada, pişmiş ürünün kalıptan ayrılabilmesi için kalıbın soğutulması gerekir. Kalıptan çıkarma menüsünde (Aşama 4), ürünün basılması ve kalıptan çıkarılması için gereken değerler bu menülerde belirlenir.



Şekil 4. EPS makinesi proses aşamaları

III.BULGULAR

Bu çalışmada; nozul delikleri açılan GA ve nozul delikleri açılmayan AGA ile yapılan kalıpların kullanıldığı EPS enjeksiyon makinesindeki deneme değerlerinin özeti Tablo 1’de verilmektedir. Tablo değerleri karşılaştırıldığında, AGA kalıpla yapılan denemelerde çevrim süresi GA kalıplara göre en az %3,6 oranında yüksek olduğu görülmüştür.

AGA kalıpları GA kalıplarından yaklaşık 2,57 kat daha hafiftir. Ancak AGA ile yapılan EPS kalıbın malzeme maliyeti geleneksel yöntemle göre yapılmış kalıbın maliyetinden yaklaşık 3 kat yüksektir. Yüksek olmasının en önemli sebeplerinden birisi malzemenin yurtdışından temin edilmesidir. Küçük ebatlı AGA ile yapılan kalıbın boyutlarında ülkemizde gözenekli malzemeyi üretebilecek firma henüz mevcut değildir. Bu ebatlarda AGA üretilen yerli firmalar tarafından ülkemizde de üretildiği durumda kalıp maliyetlerinin düşeceği öngörülmektedir.

AGA ile yapılacak kalıplara teflon kaplama ilgili yapılan ön testlerde pürüzlülüğün arttığı ve bunun en büyük nedeninin teflon işlemi öncesi kumlama işlemi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca AGA ile yapılan kalıbın dışı gözün yan yüzeyleri imalat sonrasında içeri doğru 1-2 mm kapandığı gözlemlenmiştir. AGA ile yapılan kalıbın dışı gözün yan yüzeyleri imalat sonrasında içeri doğru 1-2 mm kapanarak kalıp ölçülerinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Söz konusu dışı göz kalıbın yanlarına destek olarak federler ilave edilerek söz konusu problemin çözüleceği öngörülmüştür.

IV.TARTIŞMA

AGA kalıpla yapılan denemelerde çevrim süresinde en az %3,6 oranında artış görülmesinin en büyük nedenlerinden birisinin pişmiş EPS ürünün kalıptan çıkarılması aşamasında AGA kalıp malzemeye yapışması olduğu düşünülmektedir. Çünkü ilgili tablo değerleri incelendiğinde ürünün AGA kalıptan çıkarılması ve alınması işlemlerinde daha fazla basınç ve süre gerektiği açık olarak görülebilmektedir. Ayrıca AGA kalıpta üretilen EPS ürünlerde nem oranı da bir miktar fazla çıkmıştır. Burada AGA kalıbın gözenek miktarı ve boyutlarının bu üretimde çevrim süresini düşürmek için yeterli olmadığı görülmektedir. EPS ürünlerde görülen pürüzlülük probleminin çözümü için zaten gözenekli ürün olan AGA kalıplarında kumlama işlemi yapılmadan teflon kaplama yapılabilir veya daha farklı teflon kaplama malzemeleri ve yöntemleri denenebilir.

Tablo 1. GA ve AGA kalıplar ile yapılan kalıp denemeleri sonuçları

GA Kalıp		
	Ortalama Nem	Ağırlık (gr)
Ürün 1	11	261

Ürün 2	11	256	
Enjeksiyon Makinası			
No	Açıklama	Basınç(bar)	Süre (sn)
1	Hammadde dolumu	1	3
2	Erkek kalıp çapraz buharlama	0,8	2,1
3	Dişi kalıp çapraz buharlama	0,8	2,1
4	Erkek kalıp sulama		4
5	Dişi kalıp sulama		4
6	Vakumlama		25
7	Erkek kalıp ürün çıkarma	0,9	1,5
8	Dişi kalıp ürün çıkarma	0,9	1,5
9	Ürün alımı ve kalıp işlemleri		23,5
Makine toplam çevrim süresi			66,7
AGA Kalıp			
	Ortalama Nem	Ağırlık (gr)	
Ürün 1	16	273	
Ürün 2	16	261	
Enjeksiyon Makinası			
No	Açıklama	Basınç(bar)	Süre (sn)
1	Hammadde dolumu	1	3
2	Erkek kalıp çapraz buharlama	1	4,7
3	Dişi kalıp çapraz buharlama	1	4,2
4	Erkek kalıp sulama		10
5	Dişi kalıp sulama		10
6	Vakumlama		20
7	Erkek kalıp ürün çıkarma	1,6	2
8	Dişi kalıp ürün çıkarma	1,6	2
9	Ürün alımı ve kalıp işlemleri		33,2

AGA kalıpları GA kalıplarından daha hafif olması da çevre sağlığı açısından önemli bir kazançtır. Çünkü fosil kaynaklardan üretilen malzemelerin kullanımını azaltmak ve küresel ısınma gazlarını azaltmak için daha hafif malzemeler ve daha düşük karbon emisyonları da gereklidir [10]. Temiz üretim (TÜ), eko-verimli teknolojiyi kullanarak kaliteli üretimi artırmak için daha az hammadde veya tarımsal-endüstriyel atık yan ürünü içeren süreçlerin kullanılması anlamına gelir; TÜ, süreçlere (enerji ve hammadde tasarrufu, toksik madde kullanımının azaltılması, atık ve emisyon miktarının düşürülmesi) ve ürün ve hizmetlere uygulanır ([11], [13]).

V. SONUÇLAR

Bu çalışmanın elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. GA malzeme kullanılarak yapılan EPS kalıp ile nozul deliği açılmayan AGA ile yapılan EPS kalıbın sonuçları karşılaştırıldığında, çevrim süresinde %3,6 artış olduğundan iyileştirme sağlanamamıştır. Bunun nedeninin söz konusu AGA kalıbında nozul deliklerinin kullanılmaması olduğu düşünülmektedir.
2. Nozul deliği açılan AGA ile yapılan EPS kalıbın teflon kaplama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi için kaplama öncesi kumlama yapılmaması veya farklı teflon kaplama yöntemleri araştırılmalıdır.
3. Kalıp maliyetlerinin düşürülmesi, buharlama ve soğutma prosesinin etkin şekilde yapılabilmesi için Solidworks Flow Simulation, Ansys vb. paket programı kullanılarak kalıp içindeki sıcaklık ve basınç dağılımlarının analiz edilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Mefa Endüstri A.Ş.'nin EPS kalıplarında enerji ve üretim verimliliğini artırma çalışmaları kapsamında desteklenmiştir. Sorumlu araştırmacı Hayrettin EKEL tarafından Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde "EPS strafor kalıplarında üretim verimliliğinin artırılması" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Kaya, "Energy efficiency potential in industry and efficiency in compressed air systems" (Master's Thesis). Istanbul Technical University Energy Institute, Istanbul, 2012.
- [2] H. Özyurt, "Increasing production capacity and ensuring energy efficiency in factory production lines" (Master's Thesis). Yıldız Technical University, Institute of Science, Istanbul, 2016.

- [3] A Ercil, "Effect of pore size on mechanical properties in the production of open porous parts by casting method" (Master's Thesis). Gazi University Institute of Science, Ankara, 2020.
- [4] İ. A. Bağcı, "Açık hücreli metal köpüklerin hassas döküm yöntemi ile üretilebilirliğinin incelenmesi" (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne. 2021.
- [5] S. Medik, "Production of open porous regular structured aluminum foam by casting method and investigation of the effect of heat treatment on its mechanical properties" (Master's Thesis). Karabuk University Institute of Science, Karabuk, 2019.
- [6] A. Sutygina, U. Betke & M. Scheffler, "Manufacturing of open-cell aluminium foams: comparing the sponge replication technique and its combination with the freezing method" *Materials*, Vol.15(6), 2022
- [7] S. F. Fischer, P. Schüller, C. Fleck & A. Bührig-Polaczek, "Influence of the casting and mould temperatures on the (micro)structure and compression behaviour of investment-cast open-pore aluminium foams" *Acta Materialia*, 61(14), 5152-5161. Elsevier Ltd, 2013.
- [8] F. Medik, T. Sunar, M. Çetin, M. Yaşar & L. Turhan "Production of open cell aluminum foam via infiltration method". 1st *International Conference of Advanced Materials and Manufacturing Technologies* pp.25-27, 2017
- [9] İ. Yavuz, "Metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED), 2(1), 49-58, 2010.
- [10] I. Elfaleh, F. Abbassi, M. Habibi, F. Ahmad, M. Guedri, M. Nasri, & C. Garnier, "A comprehensive review of natural fibers and their composites: an eco-friendly alternative to conventional materials." *Results in Engineering*, vol. 19, pp. 101271. 2023.
- [11] M. Ayub, M. H. D. Othman, I. U. Khan, S. K. Hubadillah, T. A. Kurniawan, A. F. Ismail, J. Jaafar, "Promoting sustainable cleaner production paradigms in palm oil fuel ash as an eco-friendly cementitious material: A critical analysis" *Journal of Cleaner Production*, vol. 295, pp.126296, 2021.
- [12] B. F. Giannetti, F. Agostinho, J. J. C. Eras, Z. Yang & C. Almeida "Cleaner production for achieving the sustainable development goals" *Journal of Cleaner Production*, vol.271, pp.122127, 2010.

Türkiye ve Dünyada Bulunan Petrol Formasyonları

Emrullah KANDEMİR¹

İnci TÜRK TOĞRUL²

- 1- YL Öğrencisi; Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
e.kandemir.13@hotmail.com ORCID No: 0009-0004-5133-6900
- 2- Prof. Dr.; Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği.
incitgrl@gmail.com ORCID No: 0000-0001-7549-2968

ÖZET

Petrol, dünya genelinde ekonomik ve stratejik öneme sahip bir enerji kaynağıdır. Petrolün bulunduğu bölgelerde, petrol formasyonları adı verilen jeolojik oluşumlar bulunmaktadır. Petrol formasyonları, yeraltında petrol ve doğalgazın biriktiği kayaç katmanlarına verilen addır. Bu formasyonlar, jeolojik süreçler sonucunda organik maddelerin birikmesi, çökmesi ve zamanla ısı ve basınç altında kimyasal dönüşümler geçirmesiyle oluşur. Petrol formasyonlarının oluşumu milyonlarca yıl sürer ve petrol çıkarma işlemi de bu formasyonlardan gerçekleştirilir.

Petrol formasyonları genellikle dört tür kayaçlardan oluşur. Bunlar, petrol ve doğalgazın asıl olduğu kayaçlar olan *kaynak kaya*, petrol ve doğalgazın depolandığı gözenekli kayalar olan *rezervuar kaya*, petrolün yüzeye çıkmadan yeraltında birikmesini sağlayan yapısal ya da stratigrafik engeller olarak tanımlanan *kapan* ve rezervuarın üst kısmını kapatan, petrol ve doğalgazın yukarı doğru kaçmasını önleyen geçirimsiz kayaçlar olan *tavan kaya* olarak sıralanabilir.

Bu formasyonlar, petrolün oluşumunu, birikimini ve çıkarılmasını etkileyen önemli faktörlerdir. Türkiye, petrol rezervleri bakımından Orta Doğu ülkeleriyle kıyaslandığında daha küçük bir ölçeğe sahip olmasına rağmen, sahip olduğu petrol formasyonlarıyla enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik çalışmalar yapmaktadır. Dünya genelinde ise Orta Doğu, Kuzey Amerika, Latin Amerika ve Rusya gibi bölgeler önemli petrol formasyonlarına ev sahipliği yapmaktadır. Petrol formasyonlarının araştırılması ve keşfi, jeologlar ve jeofizikçiler tarafından çeşitli tekniklerle yapılır. Bu süreçte sismik araştırmalar, sondaj çalışmaları ve diğer jeolojik yöntemler kullanılır.

Anahtar Kelimeler – Jeolojik Oluşumlar, Petrol Endüstrisi, Formasyon türleri, Petrol Formasyonları, Petrol Rezervleri

GİRİŞ

Petrol formasyonları, yer altında petrolün oluşumunu ve birikimini sağlayan jeolojik oluşumlardır. Bu formasyonlar genellikle organik madde içeren tortul kayaçlardan oluşur ve milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucunda petrolün birikmesine ve depolanmasına olanak sağlar. Petrol formasyonları genellikle kumtaşı, kalker, çamurtaşı gibi kayaçlardan oluşur ve yer altında farklı derinliklerde bulunabilirler. Petrol endüstrisi, bu formasyonlardaki petrol rezervlerini keşfetmek ve çıkarmak için çeşitli jeolojik araştırma ve sondaj tekniklerini kullanır. Dünyanın çeşitli bölgelerinde farklı türde ve büyüklükte petrol formasyonları bulunmaktadır ve bunlar dünya enerji arzının temelini oluşturur.

Acun, 1949 çalışmasında, dünya petrol endüstrisinin gelişimini ve Türk petrol sektörünün geçmişini ele almıştır. Türkiye'nin petrol endüstrisi üzerindeki etkilerini, uluslararası petrol piyasalarındaki konumunu veya yerel ekonomi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Ayrıca, Türkiye'nin ve dünyanın petrol arzını ve talebini, petrol rezervlerini ve bu rezervlerin ekonomiye etkilerini incelemiştir.

Akalın, 2014 çalışmasında, Türkiye'nin petrol politikasının, 1930'larda milli nitelikte olduğunu savunmuş ve Milli politikaların izlenmesi 1950'lere kadar sürdüğünü öne sürmüştür. Ayrıca çalışma, Türkiye'nin değişen petrol politikası üzerine tartışılmış ve analiz edilmiştir.

Lokman, 1958 çalışmasını, yurdumuzun yeraltı millî servetlerinden birisi ve en mühimi olan petrol madenlerinin araştırılmalarını, Cumhuriyetten evvel, sonra ve bugünkü durum olmak üzere, üç devreye ayırmak suretiyle, üç safhada mütalea ve tetkik etmeği, mukayese bakımından incelemiştir.

PETROL FORMASYONLARI

Petrol Formasyonları Kavramı

Petrol formasyonları kavramı, petrol ve doğal gazın doğal olarak oluştuğu ve depolandığı jeolojik oluşumları ifade eder. Bu oluşumlar, organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli termal ve kimyasal dönüşümler sonucunda oluşur. Petrol formasyonları, petrol ve doğal gazın doğal olarak depolandığı ve biriktirildiği alanları ifade eder (Lokman, 1958: 93-94). Petrol formasyonlarının oluşumu genellikle milyonlarca yıl süren bir süreçtir ve jeolojik koşulların yanı sıra organik madde birikimi, gömülme, termal matürasyon ve hidrokarbon göçü gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenir. Bu süreçler, organik maddenin tortul kayaçlarda gömülerek derinleşmesi, yüksek basınç ve sıcaklık altında termal dönüşüme uğraması ve sonunda hidrokarbon bileşenleri olan petrol ve doğal gazın oluşması ile sonuçlanır (Acun, 1949: 310).

Petrol formasyonları, organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli termal ve kimyasal dönüşümler sonucunda oluşan jeolojik oluşumlardır. Bu oluşumlar, petrol ve doğal gazın doğal olarak depolandığı ve biriktirildiği alanları ifade eder. Petrol formasyonlarının oluşumu genellikle milyonlarca yıl süren bir süreçtir ve jeolojik koşulların yanı sıra organik madde birikimi, gömülme, termal matürasyon ve hidrokarbon göçü gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenir (Ekinci, 2015: 67).

Petrol formasyonlarının oluşum süreci genellikle şu adımları içerir:

- Organik Madde Birikimi: Denizel bitki ve hayvan kalıntıları, tortul kayaçların yüzeyine birikir ve organik madde oluşturur.
- Gömülme: Organik madde, tortul kayaçlar altında gömülerek derinleşir.

- **Termal Dönüşüm:** Organik madde, gömülme ve artan basınç altında termal dönüşüme uğrar. Bu süreçte organik madde, hidrokarbon bileşenleri olan petrol ve doğal gazı oluşturur.
- **Migren ve Göç:** Oluşan hidrokarbonlar, kayaçların poröz ve geçirgen bölgelerinden daha yoğun olmayan bölgelere doğru göç eder.
- **Birikim:** Hidrokarbonlar, rezervuar kayaçları olarak adlandırılan poröz ve geçirgen kayaçlarda birikir ve biriktirilir.

Petrol formasyonları, petrol endüstrisi için stratejik bir öneme sahiptir. Bu formasyonlar, dünya enerji ihtiyacının önemli bir kaynağını temsil eder ve birçok ülkenin ekonomik büyümesini desteklemektedir (Lokman, 1958: 93-94).

Petrol Formasyonlarında Kavramsal Çeşitlilik

Petrol formasyonlarında kavramsal çeşitlilik, çeşitli jeolojik ve coğrafi faktörlerin etkisiyle farklı tipte formasyonların oluşması ve bu formasyonların özelliklerindeki çeşitliliği ifade eder. Bu çeşitlilik, petrol endüstrisi için önemli bir kavramdır çünkü farklı formasyon tipleri, çıkarma teknikleri ve ekonomik değer açısından farklılık gösterebilir (Acun, 1949: 312). Petrol formasyonlarında kavramsal çeşitliliğin bazı örnekleri:

- **Rezervuar Türleri:** Petrol formasyonlarında farklı rezervuar türleri bulunur. Bunlar arasında kumtaşı, kireçtaşı, dolomit, konglomera ve şeyl gibi farklı kayaç tipleri yer alır. Her bir rezervuar türü, hidrokarbonların depolanması ve akması için farklı özelliklere sahiptir.
- **Jeolojik Oluşumlar:** Petrol formasyonları, jeolojik süreçlerin etkisiyle oluşur ve bu süreçlere bağlı olarak çeşitlilik gösterirler. Tektonik hareketler, tortul birikimler, volkanik aktivite ve diğer jeolojik olaylar, formasyonların oluşumunda ve özelliklerinde farklılıklara neden olabilir.
- **Coğrafi Dağılım:** Petrol formasyonları, coğrafi olarak farklı bölgelerde bulunabilir. Örneğin, denizel ortamlarda oluşmuş formasyonlar ile kara içi alanlarda oluşmuş formasyonlar arasında farklılık görülebilir. Coğrafi konum, formasyonların jeolojik özelliklerini ve hidrokarbon potansiyelini etkileyebilir.
- **Termal Matürasyon:** Petrol formasyonları, organik madde dönüşümü sırasında farklı termal matürasyon seviyelerine sahip olabilir. Bu, hidrokarbonların bileşimi ve kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Daha yüksek termal matürasyon seviyeleri genellikle daha hafif hidrokarbonların oluşumunu teşvik eder.
- **Teknolojik Uygulamalar:** Petrol formasyonlarında çeşitlilik, farklı teknolojik uygulamaların gerekliliğini doğurur. Örneğin, klasik petrol rezervuarları ile şeyl gazı veya kaya gazı gibi sıkıştırılmış kaya formasyonları arasında farklı çıkarma teknikleri kullanılabilir.

Bu çeşitlilik, petrol endüstrisinin karmaşıklığını ve çeşitli faktörlerin petrol rezervlerinin keşfi, çıkarılması ve işlenmesi üzerindeki etkisini

vurgular. Bu çeşitlilikler, petrol formasyonlarının oluşumu, bileşimi ve jeolojik özellikleri hakkında daha detaylı bir anlayış sağlamaktadır. Bu bilgiler, petrol endüstrisinde keşif, arama ve çıkarma süreçlerini anlamak için önemli bir yere sahiptir.

Petrol Formasyonlarında Bazı Kavramlar

Bu kavramlar, petrol formasyonlarının oluşumu, bileşimi ve jeolojik özellikleri hakkında daha detaylı bir anlayış sağlamaktadır ve petrol endüstrisinde keşif, arama ve çıkarma süreçlerini anlamak için önemli bir yere sahiptir (Acun, 1949: 315-320).

- *Rezervuar Kayaçları:* Petrol formasyonları içinde yer alan rezervuar kayaçları, petrol ve doğal gazın biriktirildiği ve saklandığı kayaçlardır. Bu kayaçlar genellikle poröz ve geçirgen yapıya sahiptir, bu da hidrokarbonların depolanması ve göç etmesi için uygun bir ortam sağlar.
- *Kapta Kayaçları:* Petrol formasyonlarının üstünde yer alan kapta kayaçları, rezervuar kayaçlarını koruyan ve izole eden kayaçlardır. Bu kayaçlar, petrol ve doğal gazın rezervuardan kaçmasını önler ve rezervuarın bütünlüğünü korur.
- *Kaynak Kayaçları:* Petrol formasyonları içinde organik maddeyi içeren ve hidrokarbon oluşumunu sağlayan kaynak kayaçlarıdır. Bu kayaçlar genellikle çamurtaşı, kilaşı ve tortul kayaçlar gibi organik madde içeren kayaçlardır.
- *Migren Yolları:* Petrol formasyonlarında, hidrokarbonların kaynak kayaçlarından rezervuar kayaçlarına doğru göç ettiği yollar olarak adlandırılan migren yolları bulunur. Bu yollar genellikle poröz ve geçirgen kayaçlardan oluşur ve hidrokarbonların hareket etmesine izin verir.
- *Kapanma Mekanizmaları:* Petrol formasyonlarında, hidrokarbon birikimini sonlandıran ve rezervuar kayaçlarını kapatmaya yönelik farklı mekanizmalar bulunur. Bu mekanizmalar arasında jeolojik kırılmalar, tortul tabakaların bükülmesi ve sızıntılar bulunabilir.
- *Diagenetik Süreçler:* Petrol formasyonlarının oluşumunda etkili olan çeşitli diagenetik süreçler vardır. Bu süreçler, organik madde dönüşümü, tortul kayaçların sıkışması, mineral oluşumu ve kayaçların kimyasal değişimi gibi olayları içerir.
- *Termal Matürasyon:* Petrol formasyonlarında organik maddenin termal matürasyonu, hidrokarbon oluşumunu ve petrolün olgunlaşmasını etkileyen önemli bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklar altında, organik madde hidrokarbonlara dönüşür ve petrol oluşumu gerçekleşir.
- *Petrol Kaynağı Kaynakları:* Petrol formasyonlarının organik madde kaynağı, genellikle denizel bitki ve hayvan kalıntılarından gelir. Bu

- kalıntılar, denizel çökellerin gömülmesi ve tortul kayaçların oluşmasıyla jeolojik zaman içinde organik madde haline gelir.
- *Petrol Depolama Hacmi:* Petrol formasyonlarının depolama kapasitesi, hidrokarbonların rezervuar kayaçlarında birikebileceği ve saklanabileceği maksimum hacmi ifade eder. Bu kapasite, rezervuar kayaçlarının porozitesi, geçirgenliği ve genişliği gibi faktörlere bağlıdır.

Petrol Formasyonlarının Oluşum Süreci

Petrol formasyonlarının oluşum süreci, organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli dönüşümü sonucu petrol ve doğal gazın oluşumunu sağlar. Petrol formasyonlarının oluşumu genellikle milyonlarca yıl süren bir süreçtir ve jeolojik koşulların yanı sıra organik madde birikimi, gömülme, termal matürasyon ve hidrokarbon göçü gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenir (Lokman, 1958: 96).

Petrol formasyonlarının oluşumu, genellikle organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli birikimiyle başlar. Bu organik madde genellikle denizel ortamlarda, özellikle de eski deniz tabanlarında birikir. Organik madde, genellikle bitki ve hayvan kalıntıları şeklinde gelir ve tortul kayaçların yüzeyinde birikir (Acun, 1949: 315).

Organik madde, birikim sürecinden sonra tortul kayaçlar altında gömülerek derinleşir. Bu gömülme süreci, tortul kayaçların tabakaları birikirken meydana gelen basınç altında gerçekleşir. Organik madde gömüldükçe, artan basınç ve sıcaklık altında çeşitli kimyasal ve fiziksel değişimlere uğrar (Druit, 1961).

Organik madde, gömülme ve artan basınç altında termal dönüşüme uğrar. Bu süreçte, organik moleküllerin kimyasal bağları kırılarak hidrokarbonlar serbest bırakılır. Yüksek sıcaklık altında gerçekleşen bu termal dönüşüm, organik maddenin parçalanması ve hidrokarbonların oluşumu ile sonuçlanır. Oluşan hidrokarbonlar, genellikle poröz ve geçirgen kayaçlardan daha yoğun olmayan bölgelere doğru göç eder. Bu göç süreci, hidrokarbonların rezervuar kayaçlarında birikmesini ve biriktirilmesini sağlar. Migren yolları olarak adlandırılan çatlaklar ve porozite içeren bölgeler, hidrokarbonların göç ettiği yolları sağlar (Lokman, 1958: 101-103).

Petrol Formasyonlarında Karşılaşılan Zorluklar

Petrol formasyonlarının keşfi genellikle karmaşık ve maliyetli bir süreçtir. Derin denizlerde, kutup bölgelerinde veya zorlu jeolojik koşullara sahip alanlarda petrol arama ve keşif yapmak daha da zor olabilir (Acun, 1949: 318). Petrol çıkarma faaliyetleri, çevresel etkilere ve toplumsal tartışmalara neden olabilir. Özellikle yerel halkın çevresel etkilere duyarlılığı, petrol çıkarma projelerinin sosyal kabulünü etkileyebilir.

Petrol formasyonlarının ekonomik olarak uygun maliyetle çıkarılması bazen zor olabilir. Özellikle düşük petrol fiyatları veya yüksek

çıkarma maliyetleri, bazı petrol rezervlerinin ekonomik olarak kazançlı olmamasına neden olabilir (Druit, 1961). Petrol, uluslararası politika ve güvenlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Petrol formasyonları genellikle jeopolitik risklere ve güvenlik sorunlarına maruz kalabilir. Özellikle bölgesel çatışmalar veya siyasi istikrarsızlık, petrol çıkarma projelerini olumsuz etkileyebilir.

Petrol formasyonlarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde çıkarılması için sürekli olarak yeni teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilikçi çıkarma teknikleri ve çevresel olarak daha sürdürülebilir uygulamaların geliştirilmesi, petrol endüstrisinin geleceği için önemlidir.

Petrol formasyonlarının ekstraksiyonu için kullanılan teknikler bazen zorluklarla karşılaşabilir. Özellikle sert kaya formasyonları veya yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı rezervuarlar gibi zorlu jeolojik koşullar, petrol çıkarma işlemlerini karmaşık hale getirebilir.

Petrol formasyonlarında karşılaşılan teknik zorlukları maddeler halinde aşağıda yer almaktadır:

- *Sertlik ve Dayanıklılık:* Petrol formasyonları genellikle sert ve dayanıklı kayalardan oluşur. Bu durum, kuyu delme işlemlerini zorlaştırabilir ve matkap ekipmanlarının daha fazla aşınmasına neden olabilir.
- *Delme Derinliği:* Bazı petrol rezervleri, derin yeraltı tabakalarında bulunur. Derin delme işlemleri, maliyetli ve teknik olarak zorlayıcı olabilir. Derin kuyu delme işlemleri için özel ekipmanlar ve teknik bilgi gerekebilir.
- *Yüksek Basınç ve Sıcaklık:* Derin petrol rezervuarları genellikle yüksek basınç ve sıcaklık altında bulunur. Bu durum, kuyu delme operasyonlarını tehlikeli hale getirebilir ve ekstra önlemlerin alınmasını gerektirebilir.
- *Kumtaşı ve Dolomit:* Bazı petrol rezervuarları, kumtaşı ve dolomit gibi poröz kayalarda bulunur. Bu tür kayalar, petrolün depolandığı ve akabileceği kusurlu alanlar sağlar, ancak matkap işlemleri bu tür kayalarda daha zor olabilir.
- *Kırılganlık ve Çatlamalar:* Petrol formasyonları genellikle kırılgan ve çatlaklı olabilir. Bu, kuyu delme işlemlerinin daha dikkatli ve kontrollü bir şekilde yapılmasını gerektirebilir. Aksi takdirde, kayaç çatlamaları ve kırılmaları, kuyu duvarlarına veya matkap ekipmanlarına zarar verebilir.
- *Dolgu ve Tortu:* Petrol formasyonları, genellikle kum, kil ve diğer tortul malzemelerle dolu olabilir. Bu, delme işlemlerini zorlaştırabilir ve kuyu stabilitesini etkileyebilir. Ayrıca, dolgu ve tortu, petrol çıkarma işlemlerini etkileyebilir ve kuyu üretkenliğini azaltabilir (Acun, 1949: 317-333).

Petrol Formasyonlarının Kullanım Alanları

Petrol, modern endüstriyel toplumların temel enerji kaynaklarından biridir ve birçok endüstriyel, ticari ve kişisel kullanım alanına sahiptir (Lokman, 1958: 104-107).

- *Enerji Üretimi:* Petrol, elektrik üretimi başta olmak üzere birçok enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Termik santraller, jeneratörler ve endüstriyel tesislerde enerji üretiminde petrol ve petrol ürünleri (örneğin, fuel oil) yaygın olarak kullanılır (Druit, 1961).
- *Taşımacılık:* Petrol, taşımacılık sektöründe en yaygın kullanılan yakıt türüdür. Arabalar, kamyonlar, uçaklar ve deniz taşıtları gibi birçok ulaşım aracı, içten yanmalı motorlarla çalışarak petrol ve petrol ürünlerini (benzin, dizel, jet yakıtı) kullanır (Druit, 1961).
- *Endüstriyel Kullanım:* Petrol, kimyasal endüstrisinde birçok ürünün hammaddesi olarak kullanılır. Plastikler, sentetik lifler, boya ve vernikler, gübreler, ilaçlar ve çeşitli kimyasallar gibi birçok ürün, petrol türevlerinden elde edilir (Druit, 1961).
- *Tarım:* Tarım sektöründe de petrol ürünleri yaygın olarak kullanılır. Tarım makineleri ve traktörler, tarım ilaçları ve gübrelerin üretimi, sulama sistemleri ve tarım ekipmanlarının birçoğu petrol ürünleriyle çalışır (Druit, 1961).
- *Isıtma ve Soğutma:* Petrol ve petrol ürünleri, ev ve işyerlerinde ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılır. Yakıt yağları ve fuel oil, ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarıdır (Druit, 1961).
- *Elektrik Üretimi:* Petrol, birçok elektrik santralinde temel yakıt olarak kullanılır. Bu santraller, elektrik üretmek için petrolü yakar ve elde edilen buharı türbinlere yönlendirirler (Druit, 1961).

Petrolün bu geniş kullanım alanları, onu dünya ekonomisinde stratejik bir kaynak haline getirmiştir. Petrol fiyatlarındaki değişiklikler, küresel ekonomi üzerinde önemli etkilere sahip olabilir ve petrol arz ve talebi, uluslararası ilişkilerde ve politikada önemli bir faktör olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, petrolün dünya genelindeki üretimi, dağılımı ve kullanımı, birçok ülke için stratejik bir endişe kaynağıdır (Lokman, 1958: 110-114).

TÜRKİYE'DE PETROL FORMASYONLARI

Türkiye'de petrol formasyonları, organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli termal ve kimyasal dönüşümler sonucunda oluşan jeolojik oluşumlardır. Türkiye'de petrol formasyonları genellikle ülkedeki farklı jeolojik bölgelerde bulunur ve genellikle karbonat ve kumtaşı gibi kayaçlardan oluşur (Druit, 1961).

Tarihsel Gelişim

Türkiye, petrol endüstrisinin tarihsel gelişimi açısından önemli bir konuma sahiptir. Ülkenin petrol arama ve üretimi faaliyetleri, 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır ve zaman içinde çeşitli dönemlerde önemli dönüşümler yaşamıştır (Lokman, 1958: 92-93). Bu bölümde, Türkiye'nin petrol endüstrisinin tarihsel gelişimini 1920'lerden günümüze kadar olan dönemi aralığında başlıklar altında incelenmiştir.

1920'ler ve 1930'lar

1920'ler ve 1930'lar, Türkiye'de petrol aramaları ve üretiminin başlangıç ve gelişim dönemlerini temsil eder. Bu dönem, Türkiye'nin petrol endüstrisinin gelişiminde önemli bir dönemeç oluşturdu ve ülkenin petrol arama ve üretim faaliyetlerini başlatarak enerji sektöründe önemli bir rol oynamaya başladı (Akalin, 2014: 51-52). Bu dönemdeki önemli olaylar ve gelişmeler:

- *1920'lerin Başları:* Türkiye'de petrol aramaları ve üretimi, 1920'lerin başlarına kadar uzanmaktadır. Bu dönemde, Türkiye Cumhuriyeti'nin kurulmasının ardından ülkenin endüstriyel ve ekonomik altyapısını geliştirmek amacıyla petrol arayışlarına yönelik çalışmalar başladı.
- *Petrol Arama Faaliyetleri:* 1920'lerin başlarında, Türkiye'de çeşitli yerlerde petrol arama faaliyetleri başladı. Özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'nde, Batman, Siirt ve Mardin gibi illerde petrol aramaları yapıldı. Ancak, bu dönemde önemli bir keşif yapılmadı.
- *1930'lar ve Batman-İzmir Ham Petrol Sahası:* Türkiye'nin ilk önemli petrol sahası olan Batman-İzmir Ham Petrol Sahası 1935 yılında keşfedildi. Bu keşif, Türkiye'nin petrol endüstrisinde önemli bir dönüm noktası oldu ve ülkenin petrol arama ve üretim faaliyetlerini başlattı. Batman-İzmir Ham Petrol Sahası, Türkiye'nin petrol rezervlerini keşfetme ve ekonomik olarak değerlendirme yolunda önemli bir adım olarak kabul edilir (Ekinci, 2015: 42).
- *Petrol Üretiminin Artışı:* Batman-İzmir Ham Petrol Sahası'nın keşfiyle birlikte, Türkiye'de petrol üretimi arttı ve ülke petrol endüstrisinde hızlı bir gelişim yaşandı. Petrol sahasının keşfi, Türkiye'nin enerji sektöründe kendi kendine yeterli olma yolunda önemli bir adım olarak kabul edilir (Akalin, 2014: 53-55).

1940'lar ve 1950'ler

Bu dönem, Türkiye'nin petrol endüstrisinde önemli bir büyüme ve gelişme dönemini temsil eder. Petrol arama ve üretim faaliyetlerinin artmasıyla birlikte, Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik kalkınmayı desteklemek için petrol rezervlerini çeşitlendirme çabaları hız kazanmıştır (Akalin, 2014: 54). Bu dönemdeki önemli olaylar ve gelişmeler:

- *1940'lar ve 1950'lerin Başları:* Bu dönemde, Türkiye'nin petrol arama ve üretimine olan ilgisi artmıştır. Özellikle II. Dünya Savaşı sonrası dönemde, Türkiye'nin endüstriyel ve ekonomik kalkınma çabalarıyla birlikte enerji kaynaklarına olan ihtiyaç da artmıştır. Bu durum, petrol arama ve üretim faaliyetlerini hızlandırmıştır.
- *Petrol Araştırma ve Keşif Faaliyetleri:* 1940'ların ve 1950'lerin başlarında, Türkiye'nin farklı bölgelerinde petrol araştırma ve keşif faaliyetleri hızla artmıştır. Özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri, petrol rezervleri açısından önemli potansiyele sahip olduğu düşünülerek araştırma ve keşif çalışmalarına odaklanılmıştır.
- *Petrol Sahalarının Keşfi:* Bu dönemde, Türkiye'nin farklı bölgelerinde birçok petrol sahası keşfedilmiştir. Özellikle Diyarbakır, Batman, Mardin, Siirt, Şırnak gibi Doğu ve Güneydoğu Anadolu illerinde petrol sahaları bulunmuştur. Bu sahalar, Türkiye'nin petrol rezervlerini çeşitlendirerek ülkenin enerji bağımsızlığını artırmıştır.
- *Petrol Endüstrisinin Büyümesi:* Petrol arama ve keşif faaliyetlerinin artmasıyla birlikte, Türkiye'nin petrol endüstrisi büyümüş ve gelişmiştir. Petrol sahalarının keşfi, ülkenin petrol üretim kapasitesini artırmış ve ekonomik büyümeyi desteklemiştir (Akalin, 2014: 54-56).

1960'lar ve 1970'ler

Bu dönem, Türkiye'nin petrol endüstrisinde teknolojik ve kurumsal altyapısının güçlendiği bir dönemdir. Yeni teknolojilerin kullanımı ve yapılan yatırımlarla birlikte, Türkiye'nin petrol arama ve üretim kapasitesi önemli ölçüde artmış ve ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak için güçlü bir temel oluşturmuştur (Akalin, 2014: 57). Bu dönemdeki önemli olaylar ve gelişmeler:

- *1960'ların Başları:* 1960'lar, Türkiye'de petrol endüstrisinde önemli gelişmelerin yaşandığı bir dönemdir. Bu dönemde, Türkiye'nin endüstriyel ve ekonomik büyüme çabaları, petrol arama ve üretimine olan ilgiyi artırmıştır.
- *Yeni Teknolojilerin Kullanımı:* 1960'lar, petrol endüstrisinde yeni teknolojilerin kullanımının arttığı bir dönemdir. Bu dönemde, jeofizik yöntemlerin gelişimi ve modern petrol arama tekniklerinin uygulanması, petrol rezervlerinin daha etkin bir şekilde keşfedilmesine olanak sağlamıştır.
- *Petrol Arama ve Üretimi için Yatırımlar:* 1960'lar ve 1970'ler, Türkiye'nin petrol arama ve üretimi için önemli yatırımların yapıldığı bir dönemdir. Özellikle devlet ve özel sektör tarafından yapılan yatırımlarla birlikte, petrol arama ve üretim faaliyetleri genişlemiş ve derinleşmiştir.

- *Petrol Sahalarının Geliştirilmesi:* Bu dönemde, Türkiye'de keşfedilen petrol sahalarının geliştirilmesi ve üretim kapasitelerinin artırılması önemli bir öneme sahiptir. Petrol sahalarının üretim verimliliğinin artırılması ve yeni sahaların keşfedilmesi, Türkiye'nin enerji arzını güçlendirmiş ve ekonomik büyümeyi desteklemiştir.
- *Ulusal Petrol Şirketinin Kuruluşu:* 1960'ların sonlarına doğru, Türkiye'de Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) adında ulusal bir petrol şirketi kurulmuştur. TPAO, ülkenin petrol arama ve üretim faaliyetlerini koordine etmek ve yönetmek amacıyla kurulmuştur (Akalın, 2014: 57-59).

1980'ler ve 1990'lar

Bu dönem, Türkiye'de petrol endüstrisinin dönüşümü ve özelleştirme politikalarının etkilerinin görüldüğü bir dönemdir. Liberalleşme ve özelleştirme politikalarıyla birlikte, özel sektörün rolü artmış ve petrol arama ve üretimi alanında yeni fırsatlar ortaya çıkmıştır (Akalın, 2014: 60). Bu dönemdeki önemli olaylar ve gelişmeler:

- *1980'lerin Başları ve Politik Değişimler:* 1980'lerin başları, Türkiye'de politik ve ekonomik alanda önemli değişimlerin yaşandığı bir dönemdir. Özellikle 1980 askeri darbesinin ardından, Türkiye'de ekonomik liberalleşme ve özelleştirme politikaları uygulanmaya başlandı.
- *Petrol Endüstrisinde Liberalleşme:* 1980'lerin ortalarından itibaren, Türkiye'nin petrol endüstrisinde liberalleşme ve serbestleşme politikaları uygulanmaya başlandı. Bu dönemde, özellikle petrol arama ve üretimi alanında özel sektörün rolü arttı ve devletin kontrolü azaldı.
- *Petrol Arama ve Üretiminde Yatırımlar:* 1980'ler ve 1990'lar, Türkiye'de petrol arama ve üretimi açısından önemli yatırımlar yapıldığı bir dönemdir. Özellikle özel sektörün petrol arama ve üretimine olan ilgisi artmış ve birçok özel şirket petrol arama ve üretim faaliyetlerine girmiştir.
- *Teknolojik Gelişmeler:* Bu dönemde, petrol arama ve üretiminde teknolojik gelişmeler de yaşanmıştır. Yeni jeofizik ve jeolojik tekniklerin kullanımıyla birlikte, petrol rezervlerinin daha etkin bir şekilde keşfedilmesi ve üretilmesi mümkün hale gelmiştir.
- *Zorluklar ve Fırsatlar:* 1980'ler ve 1990'lar, Türkiye'de petrol arama ve üretimi açısından çeşitli zorluklar ve fırsatlarla dolu bir dönemdi. Özellikle ekonomik krizler, politik istikrarsızlık ve güvenlik endişeleri gibi faktörler petrol endüstrisini etkilemiştir. Ancak, bu dönemde yaşanan değişimler ve reformlar, petrol endüstrisinin daha rekabetçi ve verimli hale gelmesine katkı sağlamıştır (Akalın, 2014: 60-61).

2000'ler ve sonrası

Bu dönem, Türkiye'nin petrol ve gaz arama ve üretim faaliyetlerinde önemli bir dönüşüm yaşadığı ve enerji sektöründeki potansiyelinin arttığı bir dönemdir. Özellikle Karadeniz'deki Sakarya Gaz Sahası'ndaki keşifler, Türkiye'nin enerji bağımsızlığını güçlendirmek ve ekonomik büyümeyi desteklemek açısından önemli bir fırsat sunmuştur (Akalin, 2014: 62). Bu dönemdeki önemli olaylar ve gelişmeler:

- *2000'lerin Başları ve Enerji Politikalarındaki Değişimler:* 2000'lerin başlarında, Türkiye'de enerji politikalarında ve enerji sektöründe önemli değişimler yaşandı. Özellikle enerji arzının güvence altına alınması ve enerji ithalatının azaltılması amacıyla yerli enerji kaynaklarına yönelik politikalar öne çıktı.
- *Petrol ve Gaz Arama Faaliyetlerinde Artış:* Bu dönemde, Türkiye'nin petrol ve gaz arama faaliyetleri hızla genişledi. Özellikle Türkiye'nin kara sularında ve kara içi alanlarında yeni petrol ve gaz arama sahaları belirlendi ve keşif çalışmaları yoğunlaştı.
- *Karadeniz'deki Sakarya Gaz Sahası Keşfi:* 2020'lerin başlarında, Türkiye'nin Karadeniz'deki Sakarya Gaz Sahası'nda yapılan önemli doğalgaz keşifleri, ülkenin enerji sektöründeki potansiyelini artırdı. Tuna-1 ve Frig-1 kuyularında keşfedilen doğalgaz rezervleri, Türkiye'nin enerji arzının çeşitlendirilmesi ve enerji bağımsızlığının güçlendirilmesine önemli bir katkı sağladı.
- *Teknolojik Gelişmeler ve Yatırımlar:* Bu dönemde, petrol ve gaz arama ve üretiminde teknolojik gelişmelerin kullanımı ve yatırımların artması dikkat çekti. Özellikle derin deniz sondajları ve ileri teknolojiyle donatılmış arama gemilerinin kullanımı, Türkiye'nin sularında ve kara içi alanlarında daha derin ve verimli keşif çalışmalarının yapılmasını sağladı.
- *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Yatırımlar:* Aynı dönemde, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar da arttı. Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve kapasitelerinin artırılması, Türkiye'nin enerji sektöründe çeşitliliğin sağlanması ve sürdürülebilir bir enerji politikasının benimsenmesine katkı sağladı (Akalin, 2014: 62-63).

Coğrafi Dağılım

Türkiye'nin petrol rezervleri coğrafi olarak çeşitli bölgelere dağılmıştır. En önemli petrol bölgeleri Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Trakya Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi, Ege Bölgesi ve Karadeniz Bölgesi'dir.

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından en önemli bölgelerinden biridir. Bu bölge, zengin petrol

rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahiptir (Akalin, 2014: 64). Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin en eski ve en büyük petrol rezervlerine ev sahipliği yapar. Batman, Siirt, Mardin, Şırnak ve Diyarbakır gibi iller, bölgedeki önemli petrol sahalarına ev sahipliği yapar. Bu sahalar, Türkiye'nin petrol endüstrisinin temellerini atmış ve ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir rol oynamıştır (Akalin, 2014: 64).

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesinin petrol rezervleri genellikle kumtaşı, kalker ve dolaylı olarak petrol üreten kayalardan oluşur. Bu sahalardan çıkarılan ham petrol, rafinerilere gönderilerek çeşitli petrol ürünlerine dönüştürülür. Bölgedeki petrol sahalarının jeolojik yapısı, petrolün toplanmasını ve üretilmesini kolaylaştıran özelliklere sahiptir (Akalin, 2014: 65).

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, jeolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir yapıya sahiptir. Bölge, birçok fay hattı ve tektonik aktiviteye sahiptir, bu da petrol oluşumu için uygun bir ortam sağlar. Ayrıca, bölgedeki tortul kayaçlar ve kumtaşları, petrol rezervlerinin ana kaynaklarından birini oluşturur (Acun, 1949: 313).

Jeolojik olarak, bölgedeki petrol sahaları genellikle kumtaşı, kalker ve dolaylı olarak petrol üreten kayalardan oluşur. Bu jeolojik yapılar, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun ortamlar sunar ve bölgenin petrol endüstrisi açısından zenginleşmesine katkıda bulunur (Acun, 1949: 313).

Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisinde stratejik bir öneme sahiptir. Bölgedeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur. Ayrıca, petrol endüstrisi bölgede istihdam yaratır ve yerel ekonomilere katkı sağlar. Bununla birlikte, bölgedeki petrol endüstrisi çevresel etkileri de beraberinde getirir. Petrol çıkarımı ve rafinajı süreçleri, çevre kirliliğine ve ekosistemlere zarar verebilir. Bu nedenle, petrol endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevresel koruma ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi önemlidir (Acun, 1949: 315).

Sonuç olarak, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahip zengin petrol rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahip bir bölgedir. Bu bölgedeki petrol endüstrisi, enerji arzının güvence altına alınması ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir rol oynamaktadır.

Trakya Bölgesi

Trakya Bölgesi, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan ve zengin petrol rezervlerine sahip olan önemli bir bölgedir. Bu bölge, Türkiye'nin petrol endüstrisindeki erken dönemlerinden itibaren petrol arama ve üretim faaliyetlerinin merkezlerinden biri olmuştur (Akalin, 2014: 64). Trakya Bölgesi, Türkiye'nin en eski petrol sahalarından birine ev sahipliği yapar. Kırklareli, Tekirdağ ve Edirne gibi iller, bu bölgedeki önemli petrol

sahalarında yer alır. Bu sahalar, Türkiye'nin petrol endüstrisinin başlangıç noktalarından birini oluşturur ve ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak için önemli bir kaynak sağlar (Akalin, 2014: 64).

Petrol rezervleri genellikle kumtaşı ve kalker gibi kayalarda bulunur. Trakya'daki petrol sahalarının jeolojik yapısı, petrolün toplanması ve üretilmesi için uygun bir ortam sağlar. Bu nedenle, bölgedeki petrol endüstrisi Türkiye'nin enerji arzını güvence altına almak ve ekonomik büyümeyi desteklemek açısından önemlidir (Akalin, 2014: 65).

Trakya Bölgesi, jeolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir yapıya sahiptir. Bölge, çeşitli tortul kayaçlar, kumtaşları ve kalkerlerden oluşur. Bu jeolojik yapılar, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun ortamlar sunar ve bölgenin petrol endüstrisi açısından zenginleşmesine katkıda bulunur. Ayrıca, Trakya Bölgesi'nde çeşitli fay hatları ve tektonik aktiviteler bulunur. Bu durum, petrol oluşumu için uygun bir ortam sağlar ve bölgedeki petrol rezervlerinin oluşumunu etkileyebilir (Acun, 1949: 316).

Trakya Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bölgedeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur. Ayrıca, petrol endüstrisi bölgede istihdam yaratır ve yerel ekonomilere katkı sağlar. Ancak, petrol endüstrisi çevresel etkilere de neden olabilir. Petrol çıkarımı ve rafinajı süreçleri, çevre kirliliğine ve ekosistemlere zarar verebilir. Bu nedenle, petrol endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevresel koruma ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi önemlidir (Acun, 1949: 316).

Sonuç olarak, Trakya Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahip zengin petrol rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahip bir bölgedir. Bu bölgedeki petrol endüstrisi, enerji arzının güvence altına alınması ve ekonomik büyümeyi desteklemek açısından önemli bir rol oynamaktadır.

İç Anadolu bölgesi

İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin merkezi ve kuzeyinde bulunan ve petrol endüstrisi açısından önemli bir bölgedir. Bu bölge, çeşitli petrol rezervlerine ve jeolojik özelliklere sahiptir (Akalin, 2014: 65). İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin önemli petrol sahalarından birine ev sahipliği yapar. Ankara, Konya, Aksaray gibi iller, bu bölgedeki önemli petrol sahalarına ev sahipliği yapar. Bu sahalar, Türkiye'nin petrol endüstrisinin gelişiminde ve enerji arzının güvence altına alınmasında önemli bir rol oynamıştır (Uzkut, 1969: 40-41).

Petrol rezervleri genellikle kumtaşı, kalker ve tortul kayaçlar gibi çeşitli formasyonlarda bulunur. Bu sahaların jeolojik yapısı, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun bir ortam sağlar. Bu nedenle, İç Anadolu Bölgesi'ndeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak

ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur (Akalin, 2014: 66).

İç Anadolu Bölgesi, jeolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir yapıya sahiptir. Bölge, çeşitli tortul kayalar, kumtaşları ve kalkerlerden oluşur. Bu jeolojik yapılar, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun ortamlar sunar ve bölgenin petrol endüstrisi açısından zenginleşmesine katkıda bulunur. Ayrıca, İç Anadolu Bölgesi'nde çeşitli fay hatları ve tektonik aktiviteler bulunur. Bu durum, petrol oluşumu için uygun bir ortam sağlar ve bölgedeki petrol rezervlerinin oluşumunu etkileyebilir (Uzkut, 1969: 43).

İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bölgedeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur. Ayrıca, petrol endüstrisi bölgede istihdam yaratır ve yerel ekonomilere katkı sağlar. Ancak, petrol endüstrisi çevresel etkilere de neden olabilir. Petrol çıkarımı ve rafinajı süreçleri, çevre kirliliğine ve ekosistemlere zarar verebilir. Bu nedenle, petrol endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevresel koruma ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi önemlidir (Acun, 1949: 319).

Sonuç olarak, İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahip zengin petrol rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahip bir bölgedir. Bu bölgedeki petrol endüstrisi, enerji arzının güvence altına alınması ve ekonomik büyümeyi desteklemek açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Ege Bölgesi

Ege Bölgesi, Türkiye'nin batısında yer alan ve petrol endüstrisi açısından önemli bir bölgedir. Bu bölge, çeşitli petrol rezervlerine ve jeolojik özelliklere sahiptir (Akalin, 2014: 66). Ege Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından önemli bölgelerinden birine ev sahipliği yapar. İzmir, Manisa, Aydın gibi iller, bu bölgedeki önemli petrol sahalarına ev sahipliği yapar. Bu sahalar, Türkiye'nin petrol endüstrisinin gelişiminde ve enerji arzının güvence altına alınmasında önemli bir rol oynamıştır (Akalin, 2014: 66).

Petrol rezervleri genellikle kumtaşı, kalker ve dolaylı olarak petrol üreten kayalardan oluşur. Ege'deki petrol sahalarının jeolojik yapısı, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun bir ortam sağlar. Bu nedenle, Ege Bölgesi'ndeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur (Akalin, 2014: 66).

Ege Bölgesi, jeolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir yapıya sahiptir. Bölge, çeşitli tortul kayalar, kumtaşları ve kalkerlerden oluşur. Bu jeolojik yapılar, petrolün birikmesi ve depolanması için uygun ortamlar sunar ve bölgenin petrol endüstrisi açısından zenginleşmesine katkıda bulunur. Ayrıca, Ege Bölgesi'nde çeşitli fay hatları ve tektonik aktiviteler bulunur. Bu

durum, petrol oluşumu için uygun bir ortam sağlar ve bölgedeki petrol rezervlerinin oluşumunu etkileyebilir (Acun, 1949: 332).

Ege Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bölgedeki petrol rezervleri, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamak ve ekonomik büyümeyi desteklemek için önemli bir kaynak oluşturur. Ayrıca, petrol endüstrisi bölgede istihdam yaratır ve yerel ekonomilere katkı sağlar. Ancak, petrol endüstrisi çevresel etkilere de neden olabilir. Petrol çıkarımı ve rafinajı süreçleri, çevre kirliliğine ve ekosistemlere zarar verebilir. Bu nedenle, petrol endüstrisinin sürdürülebilirlik ve çevresel koruma ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi önemlidir (Acun, 1949: 332).

Sonuç olarak, Ege Bölgesi, Türkiye'nin petrol endüstrisi açısından stratejik bir öneme sahip zengin petrol rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahip bir bölgedir. Bu bölgedeki petrol endüstrisi, enerji arzının güvence altına alınması ve ekonomik büyümeyi desteklemek açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Karadeniz Bölgesi

Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin kuzeyinde yer alan ve petrol endüstrisi açısından önemli potansiyele sahip bir bölgedir. Bu bölge, çeşitli petrol rezervlerine ve jeolojik özelliklere sahiptir (Akalin, 2014: 61-63). Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin petrol potansiyeli en yüksek bölgelerinden biridir. Son yıllarda yapılan araştırmalar ve sondajlar, Karadeniz'in altında önemli miktarda petrol rezervlerinin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle Karadeniz'in derin sularında bulunan Sakarya Gaz Sahası, Türkiye'nin en büyük doğalgaz keşiflerinden biridir (Acun, 1949: 342).

Sakarya Gaz Sahası, Karadeniz'in kuzeybatısında, Samsun ve Zonguldak illeri arasında yer alır. Bu saha, derin sular altında yer alan kayalardan oluşur ve potansiyel olarak büyük miktarda doğalgaz rezervlerine sahiptir. Bunun yanı sıra, Karadeniz'in diğer bölgelerinde de petrol rezervlerinin bulunduğu düşünülmektedir (Akalin, 2014: 61-63).

Karadeniz Bölgesi, jeolojik açıdan çeşitlilik gösteren bir yapıya sahiptir. Bölge, tortul kayaçlar, kumtaşları ve kalkerlerden oluşur. Ayrıca, bölgede birçok fay hattı ve tektonik aktivite bulunur. Bu durum, petrol oluşumu için uygun bir ortam sağlar ve Karadeniz'in altında önemli petrol rezervlerinin bulunmasına katkıda bulunur (Acun, 1949: 344).

Sakarya Gaz Sahası gibi petrol rezervlerinin bulunduğu bölgeler, genellikle derin sulara yer alır ve teknik açıdan zorlu sondaj operasyonlarını gerektirir. Ancak, bu zorluklara rağmen, Karadeniz'in petrol potansiyeli Türkiye'nin enerji güvenliğine önemli katkılar sağlayabilir (Akalin, 2014: 61-63).

Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin enerji açısından stratejik öneme sahip bir bölgedir. Bölgedeki Sakarya Gaz Sahası gibi petrol rezervleri, Türkiye'nin doğalgaz ihtiyacını karşılamak ve enerji arzını çeşitlendirmek

açısından büyük öneme sahiptir. Bu rezervlerin etkili bir şekilde değerlendirilmesi, Türkiye'nin enerji güvenliğini artırabilir ve dışa bağımlılığını azaltabilir. Ancak, petrol endüstrisinin çevresel etkileri ve teknik zorlukları göz önünde bulundurulmalıdır. Derin sulardaki sondaj operasyonları ve petrol çıkarımı süreçleri, çevresel risklere ve ekosistemlere zarar verebilir. Bu nedenle, petrol endüstrisi sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yönetilmeli ve çevresel etkiler minimize edilmelidir (Acun, 1949: 347).

Sonuç olarak, Karadeniz Bölgesi, Türkiye'nin enerji açısından stratejik bir öneme sahip zengin petrol rezervlerine ve çeşitli jeolojik özelliklere sahip bir bölgedir. Özellikle Sakarya Gaz Sahası gibi keşfedilen rezervler, Türkiye'nin enerji arzının güvence altına alınması ve ekonomik büyüme desteklemesi açısından büyük potansiyele sahiptir.

Türkiye'deki Önemli Formasyonlar

Türkiye genelindeki daha fazla petrol rezervlerine sahip olan 10 önemli formasyon bu bölümde incelenmiştir.

- *Batman-Şırnak Bölgesi:* Türkiye'nin en büyük petrol rezervlerinden biri burada bulunmaktadır. Buradaki petrol genellikle cretaceous kalkerlerde yer almaktadır (Ekinci, 2015: 48).
- *Dicle Havzası:* Fırat Nehri'nin etrafındaki bölgelerde yer alan petrol rezervleri önemlidir. Bu bölgelerdeki formasyonlar arasında Hamur, Garzan, ve Mardin Formasyonları yer alır (Kökyay, 2008: 32-33).
- *Gaziantep Bölgesi:* Gaziantep çevresinde petrol rezervleri bulunmaktadır. Bu rezervler genellikle çeşitli kumtaşı ve kalker formasyonlarında bulunur.
- *Trakya Bölgesi:* Trakya'da, özellikle Tekirdağ ve çevresinde petrol rezervleri vardır. Bu rezervler genellikle Senozoik döneme ait formasyonlarda bulunmaktadır.
- *Çukurova Bölgesi:* Adana, Mersin ve çevresinde petrol rezervleri bulunmaktadır. Bu rezervler genellikle tortul kayalar ve kumtaşları içinde yer alır.
- *Karadeniz Bölgesi:* Karadeniz'in kıyı bölgelerinde petrol potansiyeli olduğuna dair araştırmalar ve keşifler yapılmaktadır. Bu bölgelerde genellikle tortul kayalar içinde petrol bulunabilir.
- *Doğu Anadolu Bölgesi:* Doğu Anadolu'nun bazı bölgelerinde petrol rezervleri bulunmaktadır. Bu rezervler genellikle çeşitli tortul kayalarda bulunabilir (Lokman, 1958: 93).
- *Marmara Bölgesi:* Marmara Denizi'nin çevresindeki bölgelerde de petrol rezervleri olabileceği düşünülmektedir. Ancak bu bölgelerdeki rezervlerin miktarı ve potansiyeli diğer bölgelere kıyasla daha az belirlidir (Lokman, 1958: 96).

- *Ege Bölgesi:* Ege Denizi'nin kıyı bölgelerinde de petrol potansiyeli olduğuna dair araştırmalar yapılmaktadır. Ancak buradaki rezervlerin miktarı ve potansiyeli de henüz tam olarak belirlenmemiştir (Lokman, 1958: 99).
- *Güneydoğu Anadolu Bölgesi:* Diyarbakır, Şanlıurfa ve çevresinde petrol rezervleri bulunmaktadır. Bu rezervler genellikle kumtaşı ve kalker formasyonlarında yer alır (Akalin, 2014: 51-66).

Türkiye'nin Petrol Formasyonlarının Potansiyeli ve Gelecekteki Önemi

Petrol, modern endüstrinin temel kaynaklarından biridir ve bir ülkenin ekonomik kalkınması ve enerji güvenliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Türkiye, çeşitli jeolojik yapıları ve tortul kayaçlarıyla zengin bir petrol potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel, ülkenin enerji arzını çeşitlendirmesi, dışa bağımlılığını azaltması ve ekonomik büyümeyi desteklemesi açısından büyük önem taşır (Palabıyık ve Özdemir, 2019: 15).

Türkiye, farklı jeolojik bölgelerde çeşitli petrol formasyonlarına sahiptir. Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu, Trakya, Ege ve Karadeniz gibi bölgelerde farklı yapılar ve kayaçlar bulunur. Bu çeşitlilik, Türkiye'nin petrol potansiyelini zenginleştirir ve farklı bölgelerde farklı tipte rezervlerin bulunmasına olanak tanır (Kökyay, 2008: 39).

Son yıllarda yapılan teknolojik gelişmeler, Türkiye'nin petrol rezervlerini keşfetme ve çıkarımını daha verimli hale getirme potansiyelini artırmıştır. Modern sismik görüntüleme teknikleri, derin deniz sondajı ekipmanları ve veri analitiği gibi teknolojiler, Türkiye'nin yeraltı kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanmasına olanak sağlar (Acun, 1949: 307).

Türkiye, enerji arzının çeşitlendirilmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından petrol ve doğalgazda kendi kaynaklarını kullanma stratejisini benimsemiştir. Bu kapsamda, yerel petrol rezervlerinin keşfi ve çıkarımı, ülkenin enerji bağımsızlığını artırabilir ve enerji güvenliğini sağlayabilir (Acun, 1949: 308).

Petrol endüstrisi, istihdam yaratma, yerel ekonomilere katkı sağlama ve altyapı geliştirmeye yönelik yatırımlar aracılığıyla Türkiye'nin ekonomik ve sosyal kalkınmasına katkıda bulunabilir. Petrol rezervlerinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, ülkenin ekonomik büyümesini destekleyebilir ve gelir düzeyini artırabilir (Druit, 1961). Petrol endüstrisinin çevresel etkileri ve yerel toplumlar üzerindeki sosyal etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Petrol çıkarımı ve rafinajı süreçleri, çevresel kirlilik, su ve hava kirliliği gibi sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, petrol endüstrisinin sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi ve çevresel etkilerin minimize edilmesi önemlidir (Akalin, 2014: 61).

Türkiye'nin petrol formasyonlarının potansiyeli ve gelecekteki önemi, ülkenin enerji arzının güvence altına alınması, ekonomik kalkınması

ve sosyal refahın artırılması açısından büyük bir potansiyele sahiptir (Akalin, 2014: 61-63).

DÜNYADA PETROL FORMASYONLARI

Dünya genelindeki petrol formasyonları, organik madde içeren tortul kayaçların uzun süreli termal ve kimyasal dönüşümler sonucunda oluşan jeolojik oluşumlardır. Bu formasyonlar dünyanın çeşitli bölgelerinde bulunmakta olup genellikle kumtaşı, kalker, çamurtaşı gibi kayaçlardan oluşur.

Jeolojik yapıları ve özellikleri, rezervlerin keşfi ve çıkarımı için önemli belirleyicilerdir. Dünya petrol formasyonları, farklı derinliklerde ve jeolojik koşullarda bulunabilirler ve petrol endüstrisi tarafından çeşitli jeolojik araştırma ve sondaj teknikleriyle keşfedilirler (Acun, 1949: 352).

Tarihsel Gelişim

Dünya genelinde, petrol endüstrisinin tarihsel gelişimi büyük önem taşır. Petrol arama ve üretimi faaliyetleri, sanayi devriminin başlangıcından itibaren giderek artmış ve zaman içinde çeşitli dönemlerde önemli dönüşümler yaşamıştır.

Bu bölümde, dünya petrol endüstrisinin tarihsel gelişimi başlıklar altında incelenmiş ve belirli dönemlerdeki gelişmeler analiz edilmiştir. Bu bölümde, Türkiye'nin petrol endüstrisinin tarihsel gelişimini 1850'lerden günümüze kadar olan dönemi aralığında başlıklar altında incelenmiştir (Acun, 1949: 352-368).

1850'ler

1850'lerde, petrolün endüstriyel kullanımı dünya genelinde hızla artmaya başlamıştır. Bu dönemde petrol, genellikle kara sularında doğal olarak bulunan petrol kaynaklarından sağlanmaktadır. İlk petrol kuyuları, ABD'nin Pennsylvania eyaletindeki Titusville'de Edwin Drake tarafından açılmıştır. Bu kuyu, dünyanın ilk ticari petrol kuyusu olarak kabul edilir (Acun, 1949: 353).

Petrol, başlangıçta aydınlatma için kullanılmaktadır. Kerosen adı verilen petrol türevi, lambaların yakılması için önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu, özellikle şehirlerde ve endüstriyel alanlarda aydınlatma ihtiyacını karşılamak için önemli bir adımdır. Ayrıca, petrolün endüstriyel kullanımı da artmıştır. Petrol, fabrikaların enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle buharlı makinelerin yerini alan petrol motorları, fabrikalarda üretim süreçlerinin hızlanmasına ve verimliliğin artmasına katkı sağlamıştır (Acun, 1949: 353).

1850'lerde petrolün yaygın kullanımıyla birlikte, petrol endüstrisi hızla büyümeye başlamıştır. Petrol şirketleri kurulmuş ve petrol üretimi ve dağıtımı için altyapı oluşturulmuştur. Bu dönem, petrol endüstrisinin

temellerinin atıldığı ve petrolün modern endüstriyel çağda stratejik bir öneme sahip olmaya başladığı bir dönemdir (Acun, 1949: 353).

1860'lar

1860'larda, dünyanın ilk ticari petrol kuyusu, Pennsylvania'daki Titusville'de (ABD) Edwin Drake tarafından açıldı. Drake'in bu kuyuyu açması, petrol endüstrisi için bir dönüm noktası oldu. Daha önce petrol, genellikle doğal olarak yüzeye çıkan sızıntılar aracılığıyla toplanıyordu ancak Drake'in başarılı kuyu açma girişimi, petrolün bilinçli olarak çıkarılmasını ve ticari olarak işlenmesini sağladı (Acun, 1949: 354). Bu dönemde petrol üretimi artmaya başladı ve petrol, özellikle kerosen üretimi için ana kaynak haline geldi. Kerosen, petrolün distilasyonu ile elde edilen bir üründü ve aydınlatma için yaygın olarak kullanılıyordu. Petrolün bu yeni kullanımı, petrol endüstrisinin büyümesini ve petrol arama ve çıkarımı faaliyetlerinin hızlanmasını sağladı (Acun, 1949: 354-355).

Drake'in başarısı, dünya genelinde petrol arama ve üretim faaliyetlerinin artmasına ve petrol endüstrisinin yayılmasına yol açtı. Diğer ülkelerde de benzer kuyular açılmaya başlandı ve petrol endüstrisi giderek küresel bir ölçeğe ulaştı. Bu dönem, petrolün modern endüstriyel çağda stratejik bir öneme sahip olmaya başladığı ve petrol endüstrisinin dünya ekonomisindeki rolünün giderek arttığı bir dönem olarak kabul edilir (Acun, 1949: 354-355).

1870'ler

1870'lerde, dünyanın dört bir yanında petrol arama faaliyetleri hız kazandı. Petrolün ticari olarak çıkarılmasının başarıyla kanıtlanması, diğer bölgelerde de petrol arama çabalarını tetikledi. Yeni petrol kuyuları açıldı ve petrol endüstrisi hızla genişlemeye başladı (Acun, 1949: 355).

Bu dönemde, petrol şirketleri kuruldu ve petrol arama ve çıkarımı için yeni teknolojiler geliştirildi. Özellikle ABD'de, Standard Oil gibi büyük petrol şirketleri kuruldu ve endüstrideki hakimiyetlerini sağlamlaştırdılar. Bu şirketler, petrol arama faaliyetlerini genişleterek ve yeni pazarlara girmek suretiyle petrol endüstrisinin büyümesine önemli katkılar sağladılar (Acun, 1949: 355).

Petrol, 1870'lerde aydınlatma, ısınma ve endüstriyel kullanım için giderek daha önemli hale geldi. Özellikle aydınlatma için kullanılan kerosen, evlerin ve sokakların aydınlatılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Ayrıca, petrol, endüstriyel tesislerin enerji kaynağı olarak da kullanılmaya başlandı, bu da petrolün ekonomik ve stratejik önemini daha da artırdı (Acun, 1949: 355-356).

1870'ler, petrol endüstrisinin hızla genişlediği ve petrolün modern endüstriyel çağda vazgeçilmez bir kaynak haline geldiği bir dönemdir. Bu dönemde yaşanan gelişmeler, petrol endüstrisinin küresel ölçekte

yayılmasına ve petrolün ekonomik ve stratejik öneminin giderek artmasına katkı sağladı (Acun, 1949: 355-356).

1880'ler

1880'lerde petrol endüstrisi, hızla büyümeye devam etti ve bu dönemde petrol, yeni alanlarda kullanılmaya başlandı. Özellikle motorlu taşıtların ve fabrikaların güç kaynağı olarak petrol kullanımı arttı. Bu dönemde petrol, önemli bir endüstriyel ve ekonomik güç haline geldi (Acun, 1949: 357). Motorlu taşıtların ve fabrikaların yaygınlaşmasıyla birlikte, petrolün endüstriyel kullanımı hızla arttı. Motorlu araçların ve makine gücünün petrole çalıştırılması, endüstriyel üretimde büyük bir dönüşümü tetikledi. Bu dönemde petrol, özellikle ulaşım sektöründe önemli bir rol oynamaya başladı. Daha önce atlı arabalarla yapılan taşımacılık, petrol motorlu araçlarla yapılan taşımacılıkla yer değiştirdi (Acun, 1949: 357).

Fabrikalarda da petrol kullanımı yaygınlaştı. Buhar gücü yerine petrol motorları, fabrikaların enerji ihtiyacını karşılamak için tercih edilmeye başlandı. Bu, üretim süreçlerini daha verimli hale getirdi ve endüstriyel üretimde bir patlamaya yol açtı (Acun, 1949: 357). 1880'lerde petrol, ekonomik güç haline geldi ve endüstriyel faaliyetlerin temel bir bileşeni haline geldi. Petrol endüstrisinin büyümesiyle birlikte, petrol şirketleri daha da büyüdü ve endüstrinin kontrolünü ellerine aldılar. Ayrıca, petrolün bu yeni kullanımları, petrol talebinin artmasına ve petrol endüstrisinin daha da genişlemesine neden oldu. Bu dönem, petrolün modern endüstriyel çağda vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline geldiği ve petrol endüstrisinin ekonomik ve stratejik öneminin giderek arttığı bir dönemdir (Acun, 1949: 358).

1900'ler

1900'lerde, petrol endüstrisi hızla küreselleşmeye başladı. Bu dönemde, dünya genelinde yeni petrol rezervleri keşfedildi ve petrol ihracatı arttı. Petrol, stratejik bir kaynak haline geldi ve uluslararası ilişkilerin merkezine oturdu (Kattai ve Lökk, 1998: 107). Petrol endüstrisinin küreselleşmesi, petrol arama ve üretim faaliyetlerinin daha geniş bir coğrafyaya yayılması anlamına geliyordu. Dünya genelinde yeni petrol rezervleri keşfedildi ve bu, petrolün üretim ve ticaretinde önemli bir artışa yol açtı. Özellikle Orta Doğu'da bulunan petrol rezervlerinin keşfi, bölgenin dünya petrol piyasasında önemli bir aktör haline gelmesine neden oldu (Acun, 1949: 358-359).

Petrolün stratejik bir kaynak haline gelmesi, uluslararası ilişkileri de etkiledi. Petrol, sanayi için vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline geldiği için, petrol rezervlerine sahip olan ülkelerin jeopolitik önemi arttı. Bu dönemde, petrol zengini bölgelerin kontrolü için rekabet arttı ve bazı durumlarda çatışmalar yaşandı (Acun, 1949: 359). 1900'lerde petrol, modern

endüstriyel çağın en önemli enerji kaynaklarından biri haline geldi. Petrol endüstrisinin küreselleşmesi ve petrolün stratejik öneminin artması, dünya ekonomisini ve uluslararası ilişkileri derinden etkiledi. Bu dönem, petrolün dünya genelindeki yaygın kullanımının ve öneminin doruğa ulaştığı bir dönem olarak kabul edilir (Acun, 1949: 359).

1920'ler ve 1930'lar

1920'ler ve 1930'lar, petrol endüstrisinde hızlı bir büyüme ve gelişme dönemi idi. Bu dönemde, petrol arama ve üretimi faaliyetleri hızla arttı ve yeni petrol sahaları keşfedildi (Acun, 1949: 360). 1920'lerin başlarına kadar petrol aramaları ve üretimi dünya genelinde hızla arttı. Yeni teknolojilerin kullanımı ve petrol arama faaliyetlerine yapılan yatırımlar, petrol rezervlerinin keşfini hızlandırdı. Özellikle ABD ve Orta Doğu'da yeni petrol sahaları keşfedildi ve bu, dünya petrol üretiminin artmasına ve petrol endüstrisinin büyümesine katkı sağladı (Acun, 1949: 360-362).

Bu dönemde, petrol endüstrisi uluslararası alanda büyümeye devam etti. Büyük petrol şirketleri, dünya genelinde faaliyetlerini genişletti ve yeni pazarlara girdi. Özellikle Orta Doğu'daki petrol sahalarının keşfi, bölgenin dünya petrol piyasasındaki rolünü güçlendirdi ve petrol endüstrisinin küreselleşmesine katkı sağladı (Acun, 1949: 360-362). 1920'ler ve 1930'lar, petrol endüstrisinin büyümesi ve gelişmesi için önemli bir dönemdi. Yeni petrol sahalarının keşfi ve petrol endüstrisinin uluslararası alanda genişlemesi, dünya petrol piyasasının şekillenmesinde ve petrolün ekonomik ve stratejik öneminin artmasında önemli rol oynadı (Kattai ve Lokk, 1998: 102-103).

1940'lar ve 1950'ler

1940'lar ve 1950'ler, petrol endüstrisinde büyük bir genişleme ve gelişme dönemi idi. Bu dönemde, petrol arama ve üretimi hızla arttı ve özellikle Orta Doğu'da yeni petrol sahaları keşfedildi, bu da bölgeyi dünya petrol rezervlerinin önemli bir kaynağı haline getirdi (Acun, 1949: 365). Petrol arama ve üretimi, 1940'larda ve 1950'lerde dünya genelinde hızla genişledi. Yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve petrol arama faaliyetlerine yapılan yatırımlar, petrol rezervlerinin keşfini hızlandırdı. Özellikle Orta Doğu'da, Suudi Arabistan, Irak, Kuveyt ve diğer bazı ülkelerde büyük petrol sahaları keşfedildi. Bu sahaların keşfi, Orta Doğu'nun dünya petrol rezervlerindeki payını önemli ölçüde artırdı ve bölgeyi dünya petrol piyasasında merkezi bir konuma getirdi (Acun, 1949: 365).

Bu dönemde, petrol endüstrisi küresel çapta büyümeye devam etti. Büyük petrol şirketleri, Orta Doğu'daki yeni petrol sahalarının geliştirilmesi ve işletilmesi konusunda önemli roller üstlendi. Orta Doğu'daki petrol rezervlerinin keşfi, petrol endüstrisinin uluslararası alanda daha da genişlemesine ve petrolün küresel pazarlarda daha fazla kullanılmasına yol açtı (Acun, 1949: 365-366). 1940'lar ve 1950'ler, petrol endüstrisinin

genişlemesi ve Orta Doğu'nun petrol üretimindeki artışıyla birlikte dünya petrol piyasasının şekillenmesinde kritik bir rol oynadı. Orta Doğu'nun petrol rezervlerinin keşfi, bölgenin jeopolitik ve ekonomik önemini artırdı ve dünya petrol arzının büyük bir kısmını bu bölgeden sağlanmaya başladı. Bu dönem, petrolün uluslararası alanda stratejik bir kaynak haline geldiği ve petrol endüstrisinin küreselleşmesinin hız kazandığı bir dönem olarak kabul edilir (Acun, 1949: 365-366).

1960'lar ve 1970'ler

1960'lar ve 1970'ler, petrol endüstrisinin büyümesiyle birlikte önemli değişimlerin yaşandığı bir dönemdir. Bu dönemde, petrol krizleri yaşanırken, OPEC'in kurulması ve petrol fiyatlarının artmasıyla birlikte, petrolün stratejik önemi daha da vurgulanmıştır (Acun, 1949: 368-371). Petrol endüstrisi 1960'lar ve 1970'ler boyunca büyümeye devam etti. Dünya genelinde petrol talebinin artmasıyla birlikte, petrol üretimi ve ihracatı da arttı. Ancak, bu dönemde petrol krizleri de yaşandı. Özellikle Ortadoğu'daki siyasi gerginlikler ve bölgesel çatışmalar, petrol arzını etkiledi ve petrol fiyatlarının dalgalanmasına neden oldu (Acun, 1949: 368-371).

1960'larda, petrol ihracatçısı ülkeler arasında birlik oluşturmak amacıyla OPEC (Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü) kuruldu. OPEC'in kurulması, petrol endüstrisinin uluslararası alandaki dengelerini önemli ölçüde etkiledi. OPEC'in artan etkisi, petrol fiyatlarının belirlenmesinde ve petrol ticaretinde daha fazla söz sahibi olmasına neden oldu (Acun, 1949: 368-371). Petrol fiyatlarının artmasıyla birlikte, petrolün stratejik önemi daha da vurgulandı. Petrol, endüstriyel üretimin temel bir bileşeni haline gelirken, enerji güvenliği ve tedarik zincirlerinin sağlamlığı uluslararası politika gündeminin önemli bir parçası haline geldi (Acun, 1949: 368-371). 1960'lar ve 1970'ler, petrol endüstrisinde büyüme ve değişimle birlikte yaşanan zorluklarla dolu bir dönemdi. Petrol krizleri ve OPEC'in etkisi, petrolün uluslararası alandaki stratejik önemini daha da artırdı ve petrol endüstrisinin gelecekteki gelişimini şekillendirdi (Acun, 1949: 368-371).

1980'ler ve 1990'lar

1980'ler ve 1990'lar, petrol endüstrisinde önemli teknolojik gelişmelerin yaşandığı bir dönemdi. Bu dönemde, yeni teknikler ve teknolojilerin kullanımı petrol rezervlerinin keşfinde ve çıkarımında önemli bir rol oynadı. Özellikle derin deniz sondajı ve sismik görüntüleme gibi yeni teknikler, petrol endüstrisinin potansiyelini artırdı (Acun, 1949: 372). 1980'ler ve 1990'lar, petrol endüstrisinde teknolojik gelişmelerin hızla ilerlediği bir dönem olarak bilinir. Bu dönemde, petrol arama ve üretiminde kullanılan yeni teknikler ve ekipmanlar geliştirildi ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandı. Özellikle derin deniz sondajı teknolojisinin gelişmesi, deniz tabanlarının altındaki petrol rezervlerinin keşfedilmesini mümkün

kıldı. Bu, petrol endüstrisinin potansiyel rezervlerinin artmasına ve üretim kapasitesinin genişlemesine yol açtı (Acun, 1949: 372).

Sismik görüntüleme de 1980'ler ve 1990'larda petrol endüstrisinde önemli bir yer edindi. Bu teknik, yer altındaki petrol ve gaz rezervlerinin daha ayrıntılı bir şekilde görüntülenmesini sağladı ve bu da petrol arama ve üretiminde daha verimli bir şekilde kullanılmasını mümkün kıldı. Sismik görüntüleme, jeolojik yapıları incelemek ve petrol rezervlerini belirlemek için kullanılan en yaygın tekniklerden biri haline geldi (Acun, 1949: 372-373). Bu dönemdeki teknolojik gelişmeler, petrol endüstrisinin kapasitesini artırdı ve petrolün daha verimli bir şekilde aranması ve çıkarılması sağlandı. Derin deniz sondajı ve sismik görüntüleme gibi yeni teknikler, petrol endüstrisinin gelecekteki büyümesine ve petrol rezervlerinin daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkı sağladı (Acun, 1949: 372-373).

2000'ler ve sonrası

2000'ler ve sonrası, petrol endüstrisinin gelişiminde hem yeni fırsatlar hem de yeni zorluklarla dolu bir dönemdi. Bu dönemde, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artarken, petrol endüstrisi hala küresel enerji arzının önemli bir parçası olarak kalmaya devam etti. Ayrıca, teknolojik gelişmelerin devam etmesi, petrol rezervlerinin keşfi ve çıkarımı konusunda önemli yeniliklere yol açtı (Acun, 1949: 375). 2000'lerin başlarından itibaren, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmaya başladı. Bu dönemde, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar arttı ve bu kaynaklar enerji üretiminde daha önemli bir role sahip oldu. Ancak, petrol endüstrisi hala küresel enerji talebinin büyük bir kısmını karşılıyordu ve petrol, ulaşım, sanayi ve enerji üretimi gibi alanlarda temel bir enerji kaynağı olarak kullanılmaya devam ediyordu (Acun, 1949: 375-377).

Teknolojik gelişmelerin devam etmesi, petrol endüstrisinde de önemli değişikliklere yol açtı. Bu dönemde, petrol rezervlerinin keşfi ve çıkarımı için daha verimli ve çevre dostu yöntemler geliştirildi. Yüksek teknoloji kullanımı sayesinde, daha derin ve karmaşık petrol rezervlerine erişim kolaylaştı ve petrol üretiminde verimlilik arttı (Acun, 1949: 375-377). 2000'ler ve sonrası dönemde, petrol endüstrisi hala küresel enerji arzının temelini oluştururken, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve teknolojik gelişmelerin devam etmesi, petrol endüstrisinin geleceği üzerinde etkili olmaya devam ediyor. Bu dönem, hem petrol endüstrisinin önemini sürdürdüğü hem de enerji sektöründe değişim ve dönüşümün yaşandığı bir zaman dilimi olarak değerlendirilir (Acun, 1949: 375-377).

Coğrafi Dağılım

Dünya genelinde petrol formasyonları coğrafi olarak çeşitli bölgelere dağılmıştır. Petrolün bulunduğu bölgeler genellikle tortul kayaçların

biriktiği, jeolojik olarak aktif alanlardır. Bu bölgeler genellikle kara ve denizaltı alanlarını kapsar (Gürel, 2018: 108).

- Orta Doğu ve Kuzey Afrika, dünyanın en büyük petrol rezervlerine sahip bölgelerden biridir. Özellikle Suudi Arabistan, Irak, İran, Birleşik Arap Emirlikleri ve Kuveyt gibi ülkeler, dünyanın en büyük petrol üreticisi ve ihracatçısı konumundadır. Bu bölgedeki petrol formasyonları genellikle kumtaşı ve kalker gibi kayalarından oluşur (Gürel, 2018: 108-109).
- Kuzey Amerika, ABD ve Kanada gibi ülkelerde önemli petrol rezervlerine sahiptir. Özellikle ABD'nin Teksas, Alaska ve Kuzey Dakota gibi eyaletlerinde büyük petrol sahaları bulunmaktadır. Ayrıca Kanada'nın Alberta eyaletindeki Alberta Tar Sands gibi petrol yatakları da önemlidir. Kuzey Amerika'daki petrol formasyonları genellikle kumtaşı, şeyl ve kalker gibi kayalarından oluşur (Güleç ve Önen, 1993: 12).
- Avrupa kıtası da bazı önemli petrol rezervlerine sahiptir. Özellikle Kuzey Denizi'nde ve Rusya'nın Sibirya bölgesinde büyük petrol yatakları bulunmaktadır. Avrupa'daki petrol formasyonları genellikle kumtaşı, kireçtaşı ve çakıtaşı gibi kayalarından oluşur (Güleç ve Önen, 1993: 12).
- Asya Pasifik bölgesi, Çin, Hindistan, Malezya ve Endonezya gibi ülkelerde önemli petrol rezervlerine sahiptir. Bu bölgedeki petrol formasyonları genellikle kumtaşı ve karbonat kayalarından oluşur (Güleç ve Önen, 1993: 13).
- Güney Amerika kıtası, özellikle Venezuela ve Brezilya gibi ülkelerde önemli petrol rezervlerine sahiptir. Bu bölgedeki petrol formasyonları genellikle petrol kumları ve şeyl gibi kayalarından oluşur (Güleç ve Önen, 1993: 14).

Dünyadaki Önemli Formasyonlar

Dünya genelindeki daha fazla petrol rezervlerine sahip olan 10 önemli formasyon bu bölümde incelenmiştir.

- *Ghawar (Suudi Arabistan)*: Dünyanın en büyük petrol sahası olarak kabul edilir ve Suudi Arabistan'ın Doğu Bölgesi'nde yer alır. Yaklaşık 70 milyar varil rezervle dünya petrol rezervlerinin %5'ini oluşturur.
- *Burgan (Kuveyt)*: Kuveyt'in en büyük petrol sahasıdır ve dünyanın en büyük ikinci petrol sahasıdır. Tahmini rezervleri 66 milyar varil civarındadır.
- *Safaniya (Suudi Arabistan)*: Suudi Arabistan'ın Pers Körfezi kıyısında bulunan bu saha, dünyanın en büyük deniz altı petrol sahasıdır. Rezervleri yaklaşık 50 milyar varildir.

- *Rumaila (Irak)*: Basra Körfezi'nde yer alan bu saha, Irak'ın en büyük petrol sahasıdır. Rezervleri yaklaşık 50 milyar varil olarak tahmin edilmektedir.
- *Orinoco Kuşağı (Venezüella)*: Güney Amerika'da bulunan bu kuşak, dünyanın en büyük petrol rezervlerinden birine sahiptir. Ağır ham petrol içeren kuşak, tahmini olarak 300 milyar varil petrol rezervine sahiptir.
- *Gachsaran (İran)*: İran'ın en büyük petrol sahasıdır ve Orta Zagros Dağları'nda yer alır. Rezervleri yaklaşık 60 milyar varildir.
- *Prudhoe Bay (ABD - Alaska)*: Alaska'nın Kuzey Kutbu sahilinde bulunan bu saha, ABD'nin en büyük petrol sahasıdır. Rezervleri yaklaşık 25 milyar varil civarındadır.
- *Cantarell (Meksika)*: Meksika Körfezi'nde yer alan bu saha, Meksika'nın en büyük petrol sahasıdır. Rezervleri yaklaşık 18 milyar varildir.
- *Bakken (ABD - Kanada)*: ABD ve Kanada sınırları içinde bulunan Bakken Formasyonu, ABD'nin en büyük petrol rezervlerinden biridir. Rezervleri yaklaşık 20 milyar varil civarındadır.
- *Pre-Salt Havzaları (Brezilya)*: Brezilya'nın Atlantik Okyanusu'nda bulunan bu derin deniz petrol sahaları, önemli miktarda petrol rezervine sahiptir. Rezervlerin tam miktarı net olarak belirlenmemiş olsa da oldukça büyük olduğu tahmin edilmektedir (Altun, 2006: 212-219).

Dünyanın Petrol Formasyonlarının Potansiyeli ve Gelecekteki Önemi

Dünya genelindeki petrol formasyonlarının potansiyeli ve gelecekteki önemi, birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir (Gürel, 2018: 114). Petrol formasyonlarının potansiyeli, içerdikleri petrol miktarı ve ne kadarının ekonomik olarak çıkarılabilir olduğuna bağlıdır. Büyük rezervlere sahip olmak önemlidir, ancak bu rezervlerin çıkarılması ve işlenmesi için uygun teknoloji ve altyapıya da ihtiyaç vardır (Güleç ve Önen, 1993: 17-19).

Petrol endüstrisindeki teknolojik gelişmeler, daha önce erişilemeyen rezervlere ulaşmayı ve mevcut rezervlerin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Hidrolik kırılma gibi teknolojiler, özellikle sıkı kayalardan petrol ve gaz çıkarmak için önemlidir.

Çevresel kaygılar, fosil yakıtların kullanımıyla ilgili endişeler ve sera gazı emisyonları, petrolün gelecekteki önemini etkileyebilir. Daha sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme eğilimi, petrol talebini azaltabilir. Petrol, jeopolitik güç dengelerinde önemli bir rol oynamaya devam etmektedir. Büyük petrol rezervlerine sahip ülkeler, küresel ekonomi ve siyasette belirleyici bir etkiye sahip olabilirler (Güleç ve Önen, 1993: 19).

Gün geçtikçe, güneş, rüzgar, hidrojen ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırımlar artmaktadır. Bu, petrolün gelecekteki önemini azaltabilir (İlhan, 1961: 63). Küresel ekonomik büyüme,

endüstrileşme ve nüfus artışı, petrol talebini etkileyen önemli faktörlerdir. Gelişen ekonomilerin enerji talepleri, petrolün gelecekteki önemini belirleyen unsurlardan biridir (İlhan, 1961: 65).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Türkiye ve Dünya genelindeki petrol formasyonlarının potansiyeli ve gelecekteki önemini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Petrol formasyonlarının potansiyeli, içerdikleri rezerv miktarı ve çıkarılabilirlik derecesine bağlıdır. Türkiye ve Dünya genelindeki çeşitli bölgelerde önemli petrol rezervleri bulunmaktadır, ancak bu rezervlerin çıkarılması ve işlenmesi için uygun teknoloji ve altyapıya ihtiyaç vardır. Gelecekteki önem açısından, petrol endüstrisinin sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri önemli bir odak noktası olmalıdır. Teknolojik gelişmeler, çevresel kaygılar, jeopolitik faktörler ve alternatif enerji kaynakları, petrolün gelecekteki rolünü etkileyebilir. Petrol endüstrisi, çevresel etkileri en aza indirecek ve uzun vadeli sürdürülebilirlik sağlayacak teknolojik ve operasyonel gelişmelere odaklanmalıdır.

Alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarına daha fazla yatırım yapılmalıdır. Güneş, rüzgar, hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji portföyünün çeşitlendirilmesine ve petrol bağımlılığının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Petrol endüstrisi, jeopolitik risklerin değerlendirilmesine önem vermeli ve enerji güvenliği stratejileri geliştirmelidir. Jeopolitik çatışmalar ve krizler, petrol arzını ve fiyatlarını etkileyebilir.

Enerji verimliliğini artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak, petrol talebini azaltabilir ve enerji güvenliğini artırabilir. Endüstri, bina, ulaşım ve diğer sektörlerde enerji verimliliği politikaları uygulamalıdır. Bu sonuçlar ve öneriler, petrol endüstrisi liderleri, politika yapımcıları ve akademisyenler için önemli bir yol haritası sunmaktadır. Gelecekte, petrolün rolünü şekillendiren faktörlerin dikkate alınması ve stratejik kararlar alınması önemlidir. Sürdürülebilirlik, çevresel kaygılar ve enerji güvenliği, petrol endüstrisinin geleceğini belirleyen kritik unsurlardır ve bu bağlamda yapılan politika ve yatırımların uzun vadeli etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

REFERANSLAR

- Acun, N. (1949). Dünya petrol tarihi ve Türk petrolü. *Şaka Matbaası*, İstanbul.
- Akalın, U., ve Tüfekçi, S. (2014). Türkiye'nin petrol politikaları ve enerji özelleştirmelerine bir bakış. *Journal of Economic Policy Researches*, 1 (1), 51-66.
- Altun, N. E., Hıcıymaz, C., Hwang, J. Y., Suat Bağcı, A. ve Kök, M. V. (2006). Oil Shales In The World And Turkey; Reserves, *Current Situation And Future Prospects: A Review*. Oil Shale, 23 (3).

- Druit, C. E. (1961). Report on the petroleum prospect of Thrace, Turkey: Turkish Gulf Oil Co. TPAO Archive.
- Ekinci, N. (2015). Her yönüyle petrolün kenti Batman ve ilçeleri tarihi. *Batmane Yayınevi*, İstanbul.
- Güleç, K., ve Önen, A. (1993). Turkish oil shales: reserves, characterization and utilization. In Proceedings of the 1992 Eastern Oil Shale Symposium, University of Kentucky, *Institute for Mining and Minerals Research, Lexington*, 12-24.
- Gürel, Ş.S. (2018). Orta Doğu petrolünün uluslararası politikadaki yeri. *İmge Kitapevi*, Ankara.
- İlhan, E. (1961). Türkiye petrol araştırmaları. *Scientific Mining Journal*, 1 (2), 63-67.
- Kattai, V. ve Lokk, U. (1998). Historical review of the kukersite oil shale exploration in Estonia. *Oil Shale*, 15 (2), 102-110.
- Kökyay, F. (2008). 1923'ten günümüze Türkiye Cumhuriyeti'nin petrol yatırım politikaları, Doktora Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi Enstitüsü*, Ankara.
- Lokman, K. (1958). Memleketimizde petrol araştırmaları. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 6 (2), 91-114.
- Palabıyık, Y., ve Özdemir, A. (2019). Oil and gas seeps in Turkey: A review. In 7th International Symposium on Academic Studies in Science, *Engineering and Architecture Sciences*, 15-17.
- Uzkut, İ. (1969). Türkiye trakyası petrol jeolojik niteliğinin özeti. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 73 (73), 39-49.

Sismik İzolatörler

Ömer SEÇGİN^{*,1}

Mustafa Ali Ergün ERTÜRK¹

- 1- Doç. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. omersecgin@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6158-3164
- 2- Prof. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü mustafaerturk@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0517-6940

ÖZET

Tarih boyunca insanlık depremlerden etkilenmiştir. Depremler oluşturdıkları büyük darbe etkileriyle binaları ve yapıları sarsmaktadır. Bu sarsıntılardan sadece binalar değil binaların içinde bulunan eşyalar ve cihazlar da etkilenmektedir. Bu etkileri azaltmak için çeşitli izolatörler geliştirilmiştir. Sismik izolatörler, yapıların deprem sırasında maruz kaldığı dinamik yükleri azaltarak hasarı en aza indiren teknolojik çözümlerdir. Bu izolatörler, genellikle yapıların temel seviyesine yerleştirilir ve yapının esnek hareket etmesini sağlar. Sismik izolatörler, düşey yönde rijit, yatay yönde ise esnek davranış gösteren malzemelerden yapılır. Bu sayede, deprem sırasında yapının yatay hareketleri izolatörler tarafından emilir ve üst yapıya daha az kuvvet iletilir. Sismik izolatörler, yüksek sönümlü izolatörler, kurşun çekirdekli izolatörler ve sürtünme tipi izolatörler gibi çeşitli türlere ayrılır. Yüksek sönümlü izolatörler, deprem enerjisinin büyük bir kısmını sönümleyerek yapının güvenliğini artırır. Kurşun çekirdekli izolatörler, kurşun ve kauçuk malzemelerin birleşimiyle yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Binalarda kullanılan sismik izolatörlerin yanı sıra, silo, makine, server vb cihaz ve sistemler için geliştirilmiş sismik izolatörler de bulunmaktadır. Bu çalışmada sismik izolatörler ve türleri incelenmiştir. İzolatörler kullanım alanlarına göre gruplandırılarak bu konuda çalışacak olan bireylere rehberlik etmek amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Deprem, İzolatör, Sismik İzolatör

GİRİŞ

Depremler, dünya genelinde büyük yıkımlara ve can kayıplarına neden olan doğal afetler arasında yer almaktadır. Özellikle deprem kuşağında bulunan ülkelerde, yapıların depreme dayanıklı hale getirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sismik izolatörler, binaların ve cihazların deprem etkilerinden korunmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Sismik izolatörler, yapıların temel seviyesinde kullanılan ve deprem sırasında yapının maruz kaldığı titreşimleri azaltarak hasarı en aza indiren teknolojik cihazlardır (Zulfakar ve Karakaş 2022). Bu izolatörler, yapının zeminle olan bağlantısını esnek hale getirerek, deprem dalgalarının yapıya iletilmesini engeller. Böylece, yapıların deprem sırasında daha az hareket etmesi sağlanır ve hem yapısal hasar hem de iç mekanlardaki eşyaların zarar görmesi önlenir.

Sismik izolatörlerin kullanımı, özellikle yüksek riskli bölgelerdeki binalar için büyük avantajlar sunmaktadır. Bu izolatörler, sadece binaların değil, aynı zamanda köprüler, viyadükler ve çeşitli endüstriyel tesisler gibi kritik altyapıların da korunmasında etkili bir çözüm sunar (Kuru ve Aydemir 2023). Ayrıca, hastaneler, okullar ve kamu binaları gibi insanların yoğun

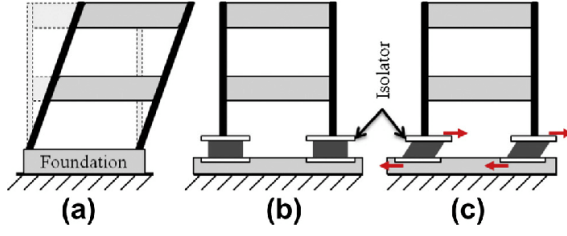
olarak bulunduğu yerlerde de sismik izolatörlerin kullanımı, can güvenliğini artırmak açısından büyük önem taşır.

Sismik izolatörler, farklı tiplerde ve özelliklerde olabilir. Yüksek sönümlü izolatörler, kurşun çekirdekli izolatörler ve sürtünme tipi izolatörler gibi çeşitli türleri bulunmaktadır. Her bir izolatör tipi, belirli koşullar ve ihtiyaçlar doğrultusunda seçilerek uygulanır. Örneğin, yüksek sönümlü izolatörler, deprem enerjisinin büyük bir kısmını sönümleyerek yapının daha stabil kalmasını sağlar.

Sismik izolatörler, binaların ve diğer yapıların deprem sırasında maruz kaldığı sarsıntıları azaltmak amacıyla kullanılan cihazlardır (Özdemir, Akçaer, ve Soyluk 2015). Bu izolatörler, yapının temelinden gelen hareketleri sönümleyerek yapının daha az hasar görmesini sağlar. Sismik izolatörler, kullanım alanlarına göre çeşitli türlere ayrılabilir:

- Elastomerik İzolatörler:
 - Doğal Kauçuk İzolatörler: Yüksek esneklik ve dayanıklılık sağlar. Genellikle köprüler ve yüksek binalarda kullanılır (Pinarbasi ve Akyuz 2005).
 - Sentetik Kauçuk İzolatörler: Kimyasal dayanıklılığı artırılmıştır ve çeşitli çevresel koşullara karşı daha dirençlidir.
- Sarkaç Tipi (Kaymalı) İzolatörler:
 - Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler: Yapının hareketini sarkaç hareketiyle kontrol eder ve enerji sönümlemesi sağlar (Severcan ve Şen 2019).
 - Düzlemsel Kaymalı İzolatörler: Yapının yatay hareketlerini kontrol eder ve sürtünme yoluyla enerji sönümler.

Depreme karşı koruyucu etkisi aşıkâr olan sismik izolatörlerin hastane vb bazı binalarda monte edilmesi zorunludur (Akyüz vd. 2017)(Bakkaloğlu ve Torunbalcı 2024). Bu sismik izolatörler sadece binaları korumakla kalmaz, binaların içinde bulunan insanları ve makine, cihaz, teçhizatları da korumaktadır. Şekil 1’de sismik izolatörün etkisi verilmiştir. Şekil 1’a da izolatörün kullanılmadığı durumda depremin yapıya etkisi gözükmemektedir. Şekil 1’c de ise sismik izolatörün sağladığı olumlu katkı görselleştirilmiştir. Şekil 2’de bir soğutma ünitesinde sismik izolatör kullanımı, Şekil 3’de ise bir binada sismik izolatör kullanımı verilmiştir.



Şekil 1: İzolatörün etkisi (Anonim 2024a).



Şekil 2: Bir soğutma ünitesinde sismik izolatör kullanımı (Anonim 2024b).



Şekil 3: Bir binada sismik izolatör kullanımı (Anonim 2024c)

SİSMİK İZOLATÖR ÇEŞİTLERİ

Binalarda Kullanılan İzolatörler

Lineer rulmanlı sismik izolatörler, deprem sırasında yapıların zarar görmesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu izolatörler, yapının temel seviyesine yerleştirilir ve deprem anında yapının yatay hareketlerini absorbe ederek üst yapıya iletilen kuvvetleri azaltır (Şekil 4). Lineer rulmanlı sismik izolatörlerin başlıca özellikleri:

Yatay hareket kabiliyeti: Bu izolatörler, yatay yönde büyük yer değiştirmelere izin vererek deprem enerjisini sönümler.

Düşey rijitlik: Düşey yönde rijit oldukları için yapının stabilitesini korur.

Deprem enerjisini sönümleyerek yapının hasar görmesini engeller. Bu izolatörler, özellikle yüksek binalar, köprüler ve kritik altyapılar gibi önemli yapıların korunmasında kullanılır. Deprem sırasında yapının güvenliğini sağlamak ve hasarı minimize etmek için oldukça etkili bir çözümdür.



Şekil 4: Lineer rulmanın izolatör olarak kullanılması (Anonim 2024d).

Kauçuk izolatörler, özellikle deprem bölgelerinde binaların ve köprülerin sismik koruması için kullanılan önemli yapı elemanlarıdır. Bu izolatörler, düşük sönümlü doğal kauçuk katmanlarından oluşur ve genellikle kurşun çekirdek ile desteklenir. Kurşun çekirdek, izolatörün enerji sönümleme kapasitesini artırarak, deprem sırasında yapıya gelen kuvvetleri önemli ölçüde azaltır. Kauçuk izolatörler, yapının titreşim periyodunu artırarak rezonans durumlarını önler ve deprem sonrası yapının orijinal konumuna geri dönmesini sağlar. Bu özellikleri sayesinde, kauçuk izolatörler,

yapıların depreme karşı dayanıklılığını artırarak, hasar riskini minimize eder ve uzun vadeli yapısal bütünlüğü korur.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, deprem sırasında yapıların korunması için kullanılan etkili bir sismik izolasyon yöntemidir. Bu izolatörler, dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin başlıca özellikleri (Şekil 5):

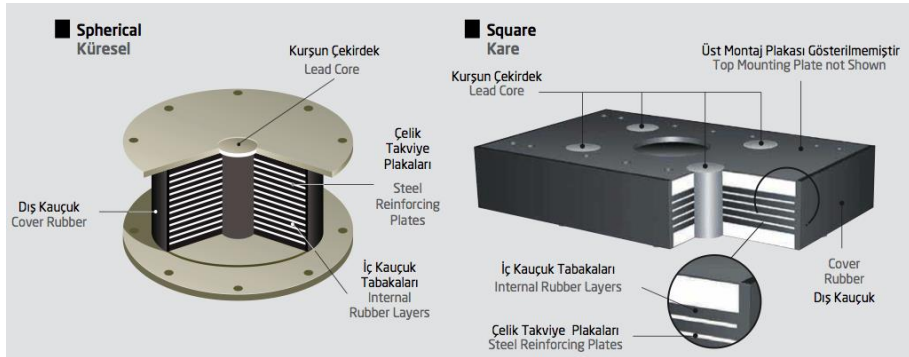
Kurşun çekirdek: İzolatörün ortasında bulunan kurşun çekirdek, enerji sönmüleme kapasitesini artırır ve yatay hareketleri kontrol eder.

Kauçuk ve çelik katmanlar: Kauçuk ve çelik tabakalar, izolatörün esnekliğini ve dayanıklılığını sağlar.

Enerji sönmüleme: Deprem enerjisini sönmüleyerek yapının hasar görmesini engeller.

Bakım gerektirmez: Atmosfere kapalı olduğu ve hareketli parçaları olmadığı için uzun ömürlüdür ve bakım gerektirmez.

Bu izolatörler, özellikle Japonya gibi deprem riski yüksek bölgelerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yapının deprem sonrası orijinal konumuna geri dönmesini sağlamaktadır (Şekil 6).



Şekil 5: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün parçaları (Anonim 2024e)



Şekil 6: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (Öztürk ve Özdemir 2022)

Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler, deprem yalıtımı için kullanılan yenilikçi cihazlardır. Bu izolatörler, küresel form verilmiş çelik plakalar ile bu plakalar arasında kayabilen çelik disklerden oluşur. Çelik plakalar ve diskler arasındaki düşük sürtünme katsayısı, yapıya etki eden deprem kuvvetlerini minimize eder. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler, yapının salınım periyodunu artırarak, yıkıcı deprem kuvvetlerinden korunmasını sağlar. Ayrıca, bu izolatörler, yapının yatay hareketlerini kontrol ederek, deprem sırasında ve sonrasında yapının stabilitesini korur. Bu özellikleri sayesinde, sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler, yapıların depreme karşı dayanıklılığını artırarak, hasar riskini önemli ölçüde azaltır.

Şekil 7’de sürtünmeli sarkaç tipi izolatör verilmiştir. Bu izolatörleri geri yükleme kuvveti olarak yerçekimini kullanır. Bu tip izolatörlerde enerji dağılımı sürtünme ile sağlanır. İzolatörün dayanımı ve verimi eğrilik yarıçapına ve sürtünme katsayısına bağlıdır. Deprem anında hem X hem de Y yönünde hareket sağlayabilmek için toplam 4 tane eğrisel temas yüzeyi bulunmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi sismik izolatörler, deprem sırasında yapıların korunması için kullanılan etkili bir sismik izolasyon yöntemidir. Bu izolatörler, küresel form verilmiş çelik plakalar ile bu plakalar arasında kayabilen çelik disklerden oluşur. Başlıca özellikleri:

Kayma hareketi: Çelik plakalar ve diskler arasındaki kayma hareketi, deprem enerjisini sönümleyerek yapıya iletilen kuvvetleri azaltır.

Geri çağırma kuvveti: İzolatörün geometrisi, deprem sonrası yapının orijinal konumuna geri dönmesini sağlar.

Düşük sürtünme katsayısı: Çelik plakalar ve diskler arasındaki düşük sürtünme katsayısı, yapıya etkiyen deprem kuvvetlerini minimize eder.

Bu izolatörler, özellikle yüksek binalar ve köprüler gibi önemli yapıların korunmasında yaygın olarak kullanılır. Deprem sırasında yapının

güvenliğini sağlamak ve hasarı minimize etmek için oldukça etkili bir çözümdür.



Şekil 7. Sürtünmeli sarkaç tipi sismik izolatör (Naimi ve Waheb 2019)

Akışkan viskoz sönümleyiciler, deprem ve diğer titreşim kaynaklı enerjiyi sönümlemek için kullanılan cihazlardır. Bu sönümleyiciler, bir piston ve silindir düzeni içinde hareket eden viskoz bir akışkan kullanarak çalışır (Şekil 8). Başlıca özellikleri:

Enerji sönümleme: Pistonun hareketi sırasında akışkanın yer değiştirmesiyle mekanik enerji ısıya dönüştürülür.

Çeşitli akışkanlar: Silikon, yağ gibi farklı akışkanlar kullanılabilir.

Çok yönlü kullanım: Deprem etkilerinin yanı sıra, rüzgâr ve yaya hareketlerinden kaynaklanan titreşimleri de azaltmak için kullanılabilir. Bu sönümleyiciler, özellikle yüksek binalar, köprüler ve diğer büyük yapılar için oldukça etkilidir.



Şekil 8. Akışkan viskoz sönümleyici (viskoz damper) uygulaması (Alhan ve Hacıemiroğlu 2023)

Çelik histeretik damperler, deprem sırasında yapıların korunması için kullanılan bir tür enerji sönümleyici sistemdir (Şekil 9). Bu damperler, çeliğin elastik ötesi davranışını kullanarak deprem enerjisini sönümler ve yapının hasar görmesini engeller. Başlıca özellikleri:

Enerji sönümleme: Çelik histeretik damperler, çeliğin plastik deformasyonu yoluyla deprem enerjisini sönümler.

Yüksek dayanıklılık: Çelik malzeme, yüksek dayanıklılığı ve sünekliği sayesinde uzun ömürlü ve güvenilirdir.

Bakım gerektirmez: Bu damperler, hareketli parça içermediği için bakım gerektirmez.

Bu damperler, özellikle yüksek binalar ve köprüler gibi önemli yapıların korunmasında yaygın olarak kullanılır. Deprem sırasında yapının güvenliğini sağlamak ve hasarı minimize etmek için oldukça etkili bir çözümdür.



Şekil 9: Çelik histeretik damper uygulaması (Anonim 2024f)

Makine ve Cihazlarda Kullanılan İzolatörler

Yaylı sismik izolatörler, deprem sırasında yapıların korunması için kullanılan etkili cihazlardır. Bu izolatörler, çelik yaylar ve çelik muhafazalar ile donatılmıştır. Yaylar, düşük frekanslı titreşimleri yalıtarak, yapının deprem kuvvetlerine karşı direncini artırır. Çelik muhafaza ise ekipmanın hareket etmesini önler ve yatay yöndeki sismik yükleri absorbe eder. Yaylı sismik izolatörler, yapının yatay hareketlerini kontrol ederek, deprem sırasında ve sonrasında yapının stabilitesini korur. Bu özellikleri sayesinde, yaylı sismik izolatörler, yapıların depreme karşı dayanıklılığını artırarak, hasar riskini önemli ölçüde azaltır.

Yaylı sismik izolatörler, deprem sırasında yapıların korunması ve titreşim kontrolü için kullanılan cihazlardır. Bu izolatörler, özellikle elektrik ve mekanik ekipmanların korunmasında yaygın olarak kullanılır (Şekil 10). Başlıca özellikleri:

Yaylı mekanizma: İzolatörler, ayarlanabilir yaylar ve kaynaklı çelik kabinlerden oluşur. Bu yapı, tüm yönlerden gelen sismik yüklere karşı dayanıklıdır.

Titreşim kontrolü: Deprem sırasında oluşan titreşimleri sönmüleyerek yapının ve ekipmanların hasar görmesini engeller.

Çok yönlü kullanım: Hem yatay hem de düşey yönde hareket edebilen bu izolatörler, çeşitli yapı tiplerine uygulanabilir.

Bu izolatörler, deprem sırasında yapının güvenliğini sağlamak ve hasarı minimize etmek için oldukça etkili bir çözümdür.



Şekil 10: Yaylı izolatörler (Anonim 2024g).

Titreşim önleyici kauçuk takozlar, makine ve ekipmanlarda oluşan titreşimleri azaltarak performansı artıran ve ses düzeyini düşüren özel elemanlardır. Genellikle kauçuk, silikon veya elastomer malzemelerden üretilirler ve sanayi makineleri, otomotiv ve inşaat gibi birçok sektörde kullanılırlar. Bu takozlar, eksenel ve radyal kuvvetleri absorbe ederek, titreşim ve darbelerin iletilmesini engeller ve aynı zamanda gürültüyü de azaltır. Kauçuk takozlar, motor kulak takozları, klima-havalandırma lastik takozları, kompresör-jeneratör lastik ayak takozları gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu özellikleri sayesinde, titreşim önleyici kauçuk takozlar, ekipmanların ömrünü uzatır ve çalışma ortamının konforunu artırır.

Makineler için kullanılan kauçuk izolatörler, titreşim ve gürültü kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan önemli bileşenlerdir. Bu izolatörler, makinelerin çalışması sırasında oluşan titreşimlerin ve gürültünün çevreye yayılmasını engeller ve makinenin performansını artırır. Başlıca özellikleri:

Titreşim sönümleme: Kauçuk izolatörler, makinelerin çalışması sırasında oluşan titreşimleri sönümleyerek hem makinenin hem de çevresindeki yapıların zarar görmesini engeller (Şekil 11).

Gürültü azaltma: Titreşimlerin sönümlenmesi, aynı zamanda gürültü seviyesini de azaltır, bu da daha sessiz bir çalışma ortamı sağlar (Şekil 12).

Esneklik ve dayanıklılık: Kauçuk malzeme, yüksek esneklik ve dayanıklılık sunar, bu da uzun ömürlü ve güvenilir bir kullanım sağlar.

Çeşitli uygulamalar: Endüstriyel makinelerden HVAC sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir.

Kullanım alanları:

Endüstriyel makineler: Fabrikalarda kullanılan büyük makinelerin titreşimlerini kontrol etmek için kullanılır.

HVAC sistemleri: Isıtma, havalandırma ve klima sistemlerinde titreşim ve gürültüyü azaltmak için kullanılır.

Elektronik cihazlar: Hassas elektronik cihazların titreşimden korunması için kullanılır.

Bu izolatörler, makinelerin verimliliğini artırırken, aynı zamanda çevresel gürültü ve titreşim sorunlarını da minimize eder.



Şekil 11. Yüksek frekanstaki titreşimler için geliştirilmiş bir kauçuk izolatör (Anonim 2024h).



Şekil 12: Ses yalıtımı da sağlayan bir kauçuk izolatör (Anonim 2024i).

Veri merkezi sismik izolatörleri, deprem sırasında veri merkezlerinin korunması için kullanılan özel cihazlardır. Bu izolatörler, veri merkezlerindeki kritik ekipmanların ve sunucuların depremden etkilenmemesi için tasarlanmıştır (Şekil 12). Başlıca özellikleri:

Titreşim sönümleme: Deprem sırasında oluşan titreşimleri sönümleyerek ekipmanların zarar görmesini engeller.

Yüksek dayanıklılık: Yüksek dayanıklılığa sahip malzemelerden üretilir ve uzun ömürlüdür.

Esneklik: Hem yatay hem de düşey yönde hareket edebilir, bu da deprem sırasında esnek bir koruma sağlar.

Bu izolatörler, deprem sırasında veri merkezlerinin kesintisiz çalışmasını sağlayarak veri kaybını ve operasyonel aksaklıkları minimize eder.



Şekil 13: Veri merkezleri ve bilgi işlem cihazları için sismik izolatör (Anonim 2024j).

SONUÇ

Sonuç olarak, deprem izolatörleri, yapıların sismik dayanıklılığını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojinin kullanımı, binaların ve altyapının depremler sırasında maruz kaldığı hasarı önemli ölçüde azaltarak hem can kaybını hem de maddi zararları minimize etmektedir. Deprem izolatörlerinin etkinliği, dünya genelinde yapılan çeşitli araştırmalar ve uygulamalarla kanıtlanmış olup, gelecekte daha yaygın bir şekilde

benimsenmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, mühendislik ve inşaat sektörlerinin, deprem izolatörlerinin tasarımı ve uygulanması konusundaki bilgi birikimini sürekli olarak güncelleyerek, daha güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmeye devam etmeleri büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, sismik izolatörler sadece binaların depreme karşı dayanıklılığını artırmakla kalmaz, aynı zamanda jeneratörler, bilgisayar sunucuları ve diğer hassas makine ve ekipmanlar için de önemli bir koruma sağlar. Bu izolatörler, sarsıntı ve dinamik etkilerden zarar görebilecek cihazların arızalanmasını önler ve bu sayede hizmetlerin kesintisiz devam etmesini sağlar. Özellikle veri merkezleri gibi kritik altyapılarda, sismik izolatörlerin kullanımı, operasyonel sürekliliği ve veri güvenliğini sağlamak açısından büyük önem taşır. Sismik izolatörler, depremlerin yıkıcı etkilerini minimize etmek ve yapıların güvenliğini sağlamak için vazgeçilmez bir mühendislik çözümüdür. Bu teknolojinin yaygınlaşması, deprem riski taşıyan bölgelerdeki yapıların dayanıklılığını artırarak, olası can ve mal kayıplarını önemli ölçüde azaltacaktır.

REFERANSLAR

- Akyüz, U., A. Caner, A. Yakut, ve S. Ozdemir. 2017. “Türkiye’deki Sismik İzolasyon Uygulamalarının İncelenmesi”. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 1–6.
- Alhan, Cenk, ve Mert Hacıemiroğlu. 2023. “Direnci Şehirler İçin Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon”. *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi* 4:96–127.
- Anonim. 2024a. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://civilwale.com/base-isolation-system/>).
- Anonim. 2024b. “web sitesi”. Tarihinde (<https://www.aksaaakustik.com/sismik-titresim-izolatoru/>).
- Anonim. 2024c. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://aiasandiego.org/posts/2023/4/3/6zeyjnbuxy9mf6s7z49cvwubyf3d4>).
- Anonim. 2024d. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://www.rmkmekatronik.com/urun/sismik-izolasyon/>).
- Anonim. 2024e. “web sitesi”. 2024.
- Anonim. 2024f. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://www.fipmec.it/en/products/anti-seismic-devices/>).
- Anonim. 2024g. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://www.sismikmarket.com/urun/acrefine-sismik-izolator-asi-11-1b>).
- Anonim. 2024h. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://www.sismikmarket.com/urun/acrefine-titresim-izolatoru-avi-rm>).
- Anonim. 2024i. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://www.sismikmarket.com/urun/acrefine-yuzer-doseme-izolatoru-afr#gallery-2>).
- Anonim. 2024j. “web sitesi”. 2024. Tarihinde (<https://telecom.samm.com/ssi-1000-moduler-platformlar-data-center-sismik-izolatoru>).
- Bakkaloğlu, Elif, ve Necdet Torunbalcı. 2024. “Çok Katlı Hastane Binalarında Uygulanabilecek Taban İzolasyon Sistemleri”. *bab Journal of FSMVU Faculty of Architecture and Design* 5(2):150–65. doi: 10.61807/babdergisi.1410818.

- Kuru, Ufuk, ve Bülent Aydemir. 2023. “Deprem İzolatör Test Cihazının Ekstansometre Ölçüm Sisteminin Kalibrasyon Gerekliliği”. *International Marmara Sciences Congress* (June).
- Naimi, Sepanta, ve Mohammad Harris Waheb. 2019. “Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri ile Karma Korunması”. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 12(1):499–516. doi: 10.18185/erzifbed.523955.
- Özdemir, Nur Banu, Gonca Akçaer, ve Asena Soyluk. 2015. “Günümüz mimarisinde sismik izolasyon teknolojisi”. 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*.
- Öztürk, Hakan, ve Gökhan Özdemir. 2022. “Farklı ölçeklendirme yöntemlerinin sismik izolatör davranışına etkisi”. *10th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 2022*(October).
- Pınarbasi, Seval, ve Ugurhan Akyuz. 2005. “Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyleri”. *İMO Teknik Dergi* (July 2005):3581–98.
- Severcan, Metin Hakan, ve Pınar Şen. 2019. “Sismik İzolatörlü Binalarda Kat Adedi Etkisi”. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 8(2):922–35. doi: 10.28948/ngumuh.598230.
- Zulfakar, Muhamad, ve Ali İhsan Karakaş. 2022. “Farklı Sürtünmeli Sarkaç Tipi İzolatörlerin Yapı Sismik Davranışına Etkileri”. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 10:1826–37. doi: 10.29130/dubited.960841.

Sondaj Çamurunun Çevresel Etkileri, Atık Yönetimi ve Bertarafı

Dilara TAZ¹

İnci TÜRK TOĞRUL²

- 1- YL Öğrencisi; Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği ü. dilara.taz@batman.edu.tr ORCID No: 0009-0003-0116-2036
- 2- Prof. Dr.; Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği. incitgrl@gmail.com ORCID No: 0000-0001-7549-2968

ÖZET

Enerji sektöründeki sürekli gelişmeler, petrol, doğal gaz ve diğer enerji kaynaklarına erişimi artırmak adına son derece karmaşık ve teknoloji odaklı sondaj süreçlerini beraberinde getirmiştir. Bu süreçlerin temel unsurlarından biri olan sondaj akışkanları, enerji üretimindeki verimliliği artırmakla birlikte, çevresel etkileri, atık yönetimi ve bertarafı gibi önemli konularda endişelere yol açmaktadır.

Sondaj uygulamalarında etkili bir operasyonun temelinde, kullanılan sondaj akışkanının üstün performansı yatar; bu, başarılı bir sondajın anahtarıdır. Sondaj akışkanları, kuyu delme ve hidrokarbon rezervuarlarından enerji kaynaklarını çıkarma işlemlerinde kullanılan özel kimyasal karışımlardır. Ancak, bu akışkanların çevreye olan etkileri, toprak ve su kirliliği, biyoçeşitlilik kaybı ve hatta insan sağlığı üzerinde potansiyel riskleri içerebilecek bir dizi karmaşık sorunu ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışma, sondaj akışkanlarının çevresel etkilerini inceleyerek, atık yönetimi ve bertarafı konularında var olan literatürü ele almayı amaçlamaktadır. Bu kapsamlı inceleme, çeşitli sondaj akışkanlarının kullanımının çevresel etkilerini anlamak, atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi ve bertaraf edilmesi için etkili stratejilerin belirlenmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik, günümüzde enerji sektöründeki en önemli konulardan biridir ve sondaj akışkanlarının çevresel etkileri, enerji üretim süreçlerinin hem etkinliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini nasıl etkilediğini anlamak, gelecek nesillere temiz ve güvenilir enerji kaynakları sağlamak adına önemli bir adımdır.

Çalışmanın devamında, farklı sondaj akışkanları türleri, çevresel etkileri, atık yönetimi stratejileri ve bertaraf yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar detaylı bir şekilde incelenerek, enerji sektöründeki bu önemli konulara ışık tutulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Atık Yönetimi, Bertaraf, Sondaj, Çamur, Petrol

GİRİŞ

Sondaj, yeraltındaki enerji kaynaklarının keşfi ve çıkarılmasında kritik bir rol oynayan karmaşık bir süreçtir (Balkaya vd., 2019:9). Bu sürecin temel unsurlarından biri olan sondaj çamuru, su ve şişme özelliği bulunan kilin bir karışımından oluşur ve döner sondaj yönteminin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu çamur, sondaj sırasında çeşitli hayati fonksiyonlara sahiptir. Sondaj çamurunun; kırıntıların kuyunun dışına taşınması, matkabın etkin bir biçimde soğutulması, kuyudaki çöküntüleri engelleme, formasyon basıncını dengeli bir şekilde kontrol etme, sondaj dizisini ve kuyu duvarlarını yağlayarak hareketlerini kolaylaştırma, kuyu dibinde biriken kırıntı ve kum

taneciklerini askıda tutarak birikmelerini önceden engelleme, ayrıca sondaj dizisi ile muhafaza borularının ağırlıklarını hafifleterek operasyonel süreçleri optimize etme gibi fonksiyonları mevcuttur (Asker vd., 2019:2; Kargı, 2015:28; Okon, vd., 2014:2; Onat, 1971:33).

Bu işlevler, sondajın verimli bir şekilde gerçekleşmesi ve kuyunun güvenli bir şekilde inşa edilmesi için kritik öneme sahiptir. Sondaj çamurunun bileşimi ve özellikleri, jeolojik koşullar ve hedeflenen enerji kaynaklarına bağlı olarak değişebilir. Bu bağlamda, çeşitli çalışmaların ve araştırmaların yapıldığı literatürdeki bilgilerin detaylı bir şekilde incelenmesi, sondaj çamurunun etkin ve çevre dostu bir şekilde kullanılmasını sağlamak adına önemlidir.

Sondaj çamurunun viskozitesi arttığında, kuyunun dışına taşınan kırıntı miktarında bir artış görülür; ancak, bu durum çamur pompasının verimini olumsuz etkiler. Ayrıca, çamurun aşırı su kaybı durumunda, formasyona geçen su miktarı kayacın hacmini artırarak kek kalınlaşmasına neden olur ve bu da kuyu çapının daralmasına yol açabilir. Bu olumsuz durumlar, sondaj işlemini zorlaştırabilir (Avcı, 2018:28).

Petrol endüstrisinin çeşitli aşamalarında ortaya çıkan atık petrol çamuru, çevresel endişelere yol açan önemli bir sorundur. Çin'de 2013 yılına ait verilere göre, biriken atık petrol çamurunun beş milyon tonu aştığı tespit edilmiştir (Zhang vd., 2012:200). Aynı şekilde, 2010 yılında Brezilya'da petrol arama ve üretim sektöründen kaynaklanan yılda yaklaşık 51,000 ton tehlikeli katı atık oluştuğunu belirtilmiştir (Nunes, 2013:172). Bu durum, endüstrideki atık yönetimi önlemlerinin ve çevresel etkilerin ele alınması gerekliliğini vurgulamaktadır.

Her 500 ton ham petrol işleme sürecinde yaklaşık bir ton petrollü çamur atığı oluşmaktadır. Bu değere göre, yılda 60 milyon tonun üzerinde petrol içerikli çamur üretilebileceği ve küresel düzeyde 1 milyar tonun üzerinde petrollü çamur biriktiği öngörülmektedir (Da Silva vd., 2012:1023; Tahhan vd., 2011:132).

Atık petrol çamurları, su ve toprakta bulunan toksik, mutajenik ve kanserojen bileşenleri içeren doğal olarak ayrışmaya direnç gösteren yarı katı bir materyali temsil etmektedir. Yüksek petrol hidrokarbon konsantrasyonlarına sahip olan bu çamurlar, çevreyi ve insan sağlığını tehlikeye atan bir yandan, diğer yandan da değerli atıklar olarak değerlendirilmektedir (Kriipsalu vd., 2007:619).

Sondajda çıkarılan ham petrol ile birlikte oluşan bu atıklar, çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu atıkların yağmur ve kar sularıyla birleşip dere ve göllere sızdığı tespit edildiğinde toprağa gömülme kararı alınmıştır. Ancak, yağmur ve kar sularının toprakta yoğunluk farkı oluşturması, bu atıkların tekrar yüzeye çıkmasına yol açmaktadır. Bu durum, petrol üreticilerini, insanları ve doğayı ciddi şekilde tehdit etmektedir.

Gelecekte, bu atıkların enerji elde etmek amacıyla yakılması düşünülmüşse de, çeşitli sınırlamalar görülmüştür. 1990'lı yıllarda çevre

bilincinin gelişmesi ve çevreci kuruluşların aktif çalışmasıyla birlikte, toplumsal bilinç oluşmuştur. Günümüzde, petrol üretimi yapan şirketler, bertaraf işlemi yapan firmalarla işbirliği yaparak bu atıklardan kurtulma yoluna girmekte bu da ek maliyet oluşturmaktadır. Bertaraf firmaları, bu atıkları yasa ve yönetmeliklere uygun olarak özel kazanlarda yakarak bertaraf etmektedir. Ancak, oluşan gazın atmosfere gönderildiği bacalarda filtre kullanılması sorunludur. Filtre malzemelerinin maliyetli olması, bertaraf sürecini de maliyetli hale getirmektedir (Zhang vd., 2012:201). Atık petrol çamurları, ham petrol üretim süreçlerinin neredeyse tamamında ortaya çıkmaktadır.

SONDAJ ÇAMURU

Sondaj çamuru, sondaj operasyonlarında çeşitli fonksiyonları yerine getirmek üzere kullanılan bir sirkülasyon akışkanıdır. Bu akışkan, su, organik veya gaz esaslı olabilir, ve amacı sondaj operasyonunun ihtiyaçlarına yönelik olarak belirli özelliklere sahip olmaktır (Awele, 2014:18; Gücüyener, 2009:8).

Bu tanımda bir sirkülasyon akışkanı olmadan sondajın gerçekleştirilemeyeceğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, sondaj akışkanları, karmaşık kimyasal ve reolojik özelliklere sahip kolloid sistemler içerir ve geniş bir kompozisyon aralığına sahiptir. Bu özellikler, operasyonel başarı için çeşitli sondaj ihtiyaçlarına uyum sağlama kabiliyetini yansıtır.

Rotary sondaj operasyonlarının ilk dönemlerinde, sondaj çamuru yalnızca su ve yerel kil gibi doğal malzemelerden meydana gelen, doğal çamur olarak bilinmekteydi. 1920'lerde, formasyon basıncını kontrol amacıyla yoğunluk artırıcı madde olarak demir oksit ve barit eklenmeye başlandı. 1920'lerin sonlarına doğru, çamurun yoğunluğunu düzenlemek için barit, kuyu temizliği sağlamak ve çamuru suspende etmek için ise bentonit kullanıldı. 1930'lu yıllarda, çamurda viskozite ve sıvı kaybı gibi sorunları aşmak için farklı ürünler geliştirildi. Viskoziteyi kontrol etmek için bazı inorganik incelticiler ve sıvı kaybını kontrol etmek için karboksi metil selüloz (CMC) gibi maddelerin kullanımı örnek olarak gösterilebilir (Barrett, 2013:165).

Tuz ve anhidrit-jips içeren formasyonlarda karşılaşılan zorlukları aşmak için doygun tuzlu su çamuru, deniz suyu çamuru ve kireç çamuru ile bunun yanı sıra nişasta ve karboksimetilselüloz gibi sıvı kaybını kontrol etmede kullanılan maddeler de kullanılmıştır. 1950'lerin sonlarına yaklaşıldığında ferrokrom lignosülfonat gibi incelticiler kullanılmaya başlanmış ve bu ilerleme, bentonit-su sistemlerinin kalsiyum kirlenmesi ve yüksek sıcaklık gibi problemlerle başarılı bir şekilde başa çıkabilmesine şans tanımıştır.

Sondaj çamuru teknolojisinde en yeni gelişmeler arasında; sondaj hızını artırmak amacıyla düşük katı madde içeren sistemlerin geliştirilmesi,

kuyu stabilitesini kontrol etmek için petrol bazlı sistemler geliştirilmesi, üretim formasyonunda kirlenmeyi önlemek için "drill-in" sıvıların kullanımı ve çevre kirliliğine yönelik endişelere karşı geliştirilen çeşitli sistemler sayılabilir. Özellikle yatay sondaj ve derin deniz sondajlarındaki ilerlemelerle paralel olarak, çamur teknolojisindeki bu gelişen yenilikler ekonomik açıdan önemli bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda çevre koruma yasalarının etkisiyle ortaya çıkan yeni zorluklara çözüm arayışı, aynı zamanda mevcut sorunlara daha etkili çözüm yöntemlerinin geliştirilmesine yönelmiştir. Bu süreçte, özellikle maliyetli özel teknolojilerin kullanıldığı yatay sondaj ve derin deniz sondajlarındaki ilerlemeler, çamur teknolojisinin gelişmesine ve evrimine büyük katkılarda bulunmuştur.

SONDAJ ATIKLARININ OLUŞUMU VE YÖNETİMİ

Yer altı zenginliklerinin keşfi ve üretimi için gerçekleştirilen sondaj operasyonları, enerji ve madencilik sektörlerinde temel bir süreç olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu operasyonlar sırasında ortaya çıkan atıklar, çeşitli çevresel ve işletme zorluklarını beraberinde getirmektedir.

Sondaj işlemi, genellikle yer kabuğunda çeşitli tekniklerle delikler açılması anlamına gelir. Bu delikler, daha önce tespit edilen enerji kaynaklarının çıkarılmasını mümkün kılar ve üretim alanlarının geliştirilmesine katkıda bulunur. Ancak, bu süreçler sonucunda ortaya çıkan atıklar, endüstriyel faaliyetlerin bir yan ürünüdür.

Sondaj sürecinde kullanılan yöntemlere bağlı olarak atık üretimi kaçınılmazdır; çünkü sondaj kuyularının boşaltılması ve üretime uygun hale getirilmesi için kazılan boşluğun yüzeye taşınması sırasında, sondaj kesintisi kökenli katı atıklar meydana gelir.

Sondaj atıkları, genellikle birden çok atığın birleşiminden meydana gelir. Sıvı atıklar, sondaj operasyonu sırasında ortaya çıkan ve sondaj akışkanları adı verilen akışkanların kullanımıyla ilişkilidir. Su bazlı sondaj çamurlarında bentonit ve doğal katkı maddeleri kullanılır. Ancak, sondaj derinleşmesiyle birlikte daha kompleks akışkanlara olan gereksinim artabilir. Kimyasal katkı malzemeleri, bu akışkanların elde edilmesinde önemli bir rol oynar.

Petrol ve sentetik yağ bazlı sondaj akışkanları da tercih edilebilmektedir, fakat maliyet ve çevresel etkileri göz önüne alındığında kullanımları genellikle kısıtlıdır. Her ne kadar kullanılan sondaj akışkanı türü değişse de, sondaj kuyusundan çıkan atıkların bertaraf edilmesi zorunludur.

Sondaj atıkları, genellikle katı atıklar ve sıvı atıkların bir kombinasyonundan oluşur. Toplam atık miktarının büyük bir bölümünü ise sıvı atıklar oluşturur. Bu sıvı atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi ve bertaraf edilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Atık yönetimi, sondaj sahalarında ortaya çıkan çeşitli atık kaynaklarını etkili bir biçimde ele almayı gerektirir. Atıklar genellikle sondaj kesintisi, sondaj akışkanı atıkları ve atık hale gelmiş sular olarak üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Türkiye'deki sondaj uygulamalarında genellikle çamur havuzu olarak adlandırılan ve geçirimsizliği yönetmeliklerde belirtildiği gibi ayarlanmış çukurlarda toplanmaktadır. Bu çukurların büyüklüğü sondaj programına göre kazılacak kuyu teorik hacminin en az iki katı büyüklüğünde olacak şekilde ayarlanmaktadır.

Yüksek sıcaklıklı çalışmalar, özellikle jeotermal sondajlarda, kule pompası ve motorları korumak için uygulanan ana yöntemlerden biri de ısınan yüzeylerin su ile soğutulmasıdır. Bu soğutma suyu daha sonra çamur havuzuna yönlendirilir ve tekrar kullanılmaz. Su ayrıca kulede günlük bakım ve temizlik işlemlerinde de kullanılmaktadır. Temizlik sırasında kirli su tekrar çamur havuzuna yönlendirilerek atık haline gelir. Bu süreçte, günlük ortalama 15-20 m³ doğal kaynak suyu atık durumuna geçmektedir.

Çamur çukurlarda sadece geri dönen sondaj atığı, kesinti veya çimento depolanırken atıksu veya diğer petrol sahası atıkları çamur çukurlarına gönderilmemelidir.

Sondaj çamurunun atık durumuna geçişi, iki farklı nedenden kaynaklanmaktadır. Başlangıçta, sondaj çamurunun içindeki kesintilerin atılması sürecinde kayıplar meydana gelir. Kesintiler, sondaj çamuru içinde yüzeye çıkar ve kulelerde bulunan titreşimli elekler ve hidrosiklonlar yardımıyla sondaj sıvısından ayrıştırılır. Bu süreçte, bir miktar sondaj sıvısı da kesinti ile birlikte çamur havuzuna yönlendirilir.

Sondaj çamurunun atık durumuna geçişinin bir başka nedeni, çamurun ömrünü tüketmesidir. Sondaj sırasında meydana gelen kesintiler geleneksel yöntemlerle sondaj çamuru içinden çıkarılamaz ve zamanla çamur içinde birikir. Bu birikim, çamurunun özgül ağırlığının artmasına ve özelliklerini kaybetmesine neden olur. Sondaj çamurunun kalitesini korumak için, belirli aralıklarla kirlenen kısmın çamur havuzuna atılması ve yerine yeni hazırlanmış sondaj çamuru ilave edilmesi gerekmektedir. "Seyreltme operasyonu" adı verilen bu işlemle kuyu emniyeti, kuyu temizliği, sondaj operasyonunun başarılı bir şekilde ilerlemesi ve tamamlanmasına olanak tanınmış olur. Seyreltme işlemine bağlı olarak, kazılan uzunluk başına 0,1-0,3 m³ / m sondaj çamuru atık durumuna gelebilmektedir.

Sondaj faaliyetlerinin vazgeçilmez ve önlenemez bir atık grubu, sondaj kesintileri kaynaklı atıklardır. Temel amaç yüzeyde bir boşluk oluşturmak olduğundan bu kesintiler, sondaj kesintileri olarak adlandırılır. Ancak, bu kesintiler diğer kuru hafriyat atıklarından farklı özelliklere sahiptir. Sondaj akışkanlarının kuyu tabanından yüzeye taşınması sırasında ıslanma ve yapısını değiştirme eğilimindedirler. Ayrıca, sondaj akışkanlarındaki kimyasal katkı maddeleri, bu ıslanma sürecinde kesintilere karışarak, kesintilerin inert atık durumundan tehlikeli veya tehlikesiz atık durumuna geçmesine neden olabilir. Özellikle jeotermal sondajlarda,

metamorfik kayaçların içeriği ve yapısı da dikkatlice değerlendirilmelidir. Bu tür sondajlarda, fay çatlakları içeren kayaçlar hedef alınırken, metamorfik kayaçlardaki bu akışkanlar potansiyel olarak ağır metaller içerebilir. Fay çatlaklarından geçerken, bu çatlaklar pirit, bor, kadmiyum gibi ağır metalleri içerebilir. Bu durumda oluşan kesintiler tehlikeli atık olarak değerlendirilebilir.

Atık Suyun Geri Kazanımı

Sondaj sahalarında ısınan ekipmanların soğutulması ve temizlik işlemleri sonucu sürekli olarak atık su oluşmaktadır. Oluşan atığın hacimce %55-60'ını, sıvı atıkların ise %70'ini oluşturan su kaynaklı atıklar, önemli bir atık kaynağını temsil etmektedir. Geleneksel yöntemlerde, temizlik ve soğutma işlemlerinden sonra kirletilen sular, çamur havuzlarına yönlendirilir. Bu pratikte, atık su, katı atıklar ve sondaj sıvısı kaynaklı atıklar bir araya gelir ve geri kazanım yapılmaz. Bu uygulama sonucunda, günde 15-20 m³ civarında su kaybedilmektedir. Ancak, daha da önemlisi, bu yöntemle suyun, insan yaşamı için kritik olan doğal kaynaklardan biri olan suyun yok edilmektedir.

Kesinti İle Kaybedilen Sondaj Çamurunun Geri Kazanımı

Sondaj kesintilerinin yüzeye taşınması genellikle sondaj çamurları aracılığıyla gerçekleştirilir. Ancak, kesintilerin tamamen kurumasına olanak tanımayan geleneksel kule ekipmanları, özellikle titreşimli elekler ve hidrosiklonlar, ıslak kalmasına ve bu durumda kullanılabilir durumda olan sondaj çamurunun atık olarak kaybedilmesine neden olur. Bu atık miktarı, toplam kazılan hacmin 3-4 katına ulaşabilir, bu da sadece atık dışında tüketilen doğal kaynaklar ve kimyasal katkı malzemeleri açısından önemli bir kayıp anlamına gelir.

Sondaj Akışkanının Temizlenmesi

Sondaj çamuru, sondaj tabanındaki kesintilerin sirkülasyon aracılığıyla yüzeye taşınmasında kritik bir rol oynar. Bu görevi yerine getirebilmek adına derin sondajlarda çeşitli kimyasal katkı maddeleri eklenir, su, petrol ve sentetik yağ gibi çeşitli temel sıvılara dönüştürülerek akışkanın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirli seviyelere getirilir. Ancak, sondaj sürecinde üretilen kesintilerin büyüklüğü ve özellikleri değişebilir. Bu kesintiler, sadece birkaç santimetre boyutunda olabileceği gibi, özellikle kil içeren kayaçlarda mikron seviyesine kadar inebilir. Eleklerle ayrıştırılan yüzeye çıkarılan kesintiler, %100 temizlik sağlayamaz ve zamanla akışkan içinde küçük boyutlu kesintilerin biriktiği gözlemlenir. Bu birikim, akışkanın kirlenmesine ve özelliklerini kaybetmesine yol açar. Kirlenen ve jel haline gelen sondaj sıvılarıyla devam etmek, kazılan kuyunun kaybedilmesine kadar giden olumsuz sonuçlar doğurabilir.

Bu sebep dolayısıyla, temiz bir sondaj akışkanının seçimi çok önemlidir. Geleneksel sondajlarda, bu kirliliği tamamen önlemek mümkün olmadığından, sondaj çamuru kirlenene kadar kullanılır. Daha sonra kirlenmiş akışkan çamur havuzuna yönlendirilir ve yerine yeni hazırlanan sondaj çamuru ile sondaj işlemi devam eder. Bu durumda, daha fazla atık üretilir ve yeni hazırlanan akışkan için su ve kimyasal tüketiminde bir artış meydana gelir. Sondaj çamurunun temizlenmesi, atık oluşumunu en aza indirgeyerek doğal kaynakların korunmasını sağlayan bir çözüm olmaktadır. Sondaj akışkanın temizlenmesinde dekantör sisteminin kullanılması önerilen ve uygulanabilir bir yöntemdir.

SONDAJ AKIŞKANLARININ BERTARAFI

Sondaj operasyonlarında kullanılan sondaj akışkanlarının uzaklaştırılması büyük ve zor bir sorundur. Çevresel konular, küresel çapta toplumun giderek artan bir ilgisini çekmektedir. İnsan ve çevre sağlığını korumak adına birçok yönetmelik ve regülasyon mevcut olup, bu düzenlemelerin takibi önem arz etmektedir. Sondaj atıklarının bertaraf edilmesi, çamurun toksiklik değerlerinin belirli regülasyonlarda belirtilen sınırların altında olmasına bağlıdır. Regülasyonlar, atık sondaj çamurlarının ve bertaraf işlemlerini belirli koşullara tabi tutmaktadır ve bu süreçler genellikle maliyetlidir. Atık sondaj çamurlarının yeraltı formasyonlarına enjekte edilmesi, regülasyonlara uyulmaması durumunda çevresel felaketlere, yeraltı sularının kirlenmesine ve yaşam alanlarındaki organizmaların ölümüne neden olabilir. Atık çamur yönetimi ve bertarafı için uygulanan regülasyonlar, coğrafi bölgeler arasında farklılık gösterebilir.

Sondaj operasyonları öncesinde atık sondaj akışkanlarının bertaraf yönetim planı, çevresel etkileri dikkate alarak ve ilgili regülasyonları göz önünde bulundurarak oluşturulmalıdır. Bu amaçla bilinmesi gereken parametrelerin başında sondaj akışkanının toksikliği gelmektedir. Bu değer AMOCO tarafından geliştirilen Sondaj Akışkanı Toksiklik Testi ile ölçülebilir. Belirlenmesi gereken diğer bir parametreler ise ağır metallerin miktarı ve tuz içeriğidir.

Sondajların atık yönetimi için çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Sondaj akışkanlarının etkili bir şekilde bertaraf edilmesi ve çevreye minimal etki bırakılması amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Sondaj atıkları, sürdürülebilir çözümlerle yönetilerek çevresel etkiler en aza indirilmektedir. Türkiye'deki jeotermal enerji projelerinde, yerel düzenlemelere uygun olarak atık yönetimi planları oluşturulmakta ve çeşitli tekniklerle atıkların kontrol altında tutulması sağlanmaktadır. Bu süreçler, çevre dostu enerji üretimi hedefine katkıda bulunarak sürdürülebilir bir enerji geleceğine yönelik adımlardan birini oluşturmaktadır.

Sondaj sırasında yüzeye çıkan katıları kontrol etmek ve birincil ıslahı gerçekleştirmek için mekanik sistemler kullanılır. Bu sistemler

arasında gaz ayırıcı, titreşimli elekler, hidrosiklonlar ve santrifüjler yer almaktadır. Birincil ıslahın bir parçası olarak kimyasalların kullanımı da yaygındır. Ancak, bu yöntemler sondaj çamuru atıklarının tamamen bertaraf edilmesinde yeterli değildir.

İkincil ıslah yöntemleri, atık bertarafıyla birleştirildiğinde, polimer bazlı veya sentetik bazlı sondaj akışkanlarının ve diğer pahalı katkı maddelerini içeren sistemlerin kullanımını teşvik eder. Ancak, bu maliyetli sistemlerden kaynaklanan atık ürün miktarını azaltmak, sondaj maliyetlerini önemli ölçüde düşürebilir. Azaltılmış atık üretimi, bir kuyunun toplam maliyetini belirgin bir şekilde düşürebilir. Bu sayede çevresel etkiler minimize edilirken, maliyet etkin bir sondaj operasyonu gerçekleştirilebilir. Sondaj atıkları, içerdikleri maddelere bağlı olarak sınıflandırılmalı ve kullanılan çamur türüne uygun ıslah yöntemleri seçilmelidir. Atıkların ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından belirlenen sınıflandırmasına göre üç grupta değerlendirilmesi, etkili bir atık yönetimi stratejisinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu sınıflandırmaya göre;

- Petrol bazlı çamurlarda öncelikli olarak ısıtma işlemi ve bulunduğu yer dışında ıslah yöntemleri tercih edilmelidir. Bu çamurların işlenmesinde ısıtma ve doğal yöntemler, etkili bir şekilde kullanılabilir.
- Tatlı su sondaj çamurları için, fiziksel veya kimyasal ıslah yöntemleri veya her ikisi de uygulanabilir. Bu çamurların özelliklerine bağlı olarak, ıslah sürecinde fiziksel ve kimyasal yöntemlerin kombinasyonu etkili sonuçlar sağlayabilir.
- Mekanik katı kurutma yöntemi, sentetik çamurların işlenmesinde etkili bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Bu yöntem, sentetik çamurların içindeki sıvıyı etkili bir şekilde çıkartarak katı maddelerin kurutulmasını sağlar.
- İçinde zararlı maddeler bulunan sondaj atıkları için, fiziksel ve kimyasal yöntemlerle süzme, tesirsizleştirme veya biyolojik ıslah yöntemleri uygun seçenekler arasında yer alır. Bu yöntemler, zararlı maddelerin etkisiz hale getirilmesini ve atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesini sağlar.

Bu yöntemlerin seçimi, atıkların özelliklerine ve çevresel etkilere bağlı olarak dikkatlice yapılmalıdır.

SONDAJ ÇAMURLARININ BERTARAFI KONUSUNDAKİ MEVZUAT

Bu sınıflandırmalara ve atık özelliklerine uygun olarak seçilen ıslah yöntemleri, çevre koruma açısından etkili bir atık yönetimi sağlayabilir.

Aşağıdaki tabloda sondaj çamurlarının Atık Yönetimi Yönetmeliği tanımlamaları yer almaktadır.

Tablo 1. Sondaj atıklarının sınıflandırılması (EPA, 2015)

KODLAMA	TANIM	Sınıf
01 05	sondaj çamurları ve diğer sondaj atıkları	4 Tehlikeli 2 Tehlikesiz
01 05 04	tatlı su sondaj çamuru ve atıkları	Tehlikesiz
01 05 05	petrol içeren sondaj çamuru ve atıkları	Kesin Tehlikeli
01 05 06	zararlı madde içeren sondaj çamuru ve atıkları	Muhtemel Tehlikeli
01 05 07	barit içeren sondaj çamuru ve atıkları (01 05 05 ve 01 05 06 dışında kalanlar	Tehlikesiz
01 05 08	klorür içeren sondaj çamuru ve atıkları(01 05 05 ve 01 05 06 dışında kalanlar	Tehlikesiz
01 05 99	Bunların dışında kalanlar	Tehlikesiz

EPA (Çevre Koruma Ajansı) tarafından yapılan atık sınıflandırması, atıkların içerdikleri maddelere ve zararlılık derecelerine bağlı olarak üç ana kategoriye ayrılmıştır:

1. Zararlı Atıklar: Bu kategori, toksik, patlayıcı, yanıcı veya diğer tehlikeli özelliklere sahip atıkları içerir. Bu atıklar, çevre ve insan sağlığı için ciddi riskler oluşturabilir. Özel düzenlemelere ve yönetmeliklere tabidir.
2. Zararsız Atıklar: Bu kategori, toksik, patlayıcı veya diğer tehlikeli özelliklere sahip olmayan atıkları içerir. Genellikle daha güvenli kabul edilirler, ancak yine de çevre üzerinde etkileri olabilir. Özel düzenlemelere tabi olmayabilirler.
3. Ne Zararlı Ne de Zararsız Atıklar: Bu kategori, EPA tarafından belirlenen özel listelerde yer alan atıkları içerir. Bu atıklar, belirli endüstri süreçlerinden kaynaklanan ve özel düzenlemelere tabi olan atıkları kapsar.

Atık yönetimi ve bertarafı için belirli kuralların ve prosedürlerin uygulanmasını sağlamak amacıyla yapılan bu sınıflandırma ve atıkların bu sınıflandırmaya göre değerlendirilmesi, atık yönetimi planlarının oluşturulmasında ve çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir rol oynar. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanmış ve resmi gazetede yayınlamış Atık Yönetimi, Atıkların Düzenli Depolanması ile ilgili ve

Maden Atıkları Yönetmelikleri bu konuda uyulması gereken hükümleri detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. (T.C. Resmi Gazete 29314, 2015; T.C. Resmi Gazete 27533, 2010; T.C. Resmi Gazete 29417, 2015)

Atık Yönetimi Yönetmeliği, doğal kaynak kullanımının azaltılması amacı ile atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek hale getirilmesi, atık oluşumunun azaltılması ve yeniden kullanımları, geri dönüşümleri ve geri kazanımları gibi yöntemlerle hazırlanmıştır.

Atık yönetiminde genel ilkeler ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- a) Atık üretimini ve tehlikeli özelliklerini azaltmak için, temiz teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanımı önemlidir. Ayrıca, doğal kaynakların minimum düzeyde kullanılması teşvik edilmeli, ürünlerin tasarımından bertaraf aşamasına kadar çevre ve insan sağlığına verdiği zararın minimum olması için planlama yapılmalıdır. Daha dayanıklı, yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir ürünlere odaklanan teknolojilerin benimsenmesi ve atık içeren ürünlerin çevresel tasarımının oluşturulması da kritik öneme sahiptir.
- b) Atık üretiminin azaltılamadığı durumlarda, atıkların yeniden kullanımın araştırılması, geri dönüşümü ve ikincil hammadde olarak başka işlemlerle geri kazanılabilmesi, enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi veya bertaraf edilebilmesi oldukça önemlidir.

Maden Atıkları Yönetmeliğinde bulunan sondaj çamurlarına ilişkin hükümler aşağıda sıralanmıştır.

- Sondaj çamuru, dolaşım suyu ve kırıntılar, ya çamur havuzlarında depolanabilir ya da lisanslı bertaraf tesislerine gönderilebilir.
- Sondaj çamurunda kullanılan katkı maddelerinin malzeme güvenlik bilgileri, alıcı ortamlar için tehlike oluşturmadığını gösteriyorsa, çamur havuzlarında geçirimsizlik şartı aranmaz. Aksi takdirde, doğal veya jeosentetik kil ya da jeomembran kullanılarak geçirimsizlik sağlanmalıdır.
- Sondaj havuzlarının kazılması sırasında çıkarılan bitkisel toprak ve hafriyat toprağı, sondaj çamurunun kurutulmasının ardından havuzların kapatılmasında kullanılmak üzere ayrı alanlarda muhafaza edilmelidir.
- Petrol veya tehlikeli madde içeren sondaj sıvıları, lisanslı yakma tesislerinde ya da tehlikeli atık geri kazanım tesislerinde uygun şekilde imha edilmelidir.

Bu şekilde çevresel etkilerin azaltılması ve atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi sağlanır.

"Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" kapsamında, atıkların düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmesi, çevre kirliliğini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu süreçte, sızıntı suları ve depo gazlarının oluşması durumunda, toprağı, havaya, yeraltı sularına ve yüzeysel sulara olumsuz etkileri minimuma indirme hedeflenmektedir. Ayrıca, atık türlerine uygun olacak depo tabanlarının teknik tasarımlarının yapılması ve depolama tesislerinin etkin bir şekilde inşa edilmesi öngörülmektedir.

Bu yönetmelik, çevre üzerindeki etkileri azaltmak ve atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi için gerekli önlemleri içerir. Yönetmelikte, düzenli depolama tesislerine atık kabulü süreçleri ayrıntılı bir şekilde belirlenmiş ve bu süreçlerin düzenli bir şekilde yönetilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, çevre ve insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek olumsuzlukların önlenmesi amacıyla, depolama tesislerinin sürdürülebilir işletilmesi, kapatılması ve kapatma sonrası kontrol ile bakım süreçleri, düzenlenmiştir. Bu süreçlerde, çevre ve insan sağlığına zarar verebilecek tüm olumsuz etkiler minimum seviyeye indirilmeye çalışılarak, işletme ve kapatma sonrası bakım süreçlerinin dikkatle yürütülmesi öngörülmektedir. Bu şekilde, atık yönetimi süreçlerinde doğabilecek risklerin en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

SONDAJ ÇAMURU ATIĞININ ISLAHI VE BERTARAFI İÇİN KULLANILAN YÖNTEMLER

Sondaj çamuru atığının ıslahı ve bertarafı, içerdiği ağır metaller, tuzlar, petrol türevli yağlar ve gres gibi zararlı maddeler nedeniyle önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu sorunları gidermek amacıyla kullanılan temel yöntemler şunlardır:

Kimyasal Arıtma

Zararlı bileşenlerin kimyasal işlemlerle etkisiz hale getirilmesi veya stabil hale getirilmesi. Bu süreçte kullanılan kimyasallar, ağır metallerin ve diğer zararlı maddelerin tepkimeye girerek çevreye zarar vermeyen maddelere dönüşmesini sağlar.

Morillon ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tesirsizleştirme yöntemi durağanlaştırma ve katılaştırma olarak iki ana süreci içermektedir. Bu yöntemin temel amacı, çevreye zarar veren petrolün izole edilmesi ve çevresel etkilerinin en aza indirildiği bir süreç sağlamaktır. Bu sayede, petrolün doğaya karışması engellenerek, ekosisteme olan olumsuz etkileri kontrol altına alınır ve çevreye verilen zarar önlenmiş olur (Morillon vd., 2002: 21)

Durağanlaştırma ve katılaştırma aşamalarında, atık çamur, kireç ve çimento gibi maddelerle karıştırılarak, çimentonun katı matriksinde çökelme sağlanmaktadır. Bu süreç, atığın güvenli bir şekilde depolanmasını ve çevreye zarar vermemesini amaçlar. Özellikle Venezuela'daki Jusepin petrol sahasında duraylaştırma yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca, Endonezya'nın Handil bölgesinde çamurun katılaştırılması sonucu elde edilen katı madde, yol yapımında kullanılarak bu yöntemin etkili bir örneği olmuştur. Bu tür uygulamalar, atık yönetimi ve geri dönüşüm alanında önemli bir yaklaşım sunmaktadır. (Altun ve Atayev, 2017:162)

Bu yöntem, atık çamurların çevresel etkilerini azaltmak, katı bir matris içinde hapsedilerek çevreye zarar verme potansiyellerini önemli ölçüde azaltmak amacıyla etkili bir şekilde kullanılabilir.

Termal Bertaraf

Yüksek sıcaklıklarda yakma işlemi uygulanarak sondaj çamurundaki organik maddelerin parçalanması ve tehlikeli bileşenlerin yok edilmesi sağlanır. Bu yöntem özellikle petrol türevli atıklar için etkilidir.

Yakma, atık gazların enerji üretimi amacıyla kontrolsüz bir şekilde yanmasını içeren bir bertaraf yöntemidir. Mascarenhas'ın atık gazların yakılması üzerine yaptığı çalışma, bu yöntemin sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli ve maliyet etkinliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Yakma metodunun, özellikle metan gazının küresel ısınma potansiyelinin, karbon dioksit (CO₂) gazına göre 21 kat daha fazla olduğu göz önüne alındığında, sera gazı emisyonlarını azaltmak için etkili bir seçenek olduğu belirtilmektedir. (Mascarenhas, 2003:8)

Biyolojik Arıtma

Mikroorganizmalar kullanılarak sondaj çamurundaki organik maddelerin ve bazı kirleticilerin biyolojik süreçlerle parçalanması. Bu yöntem çevreye daha az zarar verir ve doğa dostu bir çözüm olarak kabul edilir.

Imevbore ve ekibinin gerçekleştirdiği laboratuvar deneyleri, Nijerya'da sentetik bazlı çamurların biyolojik bozunumunu detaylı bir şekilde incelemiştir. Yapılan çalışmada kullanılan katı faz biyolojik bozunum testi, Nijerya'nın özgün çevresel koşullarına uyum sağlamak amacıyla özel olarak uyarlanmıştır. Sentetik bazlı çamurların içerisinde yer alan ester, olefin ve bu iki bileşenin karışımını içeren çamurların biyolojik bozunumunu, hem tatlı su hem de tuzlu su ortamlarında gözlemlenmiştir. (Imevbore vd.,2000:3)

Her gün suyun çözünmüş oksijen, tuzluluk, pH, iletkenlik ve maksimum-minimum sıcaklık değerlerini ölçerek, çamurların farklı çevresel koşullara nasıl tepki verdiğini analiz etmişlerdir. Bu ölçümler, çamurun çevreye olan etkilerini daha iyi anlamak ve çevresel faktörlerin çamurun kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu sayede, çamurun olası zararlı etkilerinin önlenmesi ve yönetilmesi için daha uygun stratejiler geliştirilmiştir. Ayrıca, kimyasal oksijen talebini (COD) haftalık olarak ölçerek çamurların biyolojik bozunma sürecini değerlendirmişlerdir (Altun ve Atayev, 2017:161).

Yapılan araştırma sonuçları, esterlerin oksijensiz ortamlarda olefinlere kıyasla daha hızlı biyolojik bozunmaya uğradığını göstermektedir. Ayrıca, sentetik bazlı çamurların tuzlu su ortamında, tatlı suya göre daha hızlı bir biyolojik bozunma sürecine girdiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, farklı kimyasal bileşiklerin ve çevresel koşulların biyolojik bozunma hızını

önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle deniz ortamlarında sentetik bazlı çamurların daha hızlı bozunması, atık yönetimi stratejilerinin bu duruma göre optimize edilmesini gerektirir. Bu bulgular, çevresel koşulların ve çamur bileşenlerinin biyolojik bozunma süreçleri üzerindeki etkilerini anlamak açısından önemli bilgiler sağlamaktadır (Altun ve Atayev, 2017:163).

Fiziksel Arıtma

Çamurun mekanik yöntemlerle su içeriğinin azaltılması ve çamur bileşenlerinin ayrıştırılması. Santrifüj, filtrasyon veya buharlaştırma gibi yöntemler kullanılarak daha konsantre ve yönetilebilir atık ürünleri elde edilir.

Uluslararası Petrol ve Gaz üreticileri Birliği' nin 2016 yılındaki atık yönetim raporuna göre, özellikle sentetik bazlı susuz sondaj çamurları için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan "Mekanik Kırıntı Kurutma" veya diğer adıyla "Santrifüj Kurutucu", çamurun etkili bir şekilde işlenmesine katkıda bulunmaktadır (IAOGP, 2016). Bu yöntem, çamur içinde bulunan kırıntıları, katıları ve kesintileri ayırmak için kullanılan bir santrifüj kurutucusunu içerir. Temel akışkan, çamur kırıntılarında korunurken, kırıntıların içinde bulunan bu akışkanın konsantrasyonu azaltılarak daha etkili bir ıslah işlemi gerçekleştirilir.

Bu kurutucu sistemin hem yatay hem de dikey versiyonları bulunmaktadır. İki sistemde de, sıvıyı katıdan ayırmak için telli basket elekler ve hızlı dönen koniler kullanılır. Bu tasarım, çamurun katı ve sıvı bileşenlerini etkili bir şekilde ayrıştırarak atık yönetiminde önemli bir rol oynar. Mekanik kırıntı kurutma yöntemi, çamurun içerdiği önemli maddelerin etkili bir şekilde işlenmesine olanak tanıyarak, sondaj atıklarının çevresel etkilerini azaltmaya ve atıkları daha güvenli bir şekilde bertaraf etmeye yardımcı olmaktadır.

Susuzlaştırma, kimyasal prosesler ve santrifüj ayrımı gibi gelişmiş teknolojileri içeren bir atık yönetimi sürecidir. Bu yöntem, parçacıkları ve kolloidal maddeleri sıvı akışkanlardan etkili bir şekilde uzaklaştırarak temiz su elde etmeyi amaçlar (Altun ve Atayev, 2017:162).

Modern yüksek hızlı santrifüjler, mikron büyüklüğündeki parçacıkları sistemden uzaklaştırabilir, bu da suyun kalitesini artırır. Ayrıca, kimyasal işlemlerle geliştirilmiş santrifüj separasyonu, özellikle tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu veya atık sıvı bertarafının maliyetli olduğu durumlarda ekonomik avantajlar sunar.

Bu yöntem, su bazlı akışkanların susuzlaştırılmasını genellikle etkilemez, çünkü yağlar ve kolloidal katılar uzaklaştırıldığında su üzerinde yüzerler. Ancak, petrol bazlı çamurların susuzlaştırılması daha zor olabilir ve bu durumda petrol ve suyun ayrışması için özel emülsiyon kırıcılar kullanılabilir. Günümüzde çimento ile kirletilmiş akışkanların sadece katı kısımlarının uzaklaştırılmasıyla maliyetleri düşürmek mümkündür.

Susuzlaştırma sistemleri, küçük bir kuleye monte edilebilen sabit sistemlerden, treyler üzerine yerleştirilmiş taşınabilir sistemlere kadar geniş bir yelpazede değişiklik gösterebilir. Lokasyondaki susuzlaştırma ünitesi, standart dışı değerlere sahip akışkanın depolanmasına olanak tanır ve katıları sıvıdan etkili bir şekilde ayıran bir işlem gerçekleştirir.

Susuzlaştırma süreci ve uygulanan kimyasal iyileştirmelere bağlı olarak, elde edilen akışkanın geri dönüşüm potansiyeli göz önüne alınabilir veya daha ileri bir arıtma adımından sonra tekrar kullanılabilir. İlk aşamada elde edilen su genellikle yeterince temiz olsa da, geri dönüşüme alınmadan önce pH düzenlemesi yapılması gerekebilir. Ancak, daha kapsamlı bir arıtma süreci, suyun yerel standartlara uygun şekilde bertaraf edilmesi için gerekebilir (Robinson, L. 2005). Arktik, ormanlık ve yağmur ormanları gibi hassas ekosistemlere sahip bölgelerde gerçekleştirilen operasyonlarda, susuzlaştırma ünitelerinin konumlandırılacağı yerler önemlidir. Ayrıca, tatlı su kaynaklarına yakın sondajlarda, hassas balıkçılık bölgelerinde ve deniz canlılarının korunması gereken alanlarda, susuzlaştırma ünitelerinin yerinde kullanılması kritik bir gereklilik haline gelebilir. Bu durum, çevresel etkilerin azaltılması ve su kaynaklarının korunması açısından büyük önem taşır. Susuzlaştırma üniteleri, atıkların etkili bir şekilde işlenmesiyle çevreye zarar vermeden su kaynaklarının korunmasına yardımcı olabilir.

Hickenbottom ve arkadaşlarının araştırmasında, sondaj kesintilerini bertaraf etmek için başlangıçta ters ozmoz membran yöntemini uygulamışlardır. Çalışma kapsamında, öncelikle sondaj kesintilerini susuzlaştırmışlar ve ardından elde edilen suyu ters ozmoz membranıyla arıtarak temiz su elde etmişlerdir (Hickenbottom vd.,2013: 63)

Toprakta İyileştirme

Sondaj çamurunun kontrollü ortamlarda toprakla karıştırılarak doğal iyileştirme süreçlerine tabi tutulması. Bu yöntemle zamanla zararlı maddeler doğal yollarla ayrışır ve çevre üzerindeki olumsuz etkiler azaltılır.

Bilimsel literatürde, genellikle ıslah ve bertaraf yöntemlerinin özellikle petrol bazlı çamurlar üzerinde geliştirildiği belirtilmekle birlikte, bu yöntemlerin diğer çamur türlerinde de başarıyla uygulanabileceği gözlemlenmiştir. Yeraltına enjeksiyon yöntemi, çevreye zarar vermeyen herhangi bir çamur tipi için uygun bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Ladousse ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, Fransa'da petrol bazlı çamurlar için arazi iyileştirme yönteminin potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, Total şirketinin gerçekleştirdiği bir sondaj işleminden elde edilen petrol bazlı çamur üzerinde yapılmıştır. Ancak, çamurun araziye dökülmeden önce ısıtma veya kimyasal yöntemlerle ıslah edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. İki yıl süren çalışmalarda, yılda bir kez yapılan hasattan sonra bitkiler, bitki kökleri ve tohumlar üzerinde değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Atmosfer sıcaklığının, biyolojik bozunum için en etkili parametrelerden biri olduğu ve en uygun sıcaklık

aralığının 20-35°C arasında bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çamurdaki hidrokarbon bileşenlerinin yerin yaklaşık 20 cm derinliğinin altına geçmediği gözlemlenmiştir. Tüm testlerde, hidrokarbonların %75'ten fazlasının biyolojik olarak parçalandığı ve elde edilen mahsullerde herhangi bir petrojenik hidrokarbon izine rastlanmadığı belirtilmiştir. Bu bulgular, uygun ıslah yöntemlerinin ve çevresel koşulların biyolojik bozunma üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. (Ladousse vd.,1996:2)

Hejazi ve Husain tarafından gerçekleştirilen kapsamlı saha deneyleri çalışması, Suudi Arabistan'ın Juaymah sahasında arazi iyileştirme yönteminin etkinliğini incelemiş ve bu yöntemin daha çekici kılınmasında rol oynayan faktörleri ortaya koymuştur. Yapılan saha deneyleri 12 ay boyunca devam etmiş olup mevsimsel etkileri dikkate almış, ayrıca her ay düzenli ölçümler alınmıştır. (Hejazi ve Husain, 2004:2)

Bu yöntemin çekiciliğini artıran nedenlerden biri, bölgenin kurak ve sıcak ikliminden kaynaklanmaktadır. Arazi iyileştirme ve biyoreaktör teknolojileri, petrol atıklarının doğal olarak parçalanması ve arındırılması için kullanılan yöntemler arasında yer almıştır. Çalışma, Suudi Arabistan'ın özel iklim koşullarında bu iyileştirme yöntemlerinin etkinliği üzerine odaklanarak detaylı bilgiler sunmaktadır.

Atık gömme, yerinde ıslah yöntemlerinden biri olup düşük maliyeti nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu düşük maliyet, atıkların taşınması sırasında nakliye ücreti olmamasından kaynaklanmaktadır. Swarbrick ve Valsky tarafından yürütülen bir çalışmada, Avustralya'daki atık gömü alanlarında atık kütlelerinin taşınma hızı üzerine bir inceleme yapılmıştır. Ayrıca, birçok resmi yetkilinin atık gömme işleminin çevresel kirliliğe yol açtığını belirtmesine rağmen, atıkların kütle akışı ve konsantrasyon değerinin çevre koşullarına göre düşük olduğu durumlarda çevresel etkinin önemli ölçüde azalabileceği vurgulanmıştır (Swarbrick ve Valsky, 2000: 22).

Bu yöntemler, sondaj çamurundaki zararlı maddeleri minimize ederek çevresel riskleri en aza indirmeyi amaçlar.

SONUÇ VE ÖNERİ

Sondaj çamurları, petrol, doğalgaz ve jeotermal kaynakların aranması ve üretimi sırasında kullanılan önemli bir malzemedir. Ancak, sondaj işlemi sonucunda oluşan atık sondaj çamurları, çevresel etkiler açısından dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Bu atıklar, içerdiği kimyasal maddeler, ağır metaller ve toksik bileşenler nedeniyle çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Özellikle, sızma, sızıntı ve yanlış bertaraf yöntemleri nedeniyle toprağın ve yer altı sularının kirlenmesi riski bulunmaktadır. Dolayısıyla, sondaj çamurlarının çevre dostu yöntemlerle yönetimi, atıkların doğaya bırakılmadan önce uygun şekilde arıtılması büyük önem taşır.

Sondaj çamurlarının çevresel etkileri ve atık yönetimi konusundaki mevcut çalışmalar, çevreye zarar vermeden bertaraf yöntemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sondaj çamurlarında bulunan ağır metaller, petrol türevleri ve kimyasallar doğrudan toprak ve su kaynaklarını tehdit etmektedir. Yanlış bertaraf yöntemleri ekosistemlere ciddi zararlar verebilir. Sondaj faaliyetleri sırasında ortaya çıkan büyük hacimli çamurların uygun şekilde yönetilmesi zorunludur. Depolama kapasitelerinin sınırlı olması ve bertaraf maliyetleri, bu atıkların geri kazanımını ve minimize edilmesini önemli hale getirmektedir. Atık yönetiminde etkin bir denetim mekanizması oluşturulması ve bu konudaki yasal çerçevenin sıkılaştırılması, çevresel riskleri azaltacak en önemli faktörlerden biridir.

Bu konuda yapılacak çalışma ve alınacak önlemler şu şekilde sıralanabilir;

- Sondaj çamurlarının içerdiği bazı bileşenler geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir. Özellikle kimyasalların yeniden kullanımını sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantaj sağlayacaktır.
- Sondaj faaliyetleri öncesinde yapılan ÇED raporlarının daha kapsamlı hale getirilmesi ve çevresel etkilerin tam anlamıyla değerlendirilmesi, oluşacak olumsuz sonuçları önlemek için gereklidir.
- Sondaj çamurlarının yönetiminde kullanılan yöntemlerin daha çevre dostu hale getirilmesi için ileri teknolojiler geliştirilmelidir. Kimyasal ve biyolojik arıtma süreçleri, bu bağlamda etkili bir çözüm sağlayabilir.
- Sondaj atıklarıyla ilgili düzenli denetimler yapılmalı ve uzun vadeli çevresel izleme programları oluşturulmalıdır. Bu sayede, olası kaçaklar veya çevresel bozulmalar erken tespit edilerek müdahale edilebilir.
- Çevreye zarar veren atıkların yönetimi konusunda sadece şirketler değil, aynı zamanda bölgede yaşayan halk ve çalışanlar da bilinçlendirilmelidir. Eğitim ve farkındalık programları bu konuda etkili olacaktır.

Sonuç olarak, sondaj çamurlarının çevresel etkilerini en aza indirmek ve bu atıkları güvenli bir şekilde bertaraf etmek, hem çevre sağlığı hem de toplum sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda atık yönetimi süreçlerinin geliştirilmesi, sıkı denetimlerin yapılması ve teknolojik yeniliklerin uygulanması, sürdürülebilir bir çevre politikası açısından gereklidir.

REFERANSLAR

- Altun, G., ve Atayev, H. (2017). Sondaj akışkanı atık yönetimi ve bertarafı. *13. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi* – 19-22 Nisan 2017, İzmir 155-166.
- Asker, N., Özkan, V., ve Özkan, A. (2019). Su Bazlı Sondaj Çamurunun Reolojik ve Filtrasyon Özelliklerine ZnO Nanopartikülü ile Fonksiyonelleştirilmiş Çok Duvarlı Karbon Nanotüpün Etkisinin Araştırılması. Paper presented at the *Euro Asia 5th. International Congress on Applied Sciences*, Adana, Turkey.
- Avcı, E. (2018). Jeotermal Sularla Hazırlanmış Çamurların Sondaj Performansına Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay
- Awele, N. (2014). Investigation of additives on drilling mud performance with “tönder geothermal drilling” as a case study. Aalborg University, Chemical Engineering Department, M.Sc. Oil And Gas Technology, Master Thesis.
- Balkaya, A. T., Gül, S., İlgen, E., Dimez, A. B., Deniz, S., Heke, E., . . . ve Erşahin, A. (2019). Sondaj El Kitabı. Ankara: Petrol Mühendisleri Odası Yayınları.
- Barrett, M.L. (2013). Drilling mud: A 20th century history. Petroleum History Institute, *Oil-Industry History*, v. 12(1),161 - 168.
- Da Silva, L.J., Alves, F.C. ve de França, F.P., (2012). A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries, *Waste Management Research*, 30 (10), 1016-1030.
- EPA. (2015).https://www.epa.ie/pubs/reports/waste/stats/wasteclassification/EPA_Waste_Classification_2015_Web.pdf, accessed in March 2017.
- Güçüyener, İ., H. (2009). Sondaj Akışkanları Teknolojisindeki Son Gelişmeler. İTÜ Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü Ders Sunumu, İstanbul.
- Hejazi, R.F. ve Husain, T. (2004). Oil sludge degradation study under arid conditions using landfarm and bioreactor technologies, SPE Paper No: 86663, *7th SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil& Gas Exploration and Production*, Calgary, Alberta, Canada, March 29-31.
- Hickenbottom, K. L., Hancock, N. T., Hutchings, N. R., Appleton, E. W., Beaudry, E. G., Xu, P., ve Cath, T. Y. (2013). Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations. *Desalination*, 312, 60-66.
- International Association of Oil & Gas Producers (IAOGP), (2016). Drilling waste management technology review, Report no: 557, June 2016.
- Imevbore, V.O, Nwankwo, J.N, Ifeadi C.N, ve Ladan, M.D. (2000). Laboratory assessment of biodegradation of non-soluble drilling mud base fluids under Nigerian environmental conditions, SPE Paper No: 61043, *SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil& Gas Exploration and Production*, Stavanger, Norway, June 26-28.
- Kargı, E. (2015). Sondaj Çamuru Uygulamaları İçin Kil-Polimer Etkileşimlerinin Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11527/13352>
- Kriipsalu, M., Marques, M., Nammari, D.R. ve Hogland, W., (2007), Bio-treatment of oily sludge: the contribution of amendment material to the content of target contaminants, and the biodegradation dynamics, *Journal of Hazardus Materials*, 148 (3), 616-622.

- Ladousse, A, Tallec, C, Cheineau TVD. C. ve Vidalie, J. F. (1996). Landfarming of drill cuttings, SPE Paper No: 35879, *International Conference on Health, Safety and Environment*, New Orleans, Louisiana, USA, June 9-12.
- Mascarenhas, A. (2003). Incineration: Efficient, economical, and environmental. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 42(09).
- Morillon, A., Vidalie, J.F., Hamzah, U.S., Suripno, S. ve Hadinoto, E.K., (2002). Drilling and waste management, SPE Paper No: 73931, *SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production*, Kuala Lumpur, Malaysia, March 20-22.
- Nunes, E.C.S. (2013). Waste management in the oil and gas industry by Brazilian guideline for environmental audits DZ-056-R.3. *American Journal of Environmental Protection*, 2 (6), 170-175.
- Okon, A. N., Udoh, F. D., ve Bassey, P. G. (2014). Evaluation of Rice Husk as Fluid Loss Control Additive in Water-Based Drilling Mud. Paper presented at the *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*, Lagos, Nigeria. <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-172379-MS>
- Onat, N. (1971). Bentonitin Petrol Sondajlarında Kullanılması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 10(5), 30-36. Retrieved from <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/634.pdf>
- Robinson, L. (2005). Drilling fluid processing handbook, published by Gulf Professional Publishing of Elsevier, Burlington, MA, USA. ISBN 0-7506-7775-9.
- Swarbrick, G. ve Valsky, A., (2000) Mass transfer rates for Australian landfills. *SRM International Symposium*, November 19-24, 2000, Paper Number: ISRM-IS-2000-148
- Tahhan, R.A., Ammari, T.G., Goussous, S.J. ve Al-Shdaifat, H.I., 2011, Enhancing the biodegradation of total petroleum hydrocarbons in oily sludge by a modified bioaugmentation strategy, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (1), 130-134.
- T.C. Resmi Gazete. Atık Yönetimi Yönetmeliği. 29314, 2015.
- T.C. Resmi Gazete. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. 27533, 2010.
- T.C. Resmi Gazete. Maden Atıkları Yönetmeliği, 29417, 2015.
- Zhang, J., Li, J., Thring, R.W., Hu, X. ve Song, X. (2012). Oil recovery from refinery oily sludge via ultrasound and freeze/thaw, *Journal of Hazardous Materials*, 203-204 ciltleri, 195-203.

Enkoderli DC Motorda PWM Kontrolü

Serhat KÜÇÜKDERMENCİ¹

1- Doç. Dr.; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.
kucukdermenci@balikesir.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6421-7773

ÖZET

Bu çalışma, Arduino, Proteus ve LabVIEW kullanarak PWM sinyali ile DC motor hız kontrolü ve motorun hareket durumunun enkoder yardımıyla izlenmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, Atmega328P mikrodenetleyici entegresi ve L293D motor sürücü devresi kullanılarak, enkoderli bir DC motorun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Motorun kontrolü için gerekli PWM sinyalleri Arduino programı ile oluşturulmuş ve bu sinyaller seri haberleşme yoluyla iletilmiştir. Motorun dönüş hızı, Arduino üzerindeki enkoder yardımıyla okunarak her 50 milisaniyede bir seri haberleşme aracılığıyla LabVIEW programına aktarılmıştır. LabVIEW yazılımı, PWM sinyalleri ile motorun hızını kontrol ederken, enkoderden gelen verileri grafiksel olarak görüntülemiştir. Böylece hem PWM sinyallerinin hem de enkoder verilerinin aynı anda izlenebilmesi sağlanmıştır. Bu araştırma, motor kontrol sistemlerinde Arduino ve LabVIEW entegrasyonunun nasıl sağlanabileceğini ve bu sistemlerin simülasyon ortamında nasıl test edilebileceğini göstermektedir. Sonuçlar, motor hızının PWM sinyalleri ile etkin bir şekilde kontrol edilebileceğini ve enkoder verilerinin gerçek zamanlı olarak izlenebileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler – Arduino, PWM Kontrolü, Enkoder, Proteus Simülasyonu, LabVIEW

GİRİŞ

Endüstriyel otomasyon ve robotik sistemlerde motor kontrolü, sistem performansını ve verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. DC motorlar, yüksek verimlilikleri ve hassas kontrol imkanları nedeniyle bu tür sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Motor hızının hassas bir şekilde kontrol edilmesi, özellikle pozisyon ve hız geri beslemesi sağlayan enkoder gibi sensörler yardımıyla mümkündür. PWM (Pulse Width Modulation) yöntemi ise, motorun hızını ve torkunu kontrol etmek için sıklıkla tercih edilen bir tekniktir.

Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM), özellikle Arduino mikro denetleyicilerini içeren uygulamalarda elektrik motorlarını kontrol etmek için temel bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Arduino'nun LabVIEW gibi grafik programlama ortamlarıyla entegrasyonu, döner kodlayıcılar gibi sensörlerden gerçek zamanlı geri bildirim alan sofistike kontrol sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Gömülü sistemler, belirli bir görevi yerine getirmek üzere tasarlanmış, donanım ve yazılım bileşenlerinin bir araya geldiği entegre sistemlerdir (Ilten 2023b, 2023a, 2024a, 2024c, 2024b). Bu sistemler, otomasyon, robotik, sağlık teknolojileri ve daha birçok alanda kritik roller üstlenmektedir (Küçükdermenci 2023a, 2023c, 2024d, 2024e, 2024f, 2024c,

2023d, 2023f, 2023g, 2023e, 2023b, 2024g, 2024a, 2024b). Gömülü sistemlerin popüler örneklerinden biri olan Arduino kullanımı kolay yapısı ve açık kaynaklı yazılım desteği ile prototipleme süreçlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle hobi projelerinden endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Raspberry Pi ise daha güçlü donanım kapasitesiyle ön plana çıkan, çok yönlü bir mini bilgisayar olup, eğitim, araştırma ve geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar gömülü sistemlerle üretilen PWM sinyallerinin motor sürücü devrelerini etkili bir şekilde kontrol edebildiğini göstermektedir (Ghosh vd. 2013). Motor kontrolü bağlamında, DC motorların hızını ayarlamak için PWM sinyalleri kullanılmıştır. LabVIEW'de bir grafik kullanıcı arayüzünün (GUI) geliştirilmesi, kullanıcıların Arduino üzerindeki PWM pinleri aracılığıyla motor hızlarını etkileşimli olarak ayarlamalarını sağlar (Vikhe, Punjabi, ve Kadu 2014). Bu etkileşim yalnızca kullanıcı deneyimini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda sistemden gelen geri bildirimlere dayalı gerçek zamanlı ayarlamalara da olanak tanır. Döner enkoderlerin PWM kontrolü ile kullanılmasının DC motorlarda hız ölçümlerinin doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. Enkoderler, PWM'nin her artışında veri göndererek motor hız kontrol algoritmalarını iyileştirmek için kullanılabilecek kritik geri bildirim sağlar (Latif vd. 2020). Bu geri bildirim döngüsü, özellikle yüksek yanıt hızı gerektiren uygulamalarda motor operasyonları üzerinde hassas kontrol elde etmek için gereklidir.

LabVIEW, Arduino ile arayüz oluşturmak ve gerçek zamanlı veri işlemeyi yönetmek için güçlü bir araç olarak hizmet vermektedir. PID kontrolörlerinin LabVIEW içinde uygulanması, enkoder geri bildirimine dayalı olarak PWM sinyallerinde otomatik ayarlamalar yapılmasına olanak tanıyarak DC motorların kontrol hassasiyetini önemli ölçüde artırır (Angalaeswari vd. 2016). Ayrıca, LabVIEW ortamı sistem performansını izlemek için etkileşimli bir platform sunarak motor kontrol sistemlerinin daha verimli bir şekilde sorun gidermesini ve optimizasyonunu sağlar. Sıcaklık sensörlerinin LabVIEW ve Arduino ile entegrasyonu da bu yaklaşımın uyarlanabilirliğini göstermektedir. Araştırmacılar, sıcaklık değişimlerine yanıt olarak PWM sinyallerini modüle ederek DC motorların etkili gerçek zamanlı hız kontrolünü gösterebilmişlerdir (Asha vd. 2017). Bu, çeşitli çevresel faktörlere yanıt verebilen çok değişkenli kontrol sistemlerinin potansiyelini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, Arduino tabanlı bir kontrol sistemi ile enkoderli bir DC motorun hız kontrolü ve hız geri bildirim takibi ele alınmaktadır. Arduino'nun seri haberleşme özelliği kullanılarak PWM sinyallerinin gönderilmesi ve motorun dönüş hızının enkoder ile izlenmesi sağlanmıştır. Motor sürücü olarak L293D entegresi kullanılarak, PWM sinyalleri ile motorun hızı kontrol edilmiş, motorun hız verileri ise enkoder yardımıyla her 50 milisaniyede bir alınarak seri haberleşme yoluyla aktarılmıştır. Bu veri

akışı, LabVIEW yazılımı aracılığıyla grafiksel olarak görüntülenmiş ve analiz edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, motor hız kontrolü ve enkoder verilerinin takibi için Arduino tabanlı bir sistem geliştirilmiş ve Proteus simülasyon programı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Sistem tasarımı kullanılan materyaller ve izlenen yöntem aşağıda detaylandırılmıştır.

A. *Materyal*

Arduino UNO'ya entegre olan Atmega328P mikrodenetleyicisi sistemin merkezi kontrol birimi olarak görev yapmıştır. Seri haberleşme, PWM sinyali üretimi ve enkoder verilerinin işlenmesi bu mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmiştir. L293D motor sürücü entegresi DC motorun yönünü ve hızını kontrol etmek için kullanılmıştır. PWM sinyalleri bu entegreye iletilmiş ve motorun dönme hızını ayarlamak için kullanılmıştır. Motorun hızını ve dönüş yönünü takip etmek için enkoder özelliğine sahip bir DC motor kullanılmıştır. Proteus simülasyon programında seri haberleşme için kullanılan Compim elemanı bilgisayar ile mikrodenetleyici arasındaki seri iletişimi temsil etmektedir. Proteus simülasyon programının Schematic Capture modülü üzerinden devre tasarımı yapılmış ve sistemin davranışları simüle edilmiştir. Atmega328P mikrodenetleyici için gerekli olan yazılım Arduino IDE platformunda geliştirilmiş, PWM kontrolü ve enkoder verilerinin okunması için Arduino kodu yazılmıştır. LabVIEW yazılımı motor hızını kontrol etmek ve enkoder verilerini grafiksel olarak göstermek için kullanılmıştır. LabVIEW üzerinden PWM değerleri ayarlanmış ve seri haberleşme ile Arduino'dan alınan veriler görselleştirilmiştir.

B. *Yöntem*

Proteus simülasyon programında Atmega328P mikrodenetleyici, L293D motor sürücü ve enkoderli DC motor kullanılarak bir motor kontrol devresi tasarlanmıştır. Atmega328P'nin 30 ve 31 numaralı Rx ve Tx pinleri, Compim elemanının 2 ve 3 numaralı Rx ve Tx pinlerine bağlanmıştır. Enkoderin E1 ve E2 etiketli çıkışları, mikrodenetleyicinin 32 ve 1 numaralı pinlerine bağlanarak hız geri bildirimi sağlanmıştır. L293D motor sürücünün IN1 ve IN2 pinlerine sırasıyla Atmega328P'nin 13 ve 14 numaralı pinlerinden PWM sinyalleri iletilmiştir.

Arduino IDE'de yazılan program, motor hızını PWM sinyalleri ile kontrol etmeyi ve enkoderden gelen hız verilerini her 50 milisaniyede bir seri haberleşme yoluyla bilgisayara göndermeyi amaçlamıştır. Kodda, Enkoder kütüphanesi kullanılarak motorun hız bilgileri okunmuş ve Arduino'nun D9 ve D10 pinlerinden PWM sinyalleri üretilmiştir. Seri

haberleşme ile bilgisayara iletilen enkoder verileri, LabVIEW yazılımında işlenmiştir.

LabVIEW programında, seri haberleşme ile Arduino'dan alınan veriler görselleştirilmiş ve PWM sinyalleri gönderilmiştir. Kullanıcı, LabVIEW arayüzünde PWM değerlerini ayarlayarak motorun hızını kontrol edebilmiştir. Alınan enkoder verileri grafikler ile görselleştirilmiş ve motor hızının anlık takibi sağlanmıştır. Simülasyon başlatıldığında, motor hızının PWM sinyalleri ile kontrol edildiği ve enkoder verilerinin seri haberleşme ile başarıyla aktarıldığı gözlemlenmiştir. LabVIEW yazılımı ile yapılan testlerde, motorun hızında meydana gelen değişimlerin grafiksel olarak izlendiği ve sistemin düzgün çalıştığı doğrulanmıştır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Arduino tabanlı bir motor kontrol sistemi geliştirilmiş ve PWM sinyalleri ile DC motorun hızı kontrol edilmiştir. Motorun hızı, enkoder yardımıyla geri beslenmiş ve elde edilen veriler LabVIEW yazılımında görselleştirilmiştir. Proteus simülasyon ortamında tasarlanan sistem hem yazılım hem de donanım açısından başarılı bir şekilde test edilmiştir.

Arduino üzerinden gönderilen PWM sinyalleri, L293D motor sürücü entegresi aracılığıyla DC motorun hızını kontrol etmiştir. LabVIEW programı aracılığıyla PWM değerleri değiştirildiğinde motor hızında da doğrusal bir artış ya da azalış gözlenmiştir. Özellikle düşük PWM değerlerinde motorun hızının düşürüldüğü ve yüksek PWM değerlerinde hızın arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar, PWM sinyallerinin motor hızını etkin bir şekilde kontrol etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

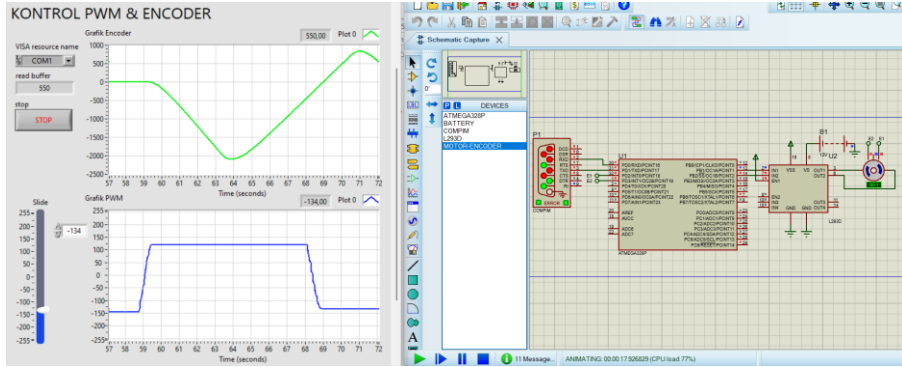
Enkoderden elde edilen hız verileri, Arduino'dan seri haberleşme ile alınmış ve her 50 milisaniyede bir LabVIEW'de grafiksel olarak görüntülenmiştir. Motor hızının arttığı durumlarda enkoder verilerinde de bir artış gözlenmiş; hız azaldığında ise verilerde bir düşüş görülmüştür. Bu, enkoderin doğru ve güvenilir geri besleme sağladığını ve sistemin motor hızını başarılı bir şekilde izleyebildiğini göstermektedir. Özellikle yüksek hızlarda enkoderin verdiği verilerin tutarlılığı ve düşük hızlarda hassasiyet önemli bir başarı olarak değerlendirilmiştir.

Simülasyon sırasında motorun hız kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmış, enkoder verileri de aynı şekilde doğru şekilde aktarılmıştır. Bu durum, tasarlanan devrenin gerçek dünyadaki uygulamalar için simülasyon ortamında test edilmesinin faydalı olduğunu ve tasarımın doğruluğunu kanıtlamıştır. Proteus simülasyonu sayesinde, donanım kurulumu yapılmadan önce potansiyel hataların tespit edilmesi ve çözülmesi mümkün olmuştur.

LabVIEW yazılımı, motor kontrol sisteminin kullanıcı dostu bir arayüz ile izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlamıştır. LabVIEW

üzerinden gönderilen PWM sinyalleri, motorun hızını etkili bir şekilde kontrol ederken, aynı anda enkoder verilerinin grafiksel olarak gösterilmesi, sistemin performansını daha iyi analiz etme imkânı sunmuştur. Gerçek zamanlı verilerin görüntülenmesi, motorun hız değişikliklerine anında tepki verdiğini ve kontrol sisteminin doğru çalıştığını kanıtlamaktadır.

Geliştirilen sistemde PWM sinyalleri ve enkoder verileri arasındaki ilişki başarılı bir şekilde ortaya konmuş, motorun hız kontrolü ve geri bildirim mekanizması hatasız bir şekilde çalışmıştır. PWM sinyalleri ile motor hızı kontrol edilirken enkoder verileri LabVIEW'de grafiksel olarak izlenmektedir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1: Proteus simülasyon ortamında tasarlanan motor kontrol devresinin ve LabVIEW yazılımında gerçekleştirilen gerçek zamanlı veri görselleştirme

SONUÇ

Bu çalışmada, Arduino tabanlı bir motor kontrol sistemi geliştirilmiş ve Proteus simülasyon ortamında test edilmiştir. PWM sinyalleri ile motor hızının kontrol edilmesi ve enkoder kullanılarak hız geri bildirimi alınması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. LabVIEW yazılımı, gerçek zamanlı veri görselleştirme ve motor kontrolü için kullanılmış, sistemin performansı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Çalışma, PWM sinyalleri kullanarak motor hızını etkin bir şekilde kontrol etmenin mümkün olduğunu ve enkoder yardımıyla doğru geri bildirim almanın önemini ortaya koymuştur. Arduino, Proteus ve LabVIEW entegrasyonu sayesinde hem simülasyon ortamında hem de gerçek donanım ortamında sistemin başarıyla çalıştığı gözlemlenmiştir. Proteus simülasyonunun, donanım kurulumundan önce potansiyel hataların tespit edilmesine ve sistem performansının test edilmesine olanak sağladığı görülmüştür.

Bu sistem, endüstriyel otomasyon, robotik sistemler ve eğitim amaçlı projelerde kullanılabilecek esnek ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. İleride daha hassas enkoderler ve gelişmiş kontrol algoritmaları ile sistemin

performansının iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Bu çalışma, motor kontrolü ve geri besleme sistemleri üzerine yapılacak gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel sağlamaktadır.

REFERANSLAR

- Angalaeswari, S., Amit Kumar, Divyanshu Kumar, and Shubham Bhadoriya. 2016. "Speed Control of Permanent Magnet (PM)DC Motor Using Arduino and LabVIEW." Pp. 1–6 in *2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*. IEEE.
- Asha, K. R., P. Suhada Tasleem, A. V. Ravi Kumar, S. Mallikarjuna Swamy, and K. R. Rekha. 2017. "Real Time Speed Control of a DC Motor by Temperature Variation Using LabVIEW and Arduino." Pp. 72–75 in *2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT)*. IEEE.
- Ghosh, Somsubhra, Ranjit Kumar Barai, Samar Bhattacharya, Prarthana Bhattacharyya, Shubhobrata Rudra, Arka Dutta, and Rownick Pyne. 2013. "An FPGA Based Implementation of a Flexible Digital PID Controller for a Motion Control System." Pp. 1–6 in *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics*. IEEE.
- Ilten, Erdem. 2023a. *Active Disturbance Rejection Control of a DC Motor with Raspberry Pi on Simulink External Mode*. Vol. 1.
- Ilten, Erdem. 2023b. "DC Motor Position Control with Raspberry Pi on Simulink Wireless External Mode." *International Conference on Pioneer and Innovative Studies* 1:228–31. doi: 10.59287/icpis.835.
- Ilten, Erdem. 2024a. *Self-Excited Induction Generator Wireless Control Panel Design on Simulink External Mode with Raspberry Pi*.
- Ilten, Erdem. 2024b. *Sliding Mode Position Control Application for a DC Motor on Simulink External Mode with Raspberry Pi*.
- Ilten, Erdem. 2024c. "Super-Twisting Sliding Mode Liquid Level Control Implementation for Raspberry Pi." Pp. 5–17 in .
- Küçükdermenci, Serhat. 2023a. "Engelli Bireyler İçin Braille Yöntemine Yönelik Yardımcı Teknolojiler." Pp. 15–28 in *Mühendislik Alanında Uluslararası Teori, Araştırma ve Derlemeler Cilt 2*. Serüven Publishing.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023b. "İşaret Dili İçin Akıllı Eldiven Tasarımları." Pp. 85–101 in *Mühendislik Alanında Uluslararası Teori, Araştırma ve Derlemeler Cilt 1*. Serüven Publishing.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023c. "Raspberry Pi Based Braille Keyboard Design with Audio Output for the Visually Challenged." in *1st International Conference On Modern And Advanced Research All Sciences Academy*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023d. "Sign Language Voice Convertor Design Using Raspberry Pi for Impaired Individuals." in *Proceeding Book Of 1st International Conference On Recent And Innovative Results In Engineering And Technology*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023e. "Smart Wheelchair Design for Elderly and Disabled People." Pp. 574–80 in *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023f. "Su Kalitesi Akıllı Ölçüm Sistemleri." Pp. 441–58

in *Mühendislikte Güncel Yaklaşımlar*.

- Küçükdermenci, Serhat. 2023g. “Yaşlı ve Engelli Bireylere Yönelik Akıllı Tekerlekli Sandalye Tasarımları.” Pp. 419–40 in *Mühendislikte Güncel Yaklaşımlar*. Duvar Yayınları.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024a. “AVR Mikrodenetleyicide Zamanlayıcıların CTC Modda Programlanması.” Pp. 288–303 in *Innovative Studies in Engineering*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024b. “AVR Mikrodenetleyicide Zamanlayıcıların Normal Modda Programlanması.” Pp. 305–22 in *Innovative Studies in Engineering*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024c. “Design of A Cost-Effective Weather Station with Rain Forecast.” in *2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024d. “Development of a Wireless Firefighting Robot with Obstacle Avoidance and Fire Extinguishing Modes.” in *3rd International Conference on Frontiers in Academic Research*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024e. “Multifunctional Smart Glove: An Innovative Solution for Sign Language Interpretation and Wireless Wheelchair Control.” Pp. 1142–49 in *3rd International Conference on Frontiers in Academic Research*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024f. “Raspberry Pi-Based Real-Time Parking Monitoring with Mobile App Integration.” Pp. 1458–64 in *5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024g. “Wireless Foot Pressure Monitoring System for Gait Rehabilitation.” Pp. 1451–57 in *5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*. All Sciences Academy.
- Latif, Abdul, Afif Zuhri Arfianto, Hendro Agus Widodo, Robbi Rahim, and Elsayed T.Helmy. 2020. “Motor DC PID System Regulator for Mini Conveyor Drive Based-on Matlab.” *Journal of Robotics and Control (JRC)* 1(6). doi: 10.18196/jrc.1636.
- Vikhe, Pratap, Neelam Punjabi, and Chandrakant Kadu. 2014. “Real Time DC Motor Speed Control Using PID Controller in LabVIEW.” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 03(09):12162–67. doi: 10.15662/ijareeie.2014.0309046.

PID Tabanlı Sıcaklık Kontrol Arayüzünün Geliştirilmesi

Serhat KÜÇÜKDERMENCI¹

1- Doç. Dr.; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.
kucukdermenci@balikesir.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-6421-7773

ÖZET

Bu çalışma, LabVIEW ve Proteus kullanılarak PID tabanlı bir sıcaklık kontrol sistemi geliştirilmesini ve simülasyonunu sunmaktadır. Çalışmanın amacı, mikrodenetleyici tabanlı bir PID algoritması ile sıcaklık kontrol arayüzünü entegre eden verimli bir sistem tasarlamaktır. Sistem, ATmega328P mikrodenetleyici ve motor sürücüsü kullanarak bir ısıtıcı modeli üzerinden sıcaklık kontrolü sağlar. PID kontrol parametreleri olan Proportional (KP), Integral (KI) ve Derivative (KD), kullanıcı tarafından ayarlanabilir ve sistemin gerçek zamanlı geri bildirimi hem LCD ekran hem de sanal terminal aracılığıyla izlenebilir. PID algoritması, Arduino IDE'sinde PID_v2 kütüphanesi kullanılarak uygulanmış ve mikrodenetleyiciye yüklenmiştir. Kullanıcı arayüzü LabVIEW ile geliştirilmiş olup sistemin sanal COM portları üzerinden izlenmesine ve kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Simülasyon sonuçları Proteus ve LabVIEW entegrasyonunun başarılı olduğunu sıcaklık değerlerinin hassas bir şekilde kontrol edildiğini ve PID parametrelerinin gerçek zamanlı olarak ayarlandığını göstermektedir. Bu yaklaşım özellikle eğitim ve deneysel amaçlar için faydalı olup sanal ortamda karmaşık kontrol sistemlerinin simülasyonunu mümkün kılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – PID Kontrol, Sıcaklık Kontrol Sistemi, Proteus Simülasyonu, LabVIEW Arayüzü, Mikrodenetleyici Tabanlı Otomasyon

GİRİŞ

Son yıllarda gömülü sistemlerdeki teknolojik gelişmeler çeşitli uygulamalar için yüksek verimli ve uygun maliyetli çözümlerin oluşturulmasını sağlamıştır. Arduino ve Raspberry Pi gibi platformlar esneklikleri, uygun maliyetleri ve kullanım kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu platformların çok yönlülüğü, robotik (Küçükdermenci 2024e), ev otomasyonu (Gabriel and Wang 2022), çevresel izleme (Ilten 2024b) gibi çok sayıda uygulamada kullanılmalarına yol açmıştır. Örneğin Arduino ve Raspberry Pi çeşitli otomatik makinelerde ve daha sofistike projelerde başarıyla uygulanmıştır (Ilten 2023; Ilten ve Demirtas 2023b, 2023a; Küçükdermenci 2024d, 2024f, 2024g, 2024b, 2024c, 2024a, 2023d, 2023f, 2023g, 2023e, 2023a, 2023b, 2023c).

Açık kaynaklı bir mikrodenetleyici platformu olan Arduino hem donanım hem de yazılımdaki basitliği ile bilinir. Hem yeni başlayanlar hem de profesyoneller için idealdir. Platform Arduino Uno, Mega ve Nano dahil olmak üzere her biri çeşitli seviyelerde işlem gücü ve giriş/çıkış ihtiyaçları için uygun çeşitli modeller sunmaktadır (Ilten 2024a).

Modern kontrol sistemlerinde sıcaklık, basınç ve hız gibi fiziksel değişkenlerin hassas bir şekilde düzenlenmesi, çok çeşitli endüstriyel ve

bilimsel uygulamalarda çok önemlidir. Bu hassasiyeti elde etmek için yaygın olarak benimsenen yöntemlerden biri Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörlerinin kullanılmasıdır. PID kontrolörleri, sürekli olarak bir hata değeri hesaplayarak ve oransal, integral ve türev terimlerine dayalı düzeltici eylemler uygulayarak sistem kararlılığını ve doğruluğunu korumadaki basitliği ve etkinliği ile bilinir.

Araştırmalar, PID kontrolörlerinin verimli sıcaklık kontrol sistemleri oluşturmak için mikrodenetleyiciler ve simülasyon yazılımı dahil olmak üzere çeşitli donanımlar kullanılarak uygulanabileceğini göstermiştir. Örneğin bir çalışmada ısıtma elemanının sıcaklığını izlemek ve yönetmek için LabVIEW ile Arduino mikrodenetleyici kullanılarak PID kontrol işleminin uygulanması vurgulanmıştır (Asraf et vd. 2017). Bu entegrasyon endüstriyel ısıtma süreçleri ve laboratuvar deneyleri gibi uygulamalarda çok önemli olan gerçek zamanlı izleme ve kontrole olanak sağlamaktadır. Başka bir çalışmada kullanılan sistem test sırasında güvenilir iletişim ve etkili sıcaklık düzenlemesi sağlayarak LabVIEW'in kritik ortamlarda pratik uygulamasını sergilemiştir (Ning vd. 2018). Benzer şekilde, Wang ve arkadaşları LabVIEW kullanarak bir PID sıcaklık kontrol sistemi tasarlamış ve sanal cihazın yeteneklerini pratik otomatik kontrole genişleterek PID kontrolörlerinin istenen sıcaklık seviyelerini korumadaki etkinliğini vurgulamışlardır (Wang, Lu, ve Tian 2013). Ayrıca, gerçek zamanlı kontrol kavramı DC motor kontrolü gibi diğer uygulamalara da genişletilerek PID kontrolünün çeşitli alanlardaki daha geniş uygulanabilirliği gösterilmiştir (Vikhe, Punjabi, ve Kadu 2014). Benzer şekilde Torres ve arkadaşları LabVIEW ve Arduino kullanarak, laboratuvardan endüstriyel ölçeklere kadar çeşitli uygulamalarda hassas sıcaklık kontrolü elde etmek için PID ve PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) algoritmalarını içeren düşük maliyetli bir sıcaklık kontrol yazılımı oluşturmuştur (Torres vd. 2022).

Bu çalışma PID algoritmasını uygulayan bir Arduino programı tarafından kontrol edilen bir ATmega328P mikrodenetleyici, bir motor sürücüsü ve bir ısıtıcıdan oluşan sistem kontrolü ele alınmıştır. Sistemin performansı hem bir LCD ekran hem de LabVIEW'in gerçek zamanlı geri bildirim ve grafiksel veri görselleştirme sağlayan sanal ortamı aracılığıyla izlenmektedir. Önerilen yaklaşımın esnekliği ve basitliği, onu eğitim amaçlı ve fiziksel uygulamadan önce ön kontrol sistemi tasarım testi için uygun bir platform haline getirmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Sıcaklık PID kontrol sisteminin geliştirilmesi hem donanım simülasyonunu hem de yazılım entegrasyonunu içerir. Genel yaklaşım, donanım tasarımı için Proteus simülasyonunu, gerçek zamanlı izleme ve kontrol için LabVIEW'i entegre etmektedir. Bu çalışmanın adımları sırasıyla Proteus'ta bir kontrol devresi tasarlamak, PID kontrolü için bir Arduino

programı geliştirmek ve veri görselleştirme ve etkileşim için bir LabVIEW arayüzü oluşturmaktır.

A. Materyal

Proteus, tüm PID kontrol sistemini simüle etmek için kullanılan bir elektronik devre tasarımı ve simülasyon yazılımıdır. LabVIEW, sistemi gerçek zamanlı olarak izlemek ve kontrol etmek için bir kullanıcı arayüzü oluşturmak için kullanılan grafiksel bir programlama ortamıdır. ATmega328P mikrodenetleyici PID kontrol algoritmasını yürütmek için Proteus'ta simüle edilen bir mikrodenetleyici birimdir (MCU). PID_v2 kütüphanesi, mikrodenetleyicide PID kontrol algoritmasını uygulamak için kullanılan bir Arduino kütüphanesidir. UG-2864HSWEG01 OLED ekran (SSD1306 kontrolör), ayar noktası, proses değeri ve PID parametreleri dahil olmak üzere gerçek zamanlı verileri görüntülemek için kullanılan 128x64 grafik LCD'dir. COMPIM (RS232 seri iletişim), Proteus'ta simüle edilmiş mikrodenetleyici ile LabVIEW arasında seri iletişimi kolaylaştıran sanal bir COM port bileşenidir. Oven (ısıtıcı modeli), Proteus'ta sistemi simüle etmek için kullanılan ve kontrol edilen fiziksel sistemi temsil eden bir ısıtıcı modelidir. L298 motor sürücüsü, PID kontrol sinyallerine dayalı olarak uygun ıkışlar üreterek ısıtma elemanını kontrol etmek için kullanılır. Arduino IDE, PID kontrol algoritmasını ATmega328P mikrodenetleyicisine yazmak ve derlemek için kullanılan bir yazılım platformudur.

B. Yöntem

Proteus'un “Schematic Capture” alışma alanında, kontrol mantığını yürütmek için ATmega328P mikrodenetleyicisi kullanılarak bir sıcaklık kontrol devresi oluşturuldu. Mikrodenetleyicinin pinleri, sanal bir sıcaklık ısıtıcı, PID parametrelerini ayarlamak için potansiyometreler ve ısıtma elemanını kontrol etmek için bir motor sürücüsü dahil olmak üzere harici bileşenlerle arayüz oluşturacak şekilde yapılandırıldı. Ayrıca, seri iletişim için COMPIM elemanı kullanılırken, ayar noktası (SP), proses değeri (PV) ve PID parametreleri (KP, KI, KD) gibi gerçek zamanlı geri bildirimleri göstermek için UG-2864HSWEG01 OLED ekran eklenmiştir.

Kontrol algoritması, PID hesaplamasını gerçekleştiren ve alınan sıcaklık değerlerine göre çıkışı güncelleyen PID_v2 kütüphanesi kullanılarak yazılmıştır. Algoritma, potansiyometrelere bağlı analog girişlerden sıcaklık ayar noktasını (SP), proses değerini (PV) ve PID parametrelerini (KP, KI, KD) okur. Program, PWM sinyalleri üreterek ve L298 motor sürücüsünü kontrol ederek ısıtma gücünü ayarlar. Ayrıca seri iletişim kullanarak COMPIM modülü aracılığıyla LabVIEW ile iletişim kurar ve izleme için gerçek zamanlı veri gönderir.

Arduino programı derlendi ve HEX dosyası oluşturuldu, bu dosya daha sonra Proteus'taki ATmega328P mikrodenetleyicisine yüklendi. Sistem,

kontrol döngüsünü 10 milisaniyelik bir örnekleme süresiyle çalıştıracak şekilde yapılandırılarak PID kontrolünün sorunsuz çalışması sağlandı.

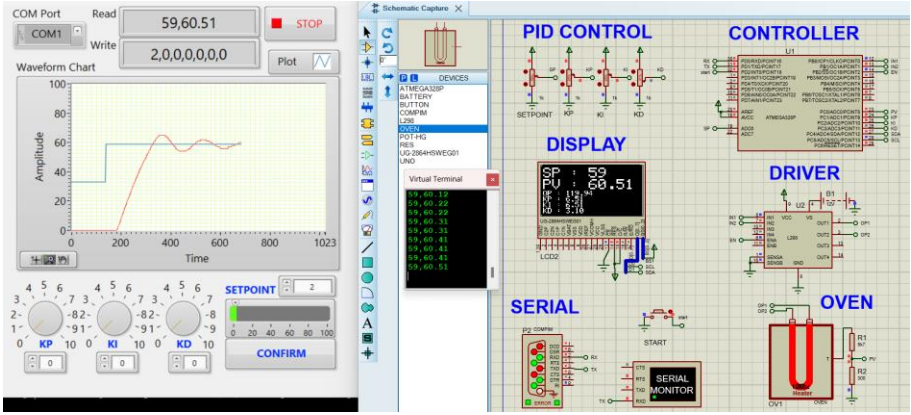
Simüle edilen kontrol sistemi ile gerçek zamanlı etkileşim sağlamak için bir LabVIEW programı geliştirilmiştir. LabVIEW ön paneli, gerçek zamanlı sıcaklık verilerini görüntülemek için bir dalga formu grafiğinin yanı sıra PID parametrelerini (KP, KI, KD) ve ayar noktasını (SP) ayarlamak ve izlemek için göstergeler içerir. COMPIM modülünde yapılandırılan sanal COM portları aracılığıyla LabVIEW ve Proteus arasında seri iletişim kurulmuştur.

Seri iletişim parametreleri yapılandırıldıktan sonra (COM portu ve baud hızı = 9600), hem Proteus simülasyonu hem de LabVIEW arayüzü aynı anda çalıştırıldı. Gerçek zamanlı sıcaklık kontrol sistemi, her iki ortamda da ayar noktası (SP) ve PID parametreleri ayarlanarak test edilmiştir. Sıcaklık tepkisi ve kontrolör çıkışları da dahil olmak üzere sonuçlar, Proteus'taki OLED ekran ve LabVIEW'deki dalga formu grafiği aracılığıyla izlendi.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Proteus simülasyonu, Arduino tabanlı PID kontrolü ve gerçek zamanlı izleme için LabVIEW entegrasyonu, sıcaklık kontrol sisteminin etkinliğini başarıyla göstermiştir. Simülasyon ve arayüzden elde edilen sonuçlar, sistemin sıcaklık stabilitesini koruma, PID parametrelerini gerçek zamanlı olarak ayarlama ve doğru sistem geri bildirimi görüntüleme becerisine göre değerlendirildi.

Entegre sistem, değişen koşullar altında istikrarlı sıcaklık kontrolünü sürdürmede güçlü bir performans sergilemiştir. Parametrelerin ince ayarlanması aşımı azalttı ve sistemin kararlılığını artırdı. Hem Proteus'taki OLED ekran hem de LabVIEW arayüzü gerçek zamanlı verileri başarılı bir şekilde görüntüleyerek kullanıcılara sistemin davranışı hakkında anında bilgi sağladı. Bu, herhangi bir kontrol sorununun hızlı bir şekilde tanımlanmasına ve anında düzeltici eylem yapılmasına olanak sağladı. Şekil 1 sistemin çalışmasını göstermektedir.



Şekil 1: Labview ve Proteus arası iletişimde PID tabanlı sıcaklık kontrol arayüzünün test edilmesi

Bu çalışmanın birincil hedeflerinden biri, Proteus ve LabVIEW arasında sorunsuz entegrasyonu göstermek ve simülasyon ve kontrol için her aracın güçlü yönlerinden yararlanmaktır. Sanal COM iletişimi iki ortam arasında sorunsuz veri alışverişini kolaylaştırdığı için bu entegrasyonun oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. LabVIEW arayüzü, kullanıcıların sistemin gerçek zamanlı performansını izlemelerini, PID parametrelerini ayarlamalarını ve sistemin davranışındaki değişiklikleri anlık olarak gözlemlmelerini sağladı. Proteus simülasyonu ile eşleştirilen bu gerçek zamanlı etkileşim, fiziksel bir sistemin davranışını yüksek doğrulukla taklit etti.

Simülasyon tabanlı yaklaşım PID kontrol stratejisini doğrulamada etkili olmasına rağmen, gerçek dünyadaki fiziksel bir sistemin karmaşıklıklarını tam olarak yakalayamayabilir. Simülasyonda kullanılan ısıtıcı idealize edilmiş bir modeli temsil etmektedir ve gerçek dünyadaki sistemler, bu çalışmada tam olarak hesaba katılmayan ek doğrusal olmayan özellikler, bozukluklar veya zaman gecikmeleri sergileyebilir. Aynı kontrol sisteminin gerçek donanım üzerinde uygulanması, sistemin sağlamlığı ve ölçeklenebilirliği hakkında daha fazla bilgi sağlayacaktır.

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, gelecekteki çalışmalar sistemi daha karmaşık, çok değişkenli süreçleri kontrol edecek şekilde genişletmeye odaklanabilir. Mevcut kurulum, sıcaklık düzenlemesi için tek döngü kontrolü ile sınırlıdır, ancak birçok endüstriyel süreç birbiriyle etkileşime giren birden fazla değişken içerir. Çok değişkenli bir kontrol sisteminin uygulanması, önerilen yaklaşımın ölçeklenebilirliği hakkında daha fazla bilgi sağlayacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada, Proteus ve LabVIEW kullanarak bir sıcaklık PID kontrol sistemini başarıyla geliştirdik ve simüle ettik, bu platformları gerçek zamanlı izleme ve kontrol için entegre etmenin etkinliğini gösterdik. Proteus ortamı kontrol devresinin hassas simülasyonuna izin verirken, LabVIEW gerçek zamanlı veri görselleştirme, parametre ayarlama ve sistem geri bildirimi için kullanıcı dostu bir arayüz sağladı.

Sonuçlar, PID kontrolörünün minimum aşım ve ayar noktası değişikliklerine hızlı tepki süreleri ile sıcaklık stabilitesini etkili bir şekilde koruduğunu göstermiştir. Oransal (KP), integral (KI) ve türev (KD) kazançlarını gerçek zamanlı olarak ayarlama yeteneği, sistemin optimum şekilde ayarlanmasını sağlayarak istenen sıcaklığın korunmasında sorunsuz kontrol ve yüksek doğruluk sağladı.

Proteus ve LabVIEW arasında sanal COM portları aracılığıyla sağlanan iletişim verimli bir şekilde çalışarak sorunsuz veri alışverişi sağladı. Bu entegrasyon hem simülasyon hem de gerçek zamanlı kontrol için yazılım araçlarını kullanma potansiyelini göstermiş ve endüstriyel uygulamalardaki çeşitli sıcaklık kontrol süreçlerine uygulanabilir hale getirmiştir.

Bu çalışmanın gerçek zamanlı izleme ve kontrol sağlamadaki başarısı, hassas sıcaklık düzenlemesinin çok önemli olduğu eğitim amaçlı ve potansiyel endüstriyel uygulamalar için kullanışlı bir çözüm olmasını sağlamaktadır.

REFERANSLAR

- Asraf, H. Muhammad, K. A. Nur Dalila, A. W. Muhammad Hakim, and R. H. Muhammad Faizzuan Hon. 2017. "Development of Experimental Simulator via Arduino-Based PID Temperature Control System Using LabVIEW." *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering* 9(1–5):53–57.
- Gabriel, Posholi Fusi, and Zenghui Wang. 2022. "Design and Implementation of Home Automation System Using Arduino Uno and NodeMCU ESP8266 IoT Platform." Pp. 161–66 in *International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMechS*. Vols. 2022-December. IEEE.
- Ilten, Erdem. 2023. *Active Disturbance Rejection Control of a Coupled Tank System with Raspberry Pi Implementation*.
- Ilten, Erdem. 2024a. "Three-Phase Voltage and Current Meter and Data Scope Application for Android Device with Arduino." Pp. 31–44 in *Current Studies on Electrical-Electronics and Communication Engineering*. BIDGE Publications.
- Ilten, Erdem. 2024b. *Toxic Gas-Meter Application for Android Device with Arduino Nano 33 IoT*.
- Ilten, Erdem, and Metin Demirtas. 2023a. "Fuzzy Logic Position Control of DC Motor with Raspberry Pi and Real-Time Monitoring on Simulink External

- Mode.” in *1st Bilisel International World Science and Research Congress*.
- Ilten, Erdem, and Metin Demirtas. 2023b. *Liquid Level Control Interface Design on Simulink External Mode with Raspberry Pi*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023a. “Engelli Bireyler İçin Braille Yöntemine Yönelik Yardımcı Teknolojiler.” Pp. 15–28 in *Mühendislik Alanında Uluslararası Teori, Araştırma ve Derlemeler Cilt 2*. Serüven Publishing.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023b. “İşaret Dili İçin Akıllı Eldiven Tasarımları.” Pp. 85–101 in *Mühendislik Alanında Uluslararası Teori, Araştırma ve Derlemeler Cilt 1*. Serüven Publishing.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023c. “Raspberry Pi Based Braille Keyboard Design with Audio Output for the Visually Challenged.” Pp. 334–39 in *1st International Conference on Modern and Advanced Research*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023d. “Sign Language Voice Converter Design Using Raspberry Pi for Impaired Individuals.” Pp. 160–66 in *1st International Conference on Recent and Innovative Results in Engineering and Technology*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023e. “Smart Wheelchair Design for Elderly and Disabled People.” Pp. 574–80 in *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023f. “Su Kalitesi Akıllı Ölçüm Sistemleri.” Pp. 441–58 in *Mühendislikte Güncel Yaklaşımlar*. Duvar Yayınları.
- Küçükdermenci, Serhat. 2023g. “Yaşlı ve Engelli Bireylere Yönelik Akıllı Tekerlekli Sandalye Tasarımları.” Pp. 419–40 in *Mühendislikte Güncel Yaklaşımlar*. Duvar Yayınları.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024a. “AVR Mikrodenetleyicide Zamanlayıcıların CTC Modda Programlanması.” Pp. 288–303 in *Innovative Studies in Engineering*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024b. “AVR Mikrodenetleyicide Zamanlayıcıların Normal Modda Programlanması.” Pp. 305–22 in *Innovative Studies in Engineering*.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024c. “Design of A Cost-Effective Weather Station with Rain Forecast.” Pp. 909–16 in *2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024d. “Development of a Wireless Firefighting Robot with Obstacle Avoidance and Fire Extinguishing Modes.” Pp. 1135–41 in *3rd International Conference on Frontiers in Academic Research*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024e. “Multifunctional Smart Glove: An Innovative Solution for Sign Language Interpretation and Wireless Wheelchair Control.” Pp. 1142–49 in *3rd International Conference on Frontiers in Academic Research*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024f. “Raspberry Pi-Based Real-Time Parking Monitoring with Mobile App Integration.” Pp. 1458–64 in *5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*. All Sciences Academy.
- Küçükdermenci, Serhat. 2024g. “Wireless Foot Pressure Monitoring System for Gait Rehabilitation.” Pp. 1451–57 in *5th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*. All Sciences Academy.
- Ning, Juan, Jing Yi Shao, Ying Zhou, and Yang Yang Liu. 2018. “Research on Temperature Control Technology of Thermal Vacuum Test in Aerospace

- Field” edited by Y. Wang. *MATEC Web of Conferences* 232:04042. doi: 10.1051/mateconf/201823204042.
- Torres, Oscar G., Maria C. Plazas, Julian Pena, and Ian Rossi. 2022. “Development of Temperature Control Software with Ramp Programming Using LabVIEW and Arduino.” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 10(9):618–20. doi: 10.22214/ijraset.2022.46692.
- Vikhe, Pratap, Neelam Punjabi, and Chandrakant Kadu. 2014. “Real Time DC Motor Speed Control Using PID Controller in LabVIEW.” *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 03(09):12162–67. doi: 10.15662/ijareeie.2014.0309046.
- Wang, Hongyu, Xin Lu, and Jian Tian. 2013. “Precisie PID Temperature Control Based on LabVIEW.” *Applied Mechanics and Materials* 313–314:422–26. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.313-314.422.

Gıda Muhafazasında ve Güvenliğinde Laktik Asit Bakterilerinin Rolü

Zeynep KİLCİ¹
Nilay KORKMAZ²

- 1- Öğr. Gör.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Susurluk Tarım ve Orman MYO, znale@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1700-8597
- 2- Öğr. Gör.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Susurluk Tarım ve Orman MYO, nkorkmaz@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6436-6699

ÖZET

Laktik asit bakterileri (LAB) kullanılarak çeşitli gıda maddelerinin fermente edilmesi, en eski biyokoruma yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Bakteriyel antagonizm, özellikle farklı LAB suşlarının kullanımıyla ilgili olarak son yıllarda bilimsel anlamda daha fazla ilgi görmüştür. Bu bakterilerin antimikrobiyal etkileri, esasen ürettikleri metabolitlerle ilişkilidir. Bunun yanı sıra, bazı araştırmalar LAB'ın patojen mikroorganizmalar ve bunların toksik metabolitlerine karşı başka antimikrobiyal mekanizmalar da geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu özellikler, kimyasal ve fiziksel gıda koruma yöntemlerinin, LAB ve onların ürettiği metabolitlere dayanan biyolojik yöntemlerle değiştirilme olasılığını artırmaktadır.

Biyokoruma, temel olarak kontrollü mikroorganizmalar veya bu mikroorganizmalar tarafından üretilen metabolitlerin kullanılması yoluyla gıdalarda raf ömrünü uzatmayı ve gıda güvenliğini artırmayı hedefleyen bir yöntemdir. Bu biyolojik yöntem, kimyasal koruyucuların kullanımına alternatif olarak değerlendirilebilir, çünkü hem tüketici sağlığı açısından daha güvenli hem de doğal koruma sağlamaktadır. Laktik asit bakterileri, düşük pH seviyeleri oluşturarak ve zararlı mikroorganizmaların büyümesini engelleyerek gıdaların bozulmasını önlemede etkili bir rol oynar. Ayrıca, LAB suşları, biyofilm oluşumunu engelleyerek ve antimikrobiyal özelliklere sahip metabolitler üreterek gıda güvenliğine katkıda bulunmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, bu çalışmanın temel amacı, laktik asit bakterilerinin gıda kaynaklı patojenlere karşı antimikrobiyal etkilerini incelemek ve bu bakterilerin biyokoruma süreçlerinde kimyasal ve fiziksel koruma yöntemlerine biyolojik bir alternatif olarak kullanılma potansiyelini değerlendirmektir. Çalışma, laktik asit bakterilerinin gıda endüstrisinde sürdürülebilir ve güvenli bir koruma aracı olarak nasıl işlev görebileceğini araştırmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler – Laktik asit bakterileri, fermentasyon, laktik asit fermentasyonu

GİRİŞ

Modern gıda işleme, gıdanın üretim aşamasından tüketim aşamasına kadar kabul edilebilir bir kalite seviyesinde korunmasını sağlamak amacıyla çeşitli koruma teknolojilerine dayanmaktadır. Gıda koruma tekniği olarak fermentasyonun kökeni binlerce yıl öncesine dayanmaktadır (Adebo, 2020).

Gıda endüstrisi açısından büyük önem taşıyan fermentasyon teknolojisi gıda ürünlerinin korunmasını ve raf ömrünün uzatılmasını sağlarken aynı zamanda gıdalara istenen duyuşal özellikleri kazandırmaktadır. Ayrıca, ürünlerde probiyotik mikroorganizmaların varlığı ve besin değerlerinin artması sayesinde gıdaların sağlık açısından olumlu

etkilerini artırır. Buna ek olarak, mikrobiyal güvenliği artırma potansiyeline sahiptirler (Yu vd., 2021). Fermentasyon sürecinde fermentasyona katılan mikroorganizmaların metabolitleri sayesinde istenmeyen mikrofloranın gelişimi ve olumsuz bileşiklerin oluşumu engellenir. Bu oldukça arzu edilen bir olgudur çünkü gıdalara kimyasal koruyucu maddelerin eklenme ihtimalini azaltma olanağı sağlar (Śmiechowska, Jakubowski & Dmowski, 2018).

Gıda üretiminde kullanılan ve geçmişte çok eski tarihlere uzanan fermentasyon teknolojisi günümüzde gıda endüstrisinde kullanılan başlıca süreçler arasındadır. Ekmek, peynir, soya sosu, şarap, bira, sirke ve diğer birçok fermente ürün, insan beslenmesinde uygarlığın başlangıcından beri yer almaktadır. Geleneksel fermente gıdalar ve eski uygulamalarda sıklıkla fermentasyonun kendiliğinden ve halihazırda doğal florada bulunan mikroorganizmalar yardımıyla “spontan fermentasyon” şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Spontan fermentasyonun dezavantajları verimliliğin düşük olması ve stabil olmayan nihai ürün kalitesi olarak belirtilebilir. Günümüzde ise endüstriyel üretim koşullarında seçilmiş starter kültürler kullanılmaktadır. Diğer yandan yöresel ve el yapımı butik ürün üretimlerinde genellikle hala spontan fermentasyon öne çıkmaktadır (Leonard vd., 2021).

En eski gıda üretme ve işleme yöntemlerinden biri olan fermentasyon, mikroorganizmaların etkisiyle substratın yeni ürünlere/formlara bilinçli olarak dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Bu süreç, mikrobiyal faaliyetlerin neden olduğu enzimatik aktivite sayesinde moleküllerin boyutunun küçültülmesi ve yeni bileşiklerin üretilmesi ile besin değerlerinin, reolojik ve duyuşsal özelliklerin iyileştirilmesi ile ilişkilidir. LAB suşları, B kompleks vitaminleri gibi besin maddelerinin zenginleştirilmesine, dış polisakkaritler (EPS), lipidler ve proteinlerin sentezi sayesinde tat ve doku iyileştirilmesine ve antinutritif faktörlerin azalmasına katkıda bulunur (Adebo, 2020).

Konak canlı endojen proteaz üretiminde yetersizlik yaşıyorsa protein biyoyararlanımında sıkıntı yaşayabilir. Böylesi bir durumda laktik asit bakterilerinin enzimatik hidrolizi aminoasitlerin biyoyararlanımını artırarak konak canlıının beslenme durumuna katkı sağlayabilir. Fermentasyon sürecinde pH ve iyonik kuvvetlerin etkisiyle protein yapısında değişiklikler meydana gelebilir. Protein çözünürlüğünde artış yaşanması, fitatlar gibi antinutritif faktörlerin inaktivasyonu yaşanan değişikliklere örnek olarak verilebilir (Abd Elmoneim, Schiffler & Bernhardt 2005).

Karbonhidratlar, glikoliz yolları için gereken ana besin kaynağı olduklarından fermentasyon sürecinde miktarları azalır, ancak antinutritif faktörlerin azalması sayesinde nişastanın biyoyararlanımı ve sindirilebilirliği artar. Benzer şekilde, trigliseritlerin yağ asitlerine ve gliserole hidrolizi sağlayan lipolitik enzimlerin aktivitesindeki artış gibi biyokimyasal ve

fizyolojik değişikliklerle bağlantılı olarak, yağ miktarında da azalma gözlemlendiği belirtilmiştir (Simwaka vd., 2017).

Tüm taze fermente ürünler hemen tüketime uygun değildir çünkü belirli biyokimyasal değişimlerin gerçekleşmesi zaman almaktadır. Olgunlaşma süreci asetaldehit, diasetil gibi belirli aroma bileşiklerinin oluşumu sayesinde ürünlerin kararlılığına ve duyuşal kalitesinin gelişmesine katkı sağlar. Fermentasyon belirli bazı mikroorganizmaların yürütücü etkisi altında karbonhidratlar, proteinler ve yağların metabolize edilmesidir (Wu vd., 2021). Fermentasyon sürecinin belirli bir yönde ilerlemesi için belirli substratlar ve mikroorganizma suşları kullanılır. Seçilen substratlara ve mikrobiyal kültürle bağlı olarak, süreç laktik, alkollü, propiyonik, sitrik, bütirik, metanol, mannitol veya asetik fermentasyon formunu alabilir (Comasio vd., 2020).

Mikroorganizmalar ve onların metabolitleri kullanılarak gıdaların korunmasını biyolojik bir yöntem olarak tanımlayan biyokoruma, son yıllarda tüketicilerin kimyasal koruyucular konusuna temkinli yaklaşımı neticesinde büyük ilgi görmüştür (Gerez vd., 2009). Doğal koruma amacıyla kullanılan mikroorganizmalar kullanım güvenliği, toksik olmayan metabolitler üretme, depolama sırasında yüksek aktiviteyi sürdürme gibi bir dizi gereksinimi karşılamalıdır (Muhialdin, Saari & Meor Hussin, 2020). Laktik asit bakterileri (LAB), olumsuz mikrofloranın gelişimine karşı yüksek etki yetenekleri sayesinde biyokoruma süreçlerinde özel bir öneme sahiptir (Ayivi vd., 2020).

Tüm bu literatür taramasından yola çıkarak çalışmanın amacı laktik asit bakterilerinin gıda kaynaklı patojenlere karşı antimikrobiyal etkilerinin incelenerek, bu bakterilerin biyokoruma süreçlerinde kimyasal ve fiziksel koruma yöntemlerine biyolojik bir alternatif olarak kullanılma potansiyelinin değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir.

LAKTİK ASİT BAKTERİLERİ

Laktik fermentasyon fermente süt ürünlerinin üretimi için başvuruşan fermentasyon çeşididir (Muhialdin, Saari & Meor Hussin, 2020). Ayrıca sebze silajının ve ekşi hamurun oluşumu ile stabilizasyonundan, soğuk etlerin olgunlaşmasından da bu süreç sorumludur. Laktik fermentasyon süreçlerinde kullanılan baskın kültürler *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Weisella* ve *Bifidobacterium* cinslerine sınıflandırılan bakterilerdir (Ciani, Comitini & Mannazzu 2013).

Homofermentasyon seçili laktik asit bakterisi suşları tarafından disakkaritlerin neredeyse saf laktik aside metabolize edilmesi sürecidir. Heterofermentasyon ise biraz farklı bir süreç olup laktozun parçalanması sonucu laktik asidin yanı sıra etil alkol, karbondioksit, hidrojen peroksit, diasetil, asetoin ve asetaldehit gibi bileşiklerin oluştuğu bir süreçtir (Montet, Ray & Zakhia-Rozis 2014).

Süreç açısından bakıldığında, laktik fermentasyon en kolay yürütülen süreçlerden biridir. Süreç sırasında doğal pH'nın 4.0'ın altına düşmesi, laktik asit bakterilerinin düşük pH ortamına adapte olabilme yeteneği sayesinde biyokimyasal verimlilik üzerinde olumsuz bir etkiye sahip değildir (Wang vd., 2021).

Laktik asit bakterileri gram-pozitif, spor oluşturmeyen ve katalaz üretmeyen basiller ve koklardan oluşmaktadır. Göreceli veya zorunlu anaeroblar olarak sınıflandırılırlar ve ortamın asidik pH'ına tolerans gösterirler. 2020 yılında *Lactobacillus* ve *Leuconostoc* bakterilerinin yeni adlandırılması yapılmıştır. Bu değişikliğin amacı yüksek çeşitlilik nedeniyle doğru sınıflandırmayı gerektiren bakterilerin sistematize edilmesi olarak belirtilmiştir (Hurtado vd., 2012).

Laktik asit bakterileri gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca insan bağırsağının doğal mikroflorasını oluşturan bakteriler arasında da laktik asit bakterileri yer almaktadır (Fuchs vd., 2008). Biyokoruma bağlamında laktik asit bakterileri büyüme ve fermentasyon süreci sırasında antimikrobiyal etkide metabolitler ürettikleri için çok önemli bir rol oynar (Castellano vd., 2017).

BAKTERİYOSİNLER

Bakteriyosinler grubu antimikrobiyal özelliklere sahip, genellikle termostabil protein maddelerinden oluşur. Bakteriyosinlerin, hedef hücrelerin hücre zarlarında bulunan fosfat kalıntılarına bağlanarak gözenekler oluşturduğu ve bakteriyel hücre duvarlarını parçalayan otolizini aktive ettiği varsayılmaktadır (Papagianni & Anastasiadou, 2009). Bu maddeler, bakteriler ve bazı arkea üyeleri tarafından, benzer veya yakın akraba bakteri suşlarının büyümesini engellemek amacıyla üretilir. Bakteriyosinler, patojenik ve bozulmaya yol açan bakterilere karşı antimikrobiyal aktivite gösterir ve bu özellikleri biyoteknolojik potansiyellerini haklı kılar. Bakteriyosin kodlayan genler, plazmidler, kromozomlar ve diğer genetik organellerde operonlar içinde yer alır. Bakteriyosinlerin en önemli özelliklerinden biri diğer bakterilere, mantarlara, virüslere, parazitlere ve biyofilm gibi doğal yapılara karşı gösterdikleri aktivitedir (Hernández-González vd., 2021). Alvarez-Sieiro vd. (2016), laktik asit bakterileri tarafından üretilen bakteriyosinleri üç ana sınıfa dayalı olarak gruplandırmayı önermiştir. Sınıf I, lanthionin gibi alışılmadık amino asitlerden oluşan modifiye edilmiş, ısıya dayanıklı ve düşük moleküler ağırlıklı peptitleri içerir. Sınıf II, modifiye edilmemiş termostabil, düşük moleküler ağırlıklı bakteriyosinlerden oluşur. Son sınıf ise termolabil ve yüksek moleküler ağırlıklı maddelerin bulunduğu tek gruptur (Pérez-Ramos vd., 2021). Bu maddelerin aktivitesi üreten suşla ilişkili türler üzerinde bakterisit veya bakteriyostatik etkiler gibi farklı yönlerde olabilir. Çevresel faktörler, besin mevcudiyeti, bakteriyel hücre yoğunluğu, asetik asit ve

Sinyal peptitlerinin varlığı gibi unsurlar, bakteriyosin üretimini uyarır. Bakteriyosinlerin aktivite mekanizması birincil yapılarına dayanır. Bazı bakteriyosinler diğer bakterilerin sitoplazmasına girip gen ekspresyonlarını ve protein sentezini etkileyebilirken, bazıları sitoplazmik zar üzerinde etkili olabilir ve duyarlı mikroorganizmaların hayati bileşiklerini serbest bırakarak hücre lizisine katkıda bulunabilir (Hernández-González vd., 2021). Bakteriyosinlerin önemli bir avantajı fırsatçı ve patojen bakterilere, özellikle antibiyotik dirençli suşlara karşı aktivite göstermeleridir. Ayrıca, bazı bakteriyosinler antibiyotiklerle sinerji göstererek konsantrasyonu ve olumsuz yan etkileri azaltmaya katkıda bulunur. *Listeria monocytogenes* ve *Staphylococcus aureus*'a karşı sitrik asit ve nisin gibi diğer biyomoleküllerle olan sinerjik etkileri iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, bahsedilen bakterilerin bakteriyosinlere karşı direnç geliştirebileceği, ancak bu direncin geleneksel antibiyotiklere karşı gelişen dirençle kıyaslandığında minimal olduğu unutulmamalıdır (Soltani vd., 2021). Bakteriyosinler insan organizmasına toksik olmamaları, termal stabilite, protein yapıları ve Gram-pozitif mikroorganizmaların çoğuna karşı gösterdikleri antagonistik etkiler nedeniyle gıda endüstrisi için son derece cazip maddelerdir. Lantibiyotik nisin (E234) ve pediocin PA-1/Ac H, koruyucu ajanlar olarak gıda tedarik zincirinde ticari olarak kullanılmaktadır (Pérez-Ramos vd., 2021). Nisinin etki mekanizmasının şematik bir gösterimi Şekil 1'de sunulmuştur

Şekil 1: Nisinin etki mekanizmasının şematik bir gösterimi (Wiedemann vd., 2001)

Fermentasyonun asidik doğası fitazlar gibi enzimlerin aktivitesini artırarak polisakkaritler, proteinler ve yağların hidrolizi yoluyla hammaddenin modifiye edilmesine neden olur. Mikrobiyal enzimlerin artan

aktivitesi sayesinde, fitik asit ve tanenler gibi antinutritif bileşiklerin miktarı azalır. Bu bileşikler, demir, proteinler ve basit şekerler gibi minerallerin biyoyararlanımını olumsuz etkiler. Ayrıca, fermentasyon süreci ve spesifik mikroorganizmaların aktivitesi sayesinde üründeki vitamin miktarı da artar (Ligenza vd., 2021). Laktik asit fermentasyonu yolu ile üretilen bazı gıdalarda bulunan dominant ve yardımcı mikrofloraya ilişkin genel bir bilgilendirme Tablo 1’de sunulmuştur.

Laktik asit bakterilerinin sağlık açısından faydalı özellikleri, esas olarak besinlerin biyoyararlanımının artması, antioksidan aktivite, vitamin biyosentezi ve antinutritif bileşenlerin parçalanmasına dayanır. LAB’ın antioksidan aktivitesi, fenolik asitlerin dekarboksilasyonu ve redüktazlar ile hidrolazların etkisi yoluyla fenolik asitleri biyolojik olarak aktif formlara dönüştürme yetenekleri ile ilişkilidir. Bu yetenek bitkisel materyallerin fermentasyonu durumunda büyük önem taşır. Gıdaların besin değerini artırma bağlamında, laktik asit bakterileri vitamin içeriğini veya biyoyararlanımını artırabilir (Szutowska, 2020).

Tablo 1: Laktik asit fermentasyonu ile üretilen bazı gıdalar ve sahip oldukları mikroorganizma floraları

Fermente Gıda	Ana Bileşen(ler)	Baskın Mikroflora	Yardımcı Mikroflora
Yoğurt	Süt	<i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Lactobacillus bulgaricus</i>	-
Peynir	Süt	<i>Lactobacillus lactis</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Lactobacillus shermanii</i> , <i>Lactobacillus bulgaricus</i> , <i>Propionibacterium shermanii</i>	Küf (<i>Penicillium</i>)
Kimchi	Lahana, turp, tuz	<i>Lactobacillus</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Pediococcus</i> , <i>Weissella</i>	Maya
Şarap	Üzüm	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Maya
Ekmek	Buğday, çavdar	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Maya
Ekşi Maya	Un, su	<i>Lactobacillus</i> , <i>Weissella</i>	Maya
Soya sosu	Soya fasulyesi	<i>Aspergillus oryzae/soyae</i> , <i>lactobacilli</i> and <i>Zygosaccharomyces rouxii</i>	Maya, küf, LAB
Salatalık Turşusu	Salatalık, sarımsak, tuz	<i>Enterobacter</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Leuconostoc mesenteries</i>	<i>Geotrichum candidum</i>
Sauerkraut	Lahana, tuz	<i>Leuconostoc mesenteroides</i> , <i>Lactococcus lactis</i> , <i>Lactobacillus pentoaceticus</i>	-

Çok sayıda araştırmacı laktik asit bakterilerinin C vitamini içeriği üzerindeki etkisini test etmeyi amaçlayan deneyler yapmıştır. Kazimierczak

vd. (2014), kendiliğinden fermente edilmiş pancar suyunun fermentasyona tabi tutulmamış pancar suyuna kıyasla daha yüksek C vitamini içeriğiyle karakterize edildiğini belirlemiştir. Fermentasyon sırasında C vitamini içeriğinin azalmasını gösteren çalışmalar, fermentasyon süresi ile fermentatif mikrofloranın askorbik oksidaz aktivitesinin artabileceği gerçeği ile açıklanabilir. Sharma vd. (2021), doğal olarak fermente edilen Hint içeceği Kanji'de fermentasyon sürecinde C vitamini içeriğinin arttığını ve sonraki 40 günlük depolama süresince sabit kaldığını, ancak bu sürenin ardından içeriğin kademeli olarak azaldığını belirtmiştir.

Laktik asit bakterileri ve Bifidobakteriler, bazı diyet bileşenlerini B grubu vitaminlere ve K vitaminine dönüştürme kapasitesine sahiptir; bu vitamin grubu insan organizmasının normal işlevi için önemlidir. B grubu vitaminlerin biyosentezi bağlamında *Lactobacillus reuteri* özel dikkat gerektiren bir türdür (Ligenza vd., 2021). K vitamini kan pıhtılaşma proteinlerinin üretimindeki rolü nedeniyle yine önemli bir vitamindir (Morishita vd., 1999). K vitamini, iki ana formda bulunan yağda çözünen bir kimyasal bileşiktir: K1 (filokinon) bitkilerde ve K2 (menakinonlar (MK)) hayvanlar ve bakterilerde bulunur. K vitamini alımının ana kaynağı sebzelerdir (%80-90 diyet alımı), ancak emilim oranı yaklaşık %5-10'dur. Karşılaştırıldığında süt ürünlerinden K vitamini (MK) emiliminin neredeyse %100'e ulaşabildiği görülmektedir (Popa, Bigman & Rusu 2021). Morishita vd. (1999) tarafından yapılan çalışma laktik asit bakterilerinin anlamlı miktarda K vitamini üretme yeteneğini doğrulamakta ve seçilen suşların fermente gıda veya diyet takviyeleri üretimi için starter kültür olarak kullanım olasılığını önermektedir.

Oksidatif hasar, kanser, siroz, enflamatuar hastalıklar ve ateroskleroz gibi birçok hastalıkla ilişkilidir. Laktik asit bakterilerinin antioksidan ve antikanserojen potansiyeli, kanser hastalıklarını önleme olasılıkları nedeniyle önemli bir araştırma konusudur. Shehata vd. (2019) yüksek antioksidan aktivite ile bakteriyel lizatların antikanserojen özellikleri arasında ilişki olduğunu belirtmiştir. Çalışmada test edilen iki suşun (*Streptococcus thermophilus* BLM 58 ve *Pediococcus acidilactici* ATTC 8042) en güçlü antioksidan etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Çeşitli çalışmalar LAB'ın yüksek antikanserojen aktivitesini göstermektedir. Pourramezan vd. (2020), geleneksel ayran örneklerinden izole edilen bazı *Lactobacillus* suşlarının antikanserojen, antioksidan ve apoptotik özelliklerini araştırmıştır. Test edilen *Lactobacillus* AG12a suşu in vitro olarak yüksek antikanserojen ve antioksidan aktivite göstermiştir. Ancak bu bulguların doğrulanabilmesi için çalışmaların in vivo olarak test edilmesi gerekmektedir. Vamanu vd. (2006), günlük diyet probiyotiklerin dahil edilmesinin, kanserojen bileşiklerin inaktivasyonu, bağışıklık sisteminin uyarılması ve sindirim sistemindeki prokanserojenlerin kanserojenlere dönüşümünü destekleyen enzimlerin aktivitesinin azaltılması yoluyla kolon kanserinin gelişme olasılığını azaltabileceğini önermektedir.

Bütün bu niteliklere ek olarak bazı laktik asit bakteri suşları probiyotik özellikler sergilemektedir. Probiyotikler belirli bir dozda verildiklerinde konak organizma üzerinde olumlu bir etki yaratan canlı organizmalardır. Probiyotik mikroorganizmaların beklenen sağlık faydalarını gösterebilmeleri için gastrointestinal sistemin zorlu koşullarına (düşük pH, mide asidi varlığı) karşı direnç göstermeleri, bağırsak epitelinde yüksek adezyon ve tam virülans eksikliği ile karakterize edilmesi önemlidir. Probiyotik özellikler, bir türe veya cins yerine belirli bir suşa atfedilmelidir. Probiyotik bakteriler, kan kolesterol seviyelerinin azaltılmasında ve metabolizmasında olumlu etki gösterir ve konak organizmada kolonize olarak kansere karşı koruma ve bağışıklık sisteminin uyarılmasına katkıda bulunabilir (Dunne vd., 2001). Probiyotikler ayrıca, patojenik mikroorganizmaların bağırsak epiteline yapışmasını engelleyerek, bakteriyosin veya organik asitler gibi antibakteriyel maddeler sentezleyerek gastrolojik sorunlarda önemli bir rol oynayabilir. Ayrıca, vitamin biyosentezinde yer alırlar ve ürettikleri metabolitler gastrointestinal sistemin homeostazını düzenler (Zommiti, Feuille & Connil, 2020).

GIDA KAYNAKLI PATOJENLERE KARŞI LAKTİK ASİT BAKTERİLERİNİN KULLANIMI

Gıda üretiminde ortaya çıkan ve kontamine ürünlerin tüketimiyle ilişkili çeşitli hastalıklara yol açan gıda kaynaklı patojenler, gıda endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Bilim insanları, gıda muhafazasında yenilikçi ve güvenli yöntemler arayışını sürdürmekte olup, laktik asit fermentasyonu gibi laktik asit bakterilerinin kullanıldığı yöntemler, insan sağlığı açısından güvenli bir koruma yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Birçok araştırmacı tarafından laktik asit bakterilerinin *Salmonella* spp, *Listeria monocytogenes* ve *Escherichia coli* gelişimini engellediğini gösteren çalışma sunmuştur (Daliri, Aboagye & Daliri 2020).

Büyüme ve fermentasyon süreçleri boyunca laktik asit bakterileri antimikrobiyal etkilere sahip bir dizi metabolit üretir ve bu etkiler, hücre zarının destabilizasyonu, hücre duvarı enzimlerinin sentezinin inhibisyonu, proton gradyanlarına müdahale ve reaktif oksijen türlerinin oluşumunu indükleyerek hücrede oksidatif stresi artırmaya dayanır. Bilimsel raporların çoğu, patojenik mikroflora karşı etkinin esas olarak, LAB tarafından üretilen laktik asidin pH'ı düşürmesi yoluyla gelişimlerini zorlaştıran koşulların oluşmasından kaynaklandığını belirtmektedir. Fermentasyon sonucunda oluşan diğer organik asitler örneğin asetik asit ve propiyonik asit, bakteri, maya ve iplikli mantarların gelişimine karşı antagonistik etki gösterir; ancak bu asitlerin sentezlenen miktarları genellikle çok fazla değildir (Matsubara vd., 2016). LAB tarafından üretilen organik asitler nedeniyle gerçekleşen pH düşüşü, düşük pH'a dayanıklı olmayan *Salmonella* spp. bakterilerinin gelişimini durdurur; bu bakterilerin optimal gelişim

aralığı 4.0-9.0 pH aralığında kalır (Daliri, Aboagye & Daliri 2020). Choi vd. (2018), doğal olarak fermente edilmiş kimchiden izole edilen laktik asit bakterilerinin *Salmonella enteritidis* gibi patojenik suşlara karşı antagonistik aktivitesini incelemiştir. Çalışma kullanılan suşların patojenlerin gelişimini inhibe ettiğini göstermiş, ancak bu etki bakteriyosin, hidrojen peroksit veya yağ asitlerinin aktivitesine bağlanmamıştır. Patojenik mikroorganizmaların miktarını azaltan temel bileşiğin laktik asit olduğu ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar, laktik asidin istenmeyen mikroflorayı baskılamada dominant faktör olduğunu belirleyen diğer çalışmalarla da doğrulanmıştır. Stanojevic-Nikolic vd. (2016), laktik asidin patojenlerin gelişimi üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Laktik asidin miktarı arttıkça patojenik mikrofloranın gelişimini baskılamadaki etkinliğinin arttığı gösterilmiştir.

Bakteriyosinler de mikroorganizmaların gelişiminin baskılanmasına katkıda bulunmaktadır. Yapılan bir araştırmada *Lactobacillus bulgaricus* ve *Streptococcus pyogenes* suşları tarafından sentezlenen nisinin *Bacillus subtilis* gibi patojenlere karşı etkinliği değerlendirilmiştir. Nisin, Gram-negatif bakterilere karşı daha belirgin bir etki göstermiştir ve bu durum, bu bakterilerin hücresel zar yapısı ile ilişkilendirilmiştir (Mangalanayaki & Bala 2015). Scatassa vd (2017), *Lactocaseibacillus rhamnosus* (*Lactobacillus rhamnosus*), *Lactococcus lactis* ve *Enterococcus faecium* karışımı kullanılarak yapılan peynir üretiminin, bakteriyosin benzeri maddelerin salgılanması yoluyla *Listeria monocytogenes* gelişimini inhibe edebileceğini göstermiştir. Bir diğer çalışmada, Wang vd. (2019) laktik asit bakterileri tarafından üretilen metabolitlerin süt tozundan izole edilen *Bacillus licheniformis* gelişimi üzerindeki inhibe edici etkisini gözlemlenmiştir. Bu deney, kontrol edilen pH koşulları altında *Lactiplantibacillus plantarum* (*Lactobacillus plantarum*)'un hücre büyümesi ve *B. licheniformis* tarafından biyofilm üretimini inhibe edici etki gösterdiğini ortaya koymuştur. *L. plantarum*'un biyofilm oluşumunu inhibe etmedeki etkinliği cam ve çelik gibi yüzeylerde doğrulanmıştır. Bu çalışma, süt ürünleri endüstrisi için özellikle önemlidir çünkü bakteri biyofilmlerini ortadan kaldırmak için etkili yöntemler aranmaktadır. *Salmonella* bakterileri, cam, kauçuk ve metalik yüzeylere yapışma ve biyofilm oluşturma kapasitesine sahiptir. Biyofilmler, gıdaların bozulmasına katkıda bulunur ve üretim tesislerinde temizlik ve dezenfeksiyona direnç gösterdiği için kritik bir nokta oluşturur. Biyofilmler, metal, plastik, ahşap, cam ve paslanmaz çelik dahil her türlü yüzeyde oluşabilir. Todhanakasem ve Ketbunrung (2020) *Salmonella enterica* ssp. *enterica*, *B. cereus* ve *E. coli* bakterilerinin biyofilm oluşumunu kontrol etmek için LAB'ın uygulanma etkinliğini değerlendirdiği çalışmada fermente gıdalardan izole edilen LAB'ın, bakteri patojen hücrelerinin çoğalmasını engellediği ortaya çıkarılmıştır.

SONUÇ

Biyokoruma, genellikle ürün kalitesi ve bazı durumlarda sağlık açısından olumsuz kabul edilen kimyasal ve fiziksel gıda koruma yöntemlerine biyolojik bir alternatif sağlayabilir. Laktik asit bakterileri ve onların metabolitlerine dayanan biyokoruma, gıda güvenliğinde artış sağlamakla birlikte besin değerini vitaminler, organik asitler ve diğer bileşikler üreterek artırma yetenekleriyle, insan sağlığı açısından başka faydalarla da ilişkilendirilebilir. Laktik asit bakterileri bakteriler ve funguslar için anti yaşamsal aktivite göstermektedir. Bu amaca ulaşmak için pH, sıcaklık, gıda matrisleri ve çeşitli engelleyici maddelerin varlığı gibi çevresel faktörlerin bazı laktik asit bakterisi suşlarının hayatta kalması ve aktiviteleri üzerindeki etkisinin anlaşılması gerekmektedir.

REFERANSLAR

- Abd Elmoneim, O. E., Schiffler, B., & Bernhardt, R. (2005). Effect of fermentation on the functional properties of sorghum flour. *Food Chemistry*, 92(1), 1-5.
- Adebo, O. A. (2020). African sorghum-based fermented foods: past, current and future prospects. *Nutrients*, 12(4), 1111.
- Alvarez-Sieiro, P., Montalbán-López, M., Mu, D., & Kuipers, O. P. (2016). Bacteriocins of lactic acid bacteria: extending the family. *Applied microbiology and biotechnology*, 100, 2939-2951.
- Ayivi, R. D., Gyawali, R., Krastanov, A., Aljaloud, S. O., Worku, M., Tahergorabi, R., ... & Ibrahim, S. A. (2020). Lactic acid bacteria: Food safety and human health applications. *Dairy*, 1(3), 202-232.
- Castellano, P., Pérez Ibarreche, M., Blanco Massani, M., Fontana, C., & Vignolo, G. M. (2017). Strategies for pathogen biocontrol using lactic acid bacteria and their metabolites: A focus on meat ecosystems and industrial environments. *Microorganisms*, 5(3), 38.
- Choi, H. S., Kim, J. H., Kim, S. L., Deng, H. Y., Lee, D., Kim, C. S., ... & Lee, D. S. (2018). Catechol derived from aronia juice through lactic acid bacteria fermentation inhibits breast cancer stem cell formation via modulation Stat3/IL-6 signaling pathway. *Molecular Carcinogenesis*, 57(11), 1467-1479.
- Ciani, M., Comitini, F., & Mannazzu, I. (2013). Fermentation. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier Science Limited: Oxford Fulfillment Center, PO Box 800, Kidlington Oxford OX5 1DX United Kingdom: 011 44 1865 843000, 011 44 1865 843699.
- Comasio, A., Van Kerrebroeck, S., Harth, H., Verté, F., & De Vuyst, L. (2020). Potential of bacteria from alternative fermented foods as starter cultures for the production of wheat sourdoughs. *Microorganisms*, 8(10), 1534.
- Daliri, F., Aboagye, A. A., & Daliri, E. B. M. (2020). Inactivation of foodborne pathogens by lactic acid bacteria. *Journal of Food Hygiene and Safety*, 35(5), 419-429.
- Dunne, C., O'Mahony, L., Murphy, L., Thornton, G., Morrissey, D., O'Halloran, S., ... & Collins, J. K. (2001). In vitro selection criteria for probiotic bacteria of

- human origin: correlation with in vivo findings. *The American journal of clinical nutrition*, 73(2), 386s-392s.
- Fuchs, S., Sontag, G., Stidl, R., Ehrlich, V., Kundi, M., & Knasmüller, S. (2008). Detoxification of patulin and ochratoxin A, two abundant mycotoxins, by lactic acid bacteria. *Food and chemical toxicology*, 46(4), 1398-1407.
- Gerez, C. L., Torino, M. I., Rollán, G., & de Valdez, G. F. (2009). Prevention of bread mould spoilage by using lactic acid bacteria with antifungal properties. *Food control*, 20(2), 144-148.
- Hernández-González, J. C., Martínez-Tapia, A., Lazcano-Hernández, G., García-Pérez, B. E., & Castrejón-Jiménez, N. S. (2021). Bacteriocins from lactic acid bacteria. A powerful alternative as antimicrobials, probiotics, and immunomodulators in veterinary medicine. *Animals*, 11(4), 979.
- Hurtado, A., Reguant, C., Bordons, A., & Rozès, N. (2012). Lactic acid bacteria from fermented table olives. *Food microbiology*, 31(1), 1-8.
- Kazimierczak, R., Hallmann, E., Lipowski, J., Dreła, N., Kowalik, A., Püssa, T., ... & Rembiałkowska, E. (2014). Beetroot (*Beta vulgaris* L.) and naturally fermented beetroot juices from organic and conventional production: metabolomics, antioxidant levels and anticancer activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(13), 2618-2629.
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., Adhikari, B., & Fang, Z. (2021). Fermentation transforms the phenolic profiles and bioactivities of plant-based foods. *Biotechnology Advances*, 49, 107763.
- Ligenza, A., Jakubczyk, K. P., Kochman, J., & Janda, K. (2021). Potencjał prozdrowotny i skład mikrobiologiczny fermentowanego napoju tepache. *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, 27(3), 272-276.
- Mangalanayaki, R., & Bala, A. (2015). Bacteriocin production using lactic acid bacteria. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 3(2), 413-416.
- Matsubara, V. H., Wang, Y., Bandara, H. M. H. N., Mayer, M. P. A., & Samaranyake, L. P. (2016). Probiotic lactobacilli inhibit early stages of *Candida albicans* biofilm development by reducing their growth, cell adhesion, and filamentation. *Applied microbiology and biotechnology*, 100, 6415-6426.
- Montet, D., Ray, R. C., & Zakhia-Rozis, N. (2014). Lactic acid fermentation of vegetables and fruits. *Microorganisms and fermentation of traditional foods*, 108-140.
- Morishita, T., Tamura, N., Makino, T., & Kudo, S. (1999). Production of menaquinones by lactic acid bacteria. *Journal of Dairy Science*, 82(9), 1897-1903.
- Muhialdin, B. J., Saari, N., & Meor Hussin, A. S. (2020). Review on the biological detoxification of mycotoxins using lactic acid bacteria to enhance the sustainability of foods supply. *Molecules*, 25(11), 2655.
- Papagianni, M., & Anastasiadou, S. (2009). Pediocins: The bacteriocins of *Pediococci*. Sources, production, properties and applications. *Microbial cell factories*, 8, 1-16.
- Pérez-Ramos, A., Madi-Moussa, D., Coucheney, F., & Drider, D. (2021). Current knowledge of the mode of action and immunity mechanisms of LAB-bacteriocins. *Microorganisms*, 9(10), 2107.

- Popa, D. S., Bigman, G., & Rusu, M. E. (2021). The role of vitamin K in humans: implication in aging and age-associated diseases. *Antioxidants*, 10(4), 566.
- Pourramezan, Z., Oloomi, M., & Kasra-Kermanshahi, R. (2020). Antioxidant and anticancer activities of *Lactobacillus hilgardii* strain AG12a. *International Journal of Preventive Medicine*, 11(1), 132.
- Scatassa, M. L., Gaglio, R., Cardamone, C., Macaluso, G., Arcuri, L., Todaro, M., & Mancuso, I. (2017). Anti-*Listeria* activity of lactic acid bacteria in two traditional Sicilian cheeses. *Italian Journal of Food Safety*, 6(1).
- Sharma, C., Sahota, P. P., & Kaur, S. (2021). Physicochemical and microbiological evaluation of antioxidant-rich traditional black carrot beverage: Kanji. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1), 143.
- Shehata, M. G., Abu-Serie, M. M., El-Aziz, N. M. A., & El-Sohaimy, S. A. (2019). In vitro assessment of antioxidant, antimicrobial and anticancer properties of lactic acid bacteria. [International Journal of Pharmacology](#), 2019, Vol. 15, No. 6, 651-663.
- Simwaka, J. E., Chamba, M. V. M., Huiming, Z., Masamba, K. G., & Luo, Y. (2017). Effect of fermentation on physicochemical and antinutritional factors of complementary foods from millet, sorghum, pumpkin and amaranth seed flours. *International Food Research Journal*, 24(5), 1869-1879.
- Śmiechowska, M., Jakubowski, M., & Dmowski, P. (2018). Nowe trendy na rynku niskoalkoholowych napojów fermentowanych. *Kosmos*, 67(3), 575-582.
- Soltani, S., Hammami, R., Cotter, P. D., Rebuffat, S., Said, L. B., Gaudreau, H., ... & Fliss, I. (2021). Bacteriocins as a new generation of antimicrobials: toxicity aspects and regulations. *FEMS microbiology reviews*, 45(1).
- Stanojević-Nikolić, S., Dimić, G., Mojović, L., Pejin, J., Djukić-Vuković, A., & Kocić-Tanackov, S. (2016). Antimicrobial activity of lactic acid against pathogen and spoilage microorganisms. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(5), 990-998.
- Szutowska, J. (2020). Functional properties of lactic acid bacteria in fermented fruit and vegetable juices: A systematic literature review. *European Food Research and Technology*, 246(3), 357-372.
- Tatsaporn, T., & Kornkanok, K. (2020). Using potential lactic acid bacteria biofilms and their compounds to control biofilms of foodborne pathogens. *Biotechnology Reports*, 26, e00477.
- Vamanu, A., Vamanu, E., Drugulescu, M., Popa, O., & Câmpeanu, G. (2006). Identification of a lactic bacterium strain used for obtaining a pollen-based probiotic product. *Turkish Journal of Biology*, 30(2), 75-80.
- Wang, Q., Yang, L., Feng, K., Li, H., Deng, Z., & Liu, J. (2021). Promote lactic acid production from food waste fermentation using biogas slurry recirculation. *Bioresource Technology*, 337, 125393.
- Wiedemann, I., Breukink, E., Van Kraaij, C., Kuipers, O. P., Bierbaum, G., De Kruijff, B., & Sahl, H. G. (2001). Specific binding of nisin to the peptidoglycan precursor lipid II combines pore formation and inhibition of cell wall biosynthesis for potent antibiotic activity. *Journal of Biological Chemistry*, 276(3), 1772-1779.
- Wu, Q., Zhu, Y., Fang, C., Wijffels, R. H., & Xu, Y. (2021). Can we control microbiota in spontaneous food fermentation?—Chinese liquor as a case example. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 321-331.

- Yu, Z., Su, Y., Zhang, Y., Zhu, P., Mei, Z., Zhou, X., & Yu, H. (2021). Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: A review. *Food Chemistry*, 357, 129805.
- Zommiti, M., Feuilloy, M. G., & Connil, N. (2020). Update of probiotics in human world: a nonstop source of benefactions till the end of time. *Microorganisms*, 8(12), 1907.

Doğal Klinoptilolit Mineralinin Mikroskopik Görüntülerine Göre ve Zenginleştirilebilirliğine Yönelik Bulguların Belirlenmesi

Öykü BİLGİN¹

1- Assoc. Prof. Dr.; Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü.
ykbilgin@yahoo.com ORCID No: 0000-0002-1276-5751

ÖZET

Bu çalışmada kullanılan zeolit numuneleri; Türkiye'nin Manisa ili Gördes ilçesinde faaliyet gösteren farklı zeolit ocaklarından alınmıştır ve mikroskobik analizlere tabi tutulmuştur. Zeolit numunelerinin belirlenen görüntülerine dayanarak içeriğindeki kirlenmeler ve mineraller tespit edilmiş ve incelemeler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin % 85'inde klinoptilolit-höylandit içerikli doğal zeolit hammaddesini temsil ettiği X-Ray ve kimyasal analiz deney sonuçlarında saptanmıştır. Manisa/Gördes zeolit mineralleri yüksek mineral saflığına ve yüksek katyon değişim kapasitesine sahiptir. Analizler sonucunda zeolit mineralleri içerisinde biotit, kuvars, demiroksit, muskovit, klorit, feldspat, zeolit dışı silikatlar ve metamorfik kayaç kırıntılarına rastlanmıştır. Yüksek mineral saflığındaki bu zeolit minerallerinin cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemlerine göre yapısındaki emprütelerin uzaklaştırılması için gerekli önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Zeolit, Mikroskop, Zenginleştirme, Gördes

GİRİŞ

Doğal zeolit minerallerinden ticari olarak kullanılan en bilinenleri arasında klinoptilolit, höylandit ve şabazit bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanım alanı bulan klinoptilolit minerali silikatlar sınıfında $(Na,K)_6(Al_6Si_{30}O_{72}) \cdot 20H_2O$ kimyasal formülünde, monoklinik kristal sisteminde, özgül ağırlığı 2.2, sertliği 3.5-4 olan, beyaz, renksiz, sarı, pembe, kırmızı renklerde, camsı, saydam yapıdadır. Asit etkisine ve ısıya karşı dayanıklıdır. Kristal boşlukları % 39 civarındadır. Kanal şeklinde boşlukları olduğundan su, yağ ve gazları emme kapasitesine sahiptir. Türkiye'de yaklaşık olarak 50 milyar ton zeolit rezervi olduğu tahmin edilmektedir (DPT, 2001).

Manisa-Gördes'te üretilen zeolit, ısıya karşı dayanıklı, potasyum, kalsiyum içerikli klinoptilolit minerali olup, $1,98-2,18 \text{ g/cm}^3$ arasında özgül ağırlığa sahip, yığın yoğunluğu tane iriliğine göre $0,693-1,22 \text{ g/cm}^3$ arasındadır. Özgül yüzey alanları yaklaşık $41 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dir. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $90 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklar arasında gözenek suyunu, $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $320 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklar arasında bağlı suyunu, $360 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $770 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kristal suyunu kaybetmektedir ve yapısı yaklaşık $839 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bozulmaya başlamaktadır. Termal olarak dayanım sıcaklığı $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar sürmektedir. Gördes klinoptilolitlerinin su emme

kapasiteleri yaklaşık %15 ile %30 arasındadır. İnsan sağlığına zararlı olan, ağır metalleri adsorbe edebilme yeteğine sahiptir. Örneğin adsorbsiyon çalışmalarına göre; 1 g. zeolit 0,310 mg vanadyum ve 2,841 mg. cıva adsorbe edebilmektedir (Özyayın, S., 2005).

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada incelenen numuneler Manisa-Gördes’ te üretim faaliyetlerini sürdüren farklı zeolit işletmelerinden alınmış ve N1, N2, N3 ve N4 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 1’de Manisa/Gördes yer bulduru ve Tablo 2’ de zeolit/klinoptilolit numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları sunulmuştur.



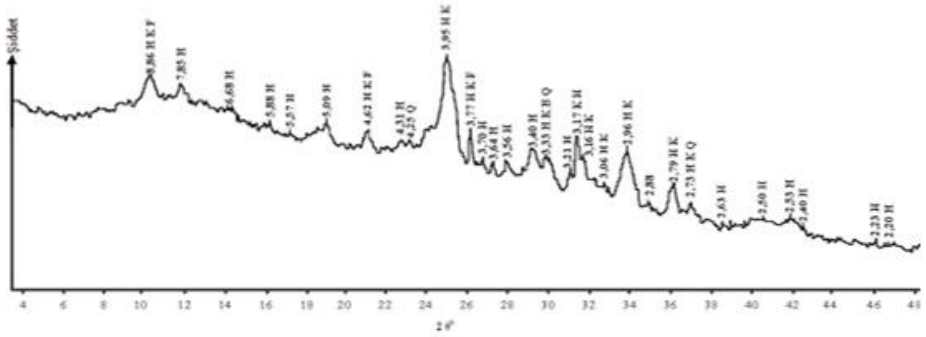
Şekil 1 Manisa-Gördes yer bulduru(URL 1)

Tablo 1: Zeolit/Klinoptilolit numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları

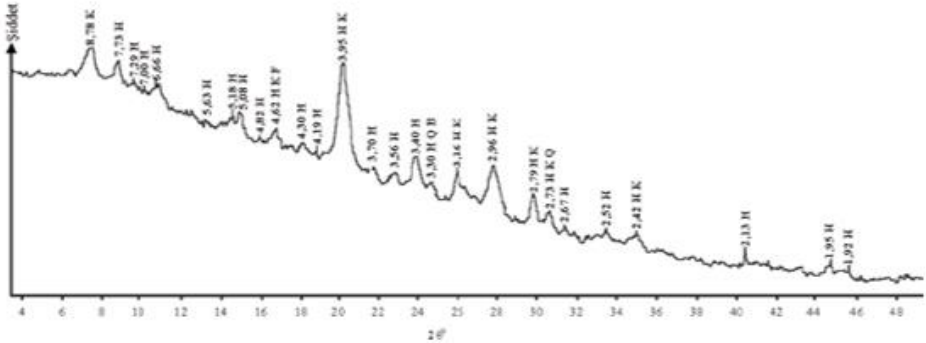
Numune	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Kızdırma
Adı	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Kayıbı (%)
N1	73,11	10,49	1,41	1,61	0,82	0,63	1,15	10,52
N2	72,97	9,92	1,76	1,59	0,88	0,46	2,62	9,54
N3	74,26	8,78	0,92	2,62	0,69	0,22	1,90	10,36

Tablo 1' klinoptilolit kimyasal analiz sonuçlarına göre; SiO₂ oranları %72,97 ile %77,42 arasında değişirken, diğer elementler de yaklaşık oranlarda tespit edilmiştir.

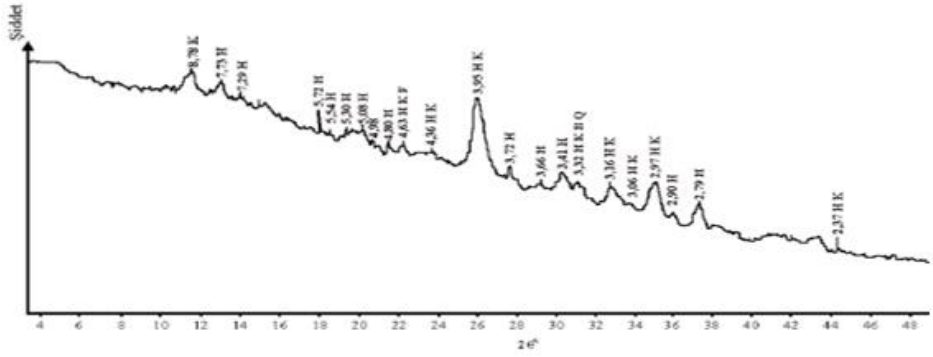
Klinoptilolit numunelerinin X-ray difraktometre sonuçlarına göre numunelerin tümü hemen hemen aynı özelliklere sahip olup, Klinoptilolit/Hoylantit yapısında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılarında biotit, feldspat ve kuvars mineralleri de az miktarda bulunmaktadır.



Şekil 2 N1 numunesinin difraktometre sonucu
(K: Klinoptilolit, H: Heulandite, Q: Kuvars, B: Biotit, F: Feldspat)



Şekil 3 N2 numunesinin difraktometre sonucu
(K: Klinoptilolit, H: Heulandite, Q: Kuvars, B: Biotit, F: Feldspat)

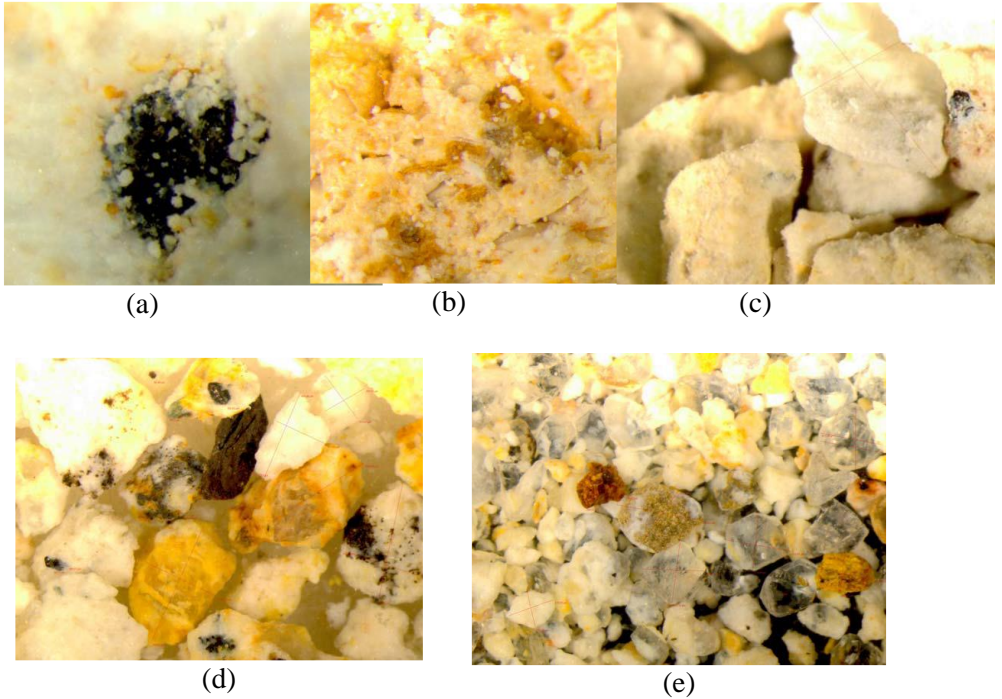


Şekil 4 N3 numunesinin difraktometre sonucu
(K: Klinoptilolit, H: Heulandite, Q: Kuvars, B: Biotit, F: Feldspat)

Zeolit/Klinoptilolit numuneleri Olympus (SZx16) tipi binoküler mikroskop kullanılarak, incelemeye tabi tutulmuş, ve sonuçlar sunulmuştur.

N1 numunesi mikroskobik inceleme sonuçları

Şekil 5' te N1 numunesinin mikroskobik görüntüleri verilmektedir.

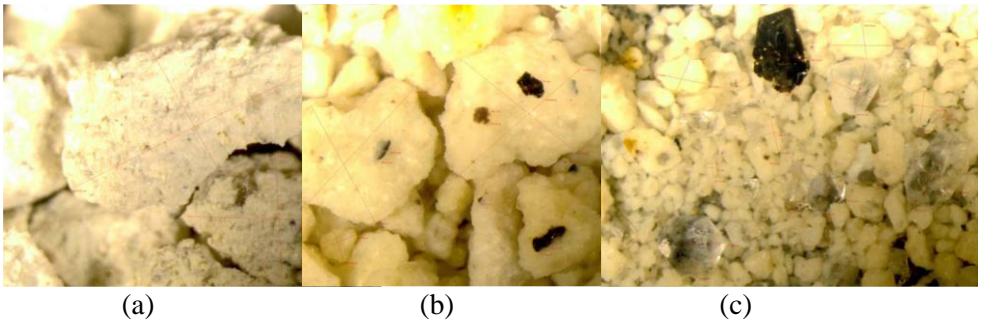


Şekil 5 N1 numunesinin mikroskobik görüntüleri

Şekil 5(a)' da zeolit parça numunesinde; ana zemin beyaz temiz zeolit/klinoptilolitten oluşmaktadır ve kısmi olarak mika(biotit) ve demiroksit kirlenmeleri bulunmaktadır. Şekil 5(b)'de zeolit parçası içerisinde yaklaşık 959,99 μm -589,74 μm tane boyutlarında demiroksit introvizyonları yer almıştır. Kullanım alanına göre; demir içeriğinin istenmiyor ise, bu boyutların altında yıkama veya asit ile temizleme yöntemleri uygulanabilir. Şekil 5(c) 'de yaklaşık olarak 0,99x1,52 mm boyutlarındaki zeolit numunesinin mikroskop altında yer alan görüntüsü temiz zeolit % 95' tir (2,5x). Ancak 200 μm tane iriliğinde biotit/mika taneleri kenetli halde görüntülenmektedir. Şekil 5(d)'de tane boyutu 1x1,5 mm boyut altında kırılmış numune bate yapıp incelendiğinde serbest zeolitler yanında ağırlıksal olarak yaklaşık %20 oranı demiroksit (sarımtırak, kırmızımtırak) ile kısmi olarak serbest veya noktasal olarak kenetli biotit tanelerine rastlanmıştır. Bu durum zeolit mineralinin kısmen kirlendiğini ortaya koymaktadır. Endüstrinin kullanım talebine göre; bu tip zeolitten daha üstün kaliteli bir ürün isteniyor ise 1 mm veya 0,5 mm tane boyutu altına selektif kırılarak, yoğunluğa göre zenginleştirme yöntemleri kullanılarak daha temiz ürün elde edilebilir. Yapılan zenginleştirme yöntemi sonucunda ortaya çıkan artıklar ve orta ürünler de tüketim alanlarına göre örneğin toprak verimliliğinde kullanılabilir.

N2 numunesi mikroskobik inceleme sonuçları

Şekil 6' da N2 numunesinin mikroskobik görüntüleri verilmektedir.

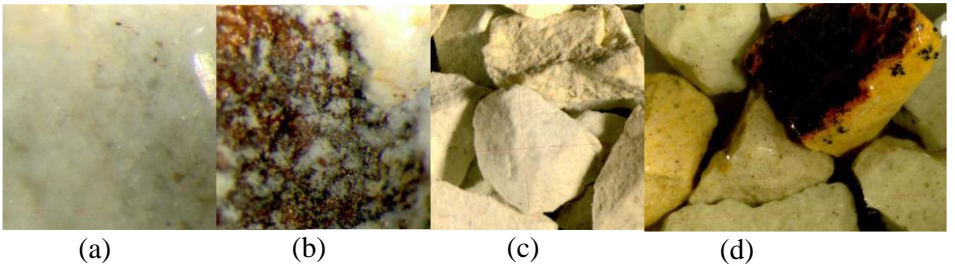


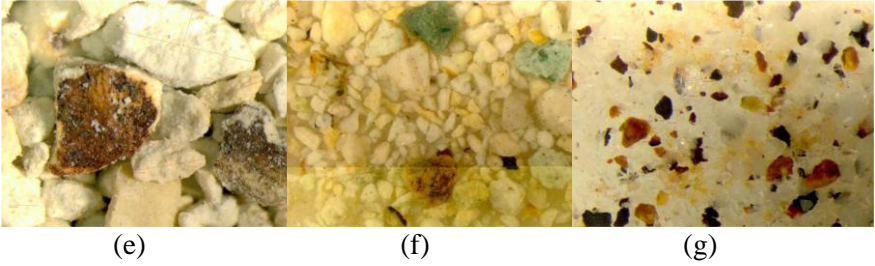
Şekil 6 N2 numunesinin mikroskobik görüntüleri

Şekil 6(a)'da N2 numunesi 8,2x4 mm tane boyutları altında temiz zeolit taneleri ile noktacıklar halinde kuvars ve biotit mineralleri ile kenetli halde görüntülenmektedir. Şekil 6(b)'de iri tanede kısmi olarak kenetli tanecikler yer almaktadır. 5,9x1,1 mm tane boyutunda zeolit minerali içerisinde 1,1x0,7 mm iriliğinde ve daha ince tane boyutlarında biotit taneleri kenetli halde görülmektedir. Bu biotit tanelerinin kenetlenme kalınlığı 115 µm, uzunlukları 880 µm tane iriliğine kadar değişmektedir. Diğer taraftan numunenin 1 mm altında veya 500 µ'un altında öğütüldüğü düşünülürse önemli miktarda serbest tanelerin elde edilebileceği ve yoğunluğa göre yaş veya kuru yöntemlerle, gerektiğinde manyetik seperasyon kombinasyonu da kullanılarak bir zenginleştirme yapılması ile daha kaliteli zeolitlerin elde edilmesi mümkündür. Şekil 6(c) incelendiğinde; 1 mm tane boyutunun altında temiz ve daha serbest zeolit tanelerinin elde edilebildiği ve şeffaf kristal yapıdaki kuvars tanelerinin serbestleştiği görülmektedir. Yine bu durumda kuru ve yaş yöntemler kullanılarak yoğunluğa göre bir zenginleştirme yöntemi veya gerekiyorsa yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı kullanılarak daha temiz ve kaliteli ürün elde etmek mümkün olacaktır. Bununla beraber yan ürün olarak temiz ve şeffaf kuvars taneleri de kazanılabilir. Bu kuvarsların daha sonra seramik ve cam kullanımında değerlendirilmesi mümkündür.

N3 numunesi mikroskobik inceleme sonuçları

Şekil 7' da N3 numunesinin mikroskobik görüntüleri verilmektedir.





Şekil 7 N3 numunesinin mikroskopik görüntüleri

Şekil 7(a)'da ana zeolit kayacı mikro boyutlarda kompakt olarak temiz zeolitten oluşmuş ve içeriğinde 223 μm uzunluğunda, 90 μm eninde muskovit, mika ve 24x44 μm 'den 20 μ tane boyutuna kadar biotit (siyah, kahverengi) taneleri görülmüştür. Şekil 7(b)'de zeolitin çatlak zonlarında demiroksit introvizyonları (girişim) ve sıvımalı yüzey kirliliği gözlenmiştir. Bu sebeple kaba bir kırma ile ardından silindirik değirmen kullanılarak, aşındırma yıkama veya kuru havalı ortamda uzaklaştırma yöntemleri kullanılarak temizlemek mümkün olacaktır. İç yapısındaki kirlenmeler, empürite(demiroksit/mika) çok düşük miktarlardadır. Şekil 7(c)' de 9 mm tane boyutlarındaki cevherde içsel ve yüzeysel kirlenmeler vardır. Yüzeysel kirlenmeler; yaş veya kuru ortamlarda aşındırma yöntemleri kullanılarak temizlenebilir. Talebe göre tüketim alanı düşünüldüğünde daha ince tane boyutlarında öğütme işlemleri yapılarak yoğunluğa göre, manyetik ayırmaya göre veya flotasyon yöntemleri kullanılarak çok daha kaliteli zeolit elde etmek mümkündür. Şekil 7(d)' de 10mm altına kırılmış cevher içsel olarak nokta halinde kirlenmelere sahiptir. Noktasal kirlenmeler 100 μ tane boyutu altına kadar devam etmektedir. Yüzeysel kirlenmeleri 500 μ tane boyutunda aşındırma yapılması ile daha temiz cevher elde edilebilecektir. Şekil 7(e)' de zeolit yüzeyinde 3,5 mm uzunluğunda, 1,8 mm eninde halen yüzeysel kirlenmeler yer almaktadır. Yüzeysel bir temizlenme gerekirse, daha ince boyutlarda yapılmalıdır. Şekil 7(f)' de numunenin 3,5x1,8 mm boyutunda bate ile incelendiğinde; ağır mineral kirleticiler gözlenmiştir. Bu da cevherin gerekirse daha ince boyutlarda selektif olarak kırılıp yoğunluğa göre kuru/yaş olarak zenginleştirilip, ağırlıksal % 10-15'lik bölümünün atılıp, daha kaliteli ürün elde edileceği tespit edilmiştir. Zenginleştirmeden çıkan atıklar ve diğer orta ürün (ara ürün) sektörün başka alanlarında gerekli görülürse kullanılabilir. Şekil 7(g)' de numunenin ezmeli bate ile serbest

hale gelen kirletici ağır mineral taneleri ve (demiroksitler, zeolit dışındaki silikatlar) kenetli olan diğer taneler ortaya çıkmıştır. Bu da 500-600 µ tane boyutunda veya 1 mm tane boyutunun altına öğütüldüğünde yoğunluğa göre zenginleştirme yöntemleri uygulanarak bu kirletici minerallerin uzaklaştırılması mümkün olacaktır(Bilgin, 2009).

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki mikroskobik incelemelerde değerleri katkılarından dolayı Prof. Dr. Ali AKAR Hocama çok teşekkür eder, sonsuz şükranlarımı sunarım.

SONUÇ

Mikroskobik inceleme sonuçlarına göre; birincil zeolit mineralleri, ikincil kil mineralleri, üçüncül olarak iri tane boyutlarında kuvars, orta tane boyutlarında biotit ve demir oksitler yer almaktadır. Çok daha ince tane boyutlarında örneğin 500µ tane boyutunun altında kuvars yüzeyi serbestleşir ve biotit mineralleri yüzeyi terk ederler. % 99 oranında zeolit minerali saflığı istenirse eser miktarlardaki hematit, demir ve biotit taneleri manyetik ayırma ile zenginleştirilebilir. Bu çalışma sonucunda, Manisa Gördes zeolit/klinoptilolit mineralinin yapısal özelliği mikroskobik incelemeler yapılarak belirlenmiştir. Buna göre; içeriğinde yer alan istenmeyen kirletici gang minerallerini uzaklaştırılmak ve daha kaliteli temiz bir zeolit eldesi cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemleri kullanılarak sağlanabilir. Zeolit üretiminde cevherin oluşumuna göre, selektif (seçimli) madencilik yöntemlerinin uygulanması da düşünülmelidir. Madencilik sırasında çevresel kaynaklı kirliliklerden uzak olan gerekli toz tutma perdeleri gibi üretim önlemler ve yöntemlerle yapılmalıdır.

REFERANSLAR

- Bilgin, Ö. (2009). Gördes Zeolitlerinin Hammaddesel Özelliklerinin İncelenmesi ve Değişik Sektörlerde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir (2009), 174 pp.
- DPT, (2001). Sekizinci Beş yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu, Zeolit Raporu, Ankara.
- Özaydın, S. (2005). Doğal Klinoptilolitlerin Türkiye’deki kullanım olanakları ve Gördes klinoptilolitlerinin ısı özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Ana Bilim dalı. Doktora tezi. İzmir.
- URL 1. https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Manisa_districts.png

Akışkan Taşıyan Elastik Boruların Çırpınma Hızı Analizi

Birkan DURAK^{1*}

Erol UZAL²

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Uçak Teknolojisi Programı, birkand@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-8196-5407

2 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, euza1@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0008-1376

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Birkan DURAK , birkand@iuc.edu.tr

(Bu çalışma Birkan DURAK'ın "Akışkan Taşıyan Elastik Boruların Titreşim Analizi" adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.)

ÖZET

Akışkanlar borularla bir yerden başka bir yere taşınırlar. Bu sırada boruda farklı sebeplerle çeşitli titreşimler meydana gelir. Eğer boru genliği giderek artan bir titreşim hareketine maruz kalırsa üzerinde çatlaklar, kalıcı şekil değişiklikleri, kırılmalar veya bağlantı noktalarında ayrılmalar görülebilir. Boru titreşiminin incelenmesi insan sağlığının korunmasının yanı sıra mühendislikte sistemlerin çalışma ömrünün artması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi için gerekli bir konudur. Bu nedenle bu konu çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır.

Boru titreşimi incelenirken çeşitli yüzey kabuk teorilerinden yararlanılarak hareket denklemi oluşturur ve çoğu zaman sayısal yöntemlerle çözülür. İncelenen problemdeki sınır şartlarının değişmesi hesaplamaların yenilenmesini gerekir.

Bu çalışmada iki ucundan basit mesnetlenmiş bir borunun akış kaynaklı titreşim hareketi göz önüne alınmıştır. Uzunluğu L olan bu boru içerisinde U hızına sahip olan akışkan kesintisiz olarak geçmektedir. İncelemede akış sırasında meydana gelebilecek dalgalanmalar ihmal edilmiş ve ortalama akış dikkate alınmıştır.

Borunun hareketini tanımlayan diferansiyel denklemdeki yer değiştirme fonksiyonu zamana ve konuma bağlı olarak verilmiştir. Bu fonksiyonda yer alan ω (özdeğer) eğer bir reel sayı ise boru belirli bir genlikle titreşir. ω karmaşık bir sayı ve sanal kısmı pozitifse boru zamanla sönümlenen, eğer negatifse genliği aratan bir titreşim hareketi yapar. Bu son durumda artan genlik boruya zarar verir. Bu yüzden özdeğerin sanal kısmı incelenerek boru için emniyetli bir akış hızı tanımlanabilir. Bu çırpınma (flutter) hızı olarak adlandırılır. Boru flutter hızının altındaki hızlardaki akışkanları taşıyorken zarar görmez. Elde edilen grafikler, tanımlanan boyutsal olmayan katsayılar α ve β 'nin artmasıyla çırpınma hızının arttığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Akış kaynaklı titreşim, Çırpınma hızı, Elastik boru, Özdeğer, Titreşim

GİRİŞ

Akışkanlar çeşitli özelliklere sahip borularla bir yerden başka bir yere taşınırlar. Bu sırada çeşitli sebeplerle farklı türde titreşimler meydana gelir. Eğer genliği giderek artan bir titreşim hareketine boru maruz kalırsa üzerinde çatlaklar veya kalıcı şekil değişimleri oluşur. Bu olumsuz durumun devamında kırılmalar veya boru bağlantı noktalarında ayrılmalar görülebilir. İçme suyu borularında meydana gelecek titreşim kaynaklı bir çatlak veya kırık suyun kalitesinde bir düşüşe sebep olur. Çatlaklardan olan boru içine zararlı sıvı veya madde geçişleri toplum sağlığını olumsuz yönde etkileyecektir.

Yanıcı, parlayıcı maddelerin taşındığı boru hatlarında titreşim kaynaklı oluşacak sorunlar çevre kirliliğine, taşınan akışkan kaybına, işletmeler için bakım, onarım maliyetlerinin artmasına, iş gücü ve zaman kaybına sebep olur. Boru titreşiminin incelenmesi insan sağlığının korunmasının yanı sıra mühendislikte sistemlerin çalışma ömrünün artması ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi için gerekli bir konudur. Bu yüzden farklı araştırmacılarca bu konu incelenmiştir.

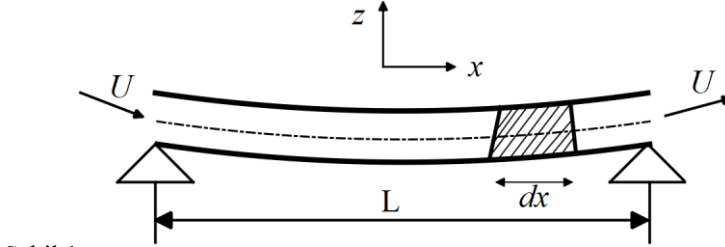
Kabukların deformasyon durumlarını incelemek için Donell tarafından Yüzey kabuk teorisi önerilmiştir. Bu teoriden yararlanan (Von Karman ve Tsein, 1941) Silindirik kabukların deformasyonları incelenmiştir. Bu çalışmadaki kabuklar eksenel yüklemelere maruz kalmaktadır. Uygun Ortogonal Ayrıklaştırma (POD) metoduyla zaman serisi cevabını çıkaran ve sistem davranışını inceleyen (Amabili ve ark., 2006) Donell'in kabuk teorisinden ve Galerkin yönteminden yararlanmıştır. (Kana ve Craig, 1968) yapmış oldukları deneylerle Yüzey kabuk teorisi ve Galerkin yönteminin uygunluğunu göstermişlerdir. Nonlineer titreşen ve içerisinde kısmi sıvı bulunan boru titreşimi (Shkenev, 1964) tarafından incelenmiştir. İçi boş veya az miktarda sıvı bulunduran boruların yüksek genlikli titreşim deneyleriyle ilgili (Abrahanson ve Kana, 1966)'nın literatür taraması vardır. (Chu ve Kana, 1967)'ya göre zayıf nonlineer özellikli boruların titreşiminin Lineer Kabuk teorisine incelenmesi uygundur. Hidrodinamik basınç ve akışkan hızından etkilenen boruların titreşimi (Gorman, 2000) ve diğ. tarafından araştırılmıştır. (Mısra, 2001) ve diğ. sabitlenmiş olan sıvı taşıyan bir borunun titreşimlerini incelerken dalga yayılımı metodu ve Fourier dönüşümü yaklaşımının sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Lineer bir hidroelastik çözüm metodu sunan (Uğurlu ve Ergin, 2007) çalışmada akışkan taşıyan veya eksenel akıma daldırılmış elastik yapıların dinamik analizini yapmışlardır. (Durak, 2008) 'ın boru titreşimi üzerine çalışması mevcuttur.

Boru titreşimlerini inceleyen araştırmacılar çeşitli yüzey kabuk teorilerinden yararlanarak oluşturdukları hareket denklemlerini çoğu zaman sayısal yöntemlerle çözerler. Bu işlemler sırasında bazı kabullerin yapılması denklemlerin sadeleşmesine ve hesap kolaylığına sebep olur. Bazı araştırmacılarca deneylerin sonuçları kullanılan kabuk teorisinin sonuçlarıyla karşılaştırılır. İncelenen borudaki başlangıç veya sınır şartlarının değişmesi hesaplamaların yenilenmesini gerektirmektedir.

BORUNUN HAREKET DENKLEMİNİN ÇIKARILMASI

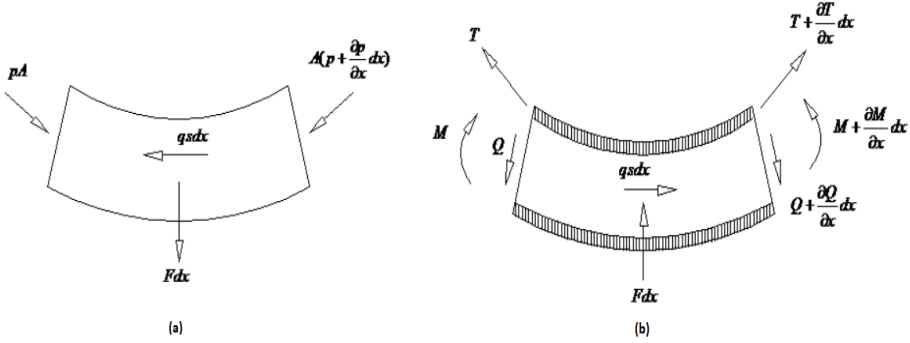
Çalışmada iki ucundan basit mesnetlenmiş bir boru göz önüne alınmıştır. Şekil 1 de görülen ve uzunluğu L olan bu boru içerisinde U hızına sahip olan akışkan kesintisiz olarak geçmektedir. İncelemede akış sırasında meydana gelebilecek dalgalanmalar ihmal edilmiş ve ortalama akış dikkate alınmıştır. Hareket denkleminin kurulması için Şekil 1 de görülen boru

üzerinde çok küçük olan dx elemanının üzerine meydana kuvvetler incelenmelidir.



Şekil 1: Basit mesnetli akışkan taşıyan borunun şematik gösterimi

Bu boru elemanının ve içerisindeki sıvı kütlesinin üzerine meydana gelen kuvvetler momentler Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2: Sıvı ve boru elemanları için serbest cisim diyagramı

Şekil 2 de birim uzunluk başına düşen kuvvet F iken q ise birim uzunluk başına düşen kayma gerilmesidir. Boru elemanına sırasıyla T eksenel çekme kuvveti, Q kesme kuvveti ve M eğilme momenti etki etmektedir. Boru içerisinde sabit U hızıyla geçmekte olan akışkan elemanın x yönündeki ivme ve z yönündeki hızı için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + U \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

Boru hareket halindeyken yatay koordinatı değişirken dikey koordinatının zamanla değişmediği varsayılmıştır. Bu durum borudaki

çökmeleri değişmeyen bu dikey koordinata göre inceleme kolaylığı sağlar. Buna göre boru simetri ekseninin $t = 0$ anındaki x eksenine olan uzaklığı yani z yönündeki enine çökme miktarı $w(x, t)$ dir. Ayrıca z yönündeki ivme denklemi ise

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 w \quad (3)$$

olacaktır. Böylece Şekil 3a ile verilen akışkan elemanın x ve z yönündeki hareket denklemleri (4) ve (5) deki gibidir.

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} - qs = \rho A \frac{\partial U}{\partial t} \quad (4)$$

$$F = -\rho A \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 w \quad (5)$$

Bu iki denklemdeki A akışın gerçekleştiği akış alanını, p akışkan basıncını, s akışkanın geçtiği kısmın çevresini ve ρ akışkan yoğunluğunu göstermektedir. Borunun birim boyunun kütlesi m olmak üzere boru elemanın hareket denklemleri (6) ve (7) deki gibi olacaktır.

$$\frac{\partial T}{\partial x} + qs = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + F = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (7)$$

Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre basit eğilme halinde kesme kuvveti için

$$Q = -\frac{\partial M}{\partial x} = -EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad (8)$$

ifadesi yazılabilir. Denklem (8) de E boru elastisite modülü iken I ise boru et kalınlığının ikinci alan momentidir. Bu denklem (7) de yerine yazılır ve F yalnız bırakılırsa

$$F = -EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (9)$$

denkleminde ulaşılır. Bu denklem (5) te yerine yazılarak oluşan son denklem düzenlenirse

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho A \left[\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2U \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + U^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (10)$$

Denklemin boyutsuzlaştırılması ve çözümü

Denklem (10) in sınır şartları sırasıyla (11.a) ve (11.b) ile verilir. Bu sınır şartları borunun her iki ucunda çökme ve dönmenin sıfır olduğunu belirtir.

$$x=0 \quad \text{için} \quad w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (11.a)$$

$$x=L \quad \text{için} \quad w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (11.b)$$

şeklindedir. Denklem (12) ile verilen boyutsuzlaştırma parametreleri kullanılırsa

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad t^* = \frac{t}{\sqrt{\frac{\rho A}{E}}}, \quad u^* = \frac{U}{L} \sqrt{\frac{\rho A}{E}} \quad (12)$$

Gerekli düzenlemenin ardından denklem

$$\frac{I}{L^4} \frac{\partial^4 w}{\partial x^{*4}} + \frac{m + \rho A}{\rho A} \frac{\partial^2 w}{\partial t^{*2}} + 2u \frac{\partial^2 w}{\partial x^* \partial t^*} + u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^{*2}} = 0 \quad (13)$$

haline gelir. $\alpha = \frac{I}{L^4}$ ve $\beta = \frac{m + \rho A}{\rho A}$ olmak üzere, terimlerdeki yıldızlar atılırsa

$$\alpha \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \beta \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2u \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (14)$$

olarak bulunur. (14) denkleminin konuma ve zamana bağlı denklem (15) ile verilen

$$w(x,t) = W(x)e^{i\omega t} \quad (15)$$

formunda bir çözümü olsun çökmenin sıfır olmadığı yani $W(x) \neq 0$ olacak şekilde bulunan ω ifadesi verilen diferansiyel denklemin özdeğeridir. (15) denklemi (14) denklemine ve (11.a), (11.b) ile verilen sınır şartları yazılırsa

$$\begin{aligned} \alpha W'''' + u^2 W'' + 2iu\omega W' - \omega^2 \beta W &= 0 \\ x=0 \quad \text{da} \quad W &= \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \\ x=1 \quad \text{de} \quad W &= \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

denklemi bulunur. Bu denklemin karakteristik denklemi

$$\alpha p^4 + u^2 p^2 + 2iu\omega p - \omega^2 \beta = 0 \quad (17)$$

olarak yazılır. Çözümü ise

$$W(x) = C_1 e^{p_1 x} + C_2 e^{p_2 x} + C_3 e^{p_3 x} + C_4 e^{p_4 x} \quad (18)$$

şeklinde. Bu verilen genel çözümü sınır şartları uygulanırsa denklemin özel çözümü elde edilir.

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 + C_3 + C_4 &= 0 \\ C_1 p_1^2 + C_2 p_2^2 + C_3 p_3^2 + C_4 p_4^2 &= 0 \\ C_1 e^{p_1} + C_2 e^{p_2} + C_3 e^{p_3} + C_4 e^{p_4} &= 0 \\ C_1 p_1^2 e^{p_1} + C_2 p_2^2 e^{p_2} + C_3 p_3^2 e^{p_3} + C_4 p_4^2 e^{p_4} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Denklem (19) ile verilen homojen denklem sisteminin matris formu

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ p_1^2 & p_2^2 & p_3^2 & p_4^2 \\ e^{p_1} & e^{p_2} & e^{p_3} & e^{p_4} \\ p_1^2 e^{p_1} & p_2^2 e^{p_2} & p_3^2 e^{p_3} & p_4^2 e^{p_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

olarak yazılabilir. Denklem (20) de $C_1, C_2, C_3, C_4 \neq 0$ şeklinde keyfî katsayıların varlığı için denklemin katsayılar matrisinin determinanı sıfır olmalıdır.

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ p_1^2 & p_2^2 & p_3^2 & p_4^2 \\ e^{p_1} & e^{p_2} & e^{p_3} & e^{p_4} \\ p_1^2 \cdot e^{p_1} & p_2^2 \cdot e^{p_2} & p_3^2 \cdot e^{p_3} & p_4^2 \cdot e^{p_4} \end{vmatrix} = 0 \quad (21)$$

Denklem (17) deki α, β ve u' ya değerler verilerek p_1, p_2, p_3 ve p_4 kökleri ω 'nın fonksiyonu olarak bulunur. ω 'ya çeşitli karmaşık sayı değerleri verilerek (21) ile verilen determinantın sıfır olup olmadığına bakılır. Bu determinantın sıfır olmasını sağlayan ω değeri problemin öz değeridir. Boyutsuz u hızı değiştirilerek bu işlem adımları tekrarlanır. Özdeğerin sanal kısmının (+) işareten (-) 'ye geçtiği hız Çırpınma (Flutter) hızı olarak adlandırılır.

Borunun hareketini tanımlayan diferansiyel denklemdeki yer değiştirme fonksiyonu zamana ve konuma bağlı olarak $w(x, t) = W(x)e^{i\omega t}$ şeklindedir. Bu fonksiyonda eğer ω bir reel sayı ise boru belirli bir genlikle titreşecektir. ω karmaşık bir sayı olursa sanal kısmı pozitif olursa boru zamanla sönümlenen, ama sanal kısım negatif bir sayı olması durumundaysa zamanla titreşim genliği aratan bir hareket yapar. Bu son durumda boruda aratan genlik yüzünden çatlak, kırılma vb. durumlar oluşur. Bu yüzden borunun akışkan taşıırken ω ile gösterilen özdeğerin sanal kısmı incelenerek emniyetli bir akış hızı tanımlanabilir. Boru flutter hızının altındaki hızlardaki akışkanları taşıyorken emniyetlidir.

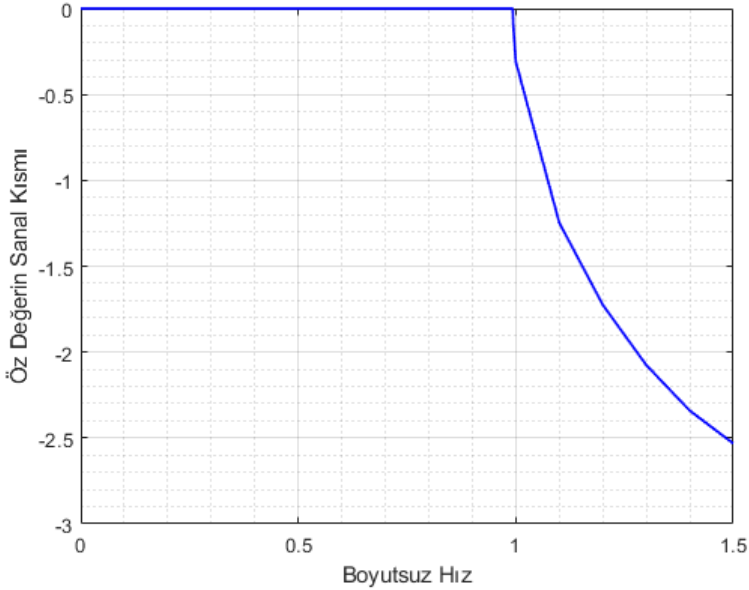
BULGULAR

$\alpha = 0.1$ ve $\beta = 1.1$ iken boyutsuz hız u' 'nın farklı değerleri için titreşim hareketinin özdeğerleri hesaplanmıştır. Tablo 1 de bu hesaplamaların sonuçları verilmiştir.

Tablo 1: Boyutsuz hızın farklı değerleri için özdeğerler

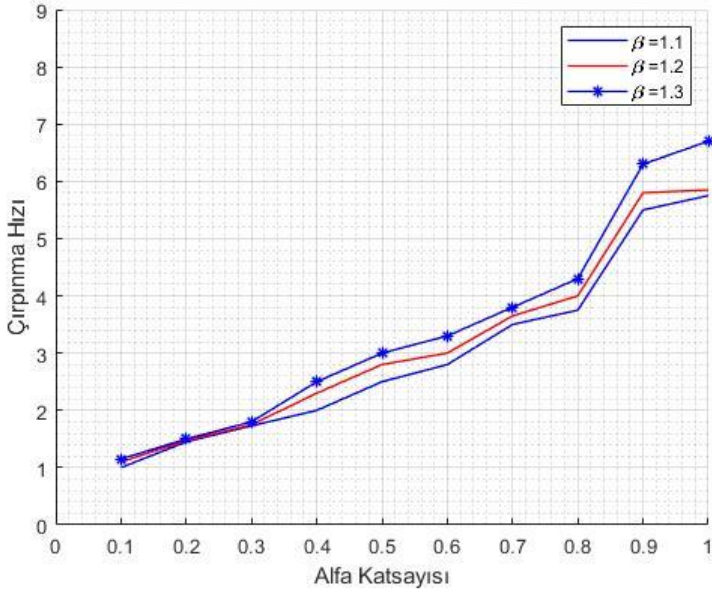
$\alpha = 0.1$ ve $\beta = 1.1$	u	ω
	0.1	2.9757
	0.2	2,9858
	0.3	2.9044
	0.4	2.8139
	0.5	2.6845
	0.6	2,5130
	0.7	2,2936
	0.8	2,0160
	0.9	1,6589
	1.0	1,1634
	1.1	-0,30902i
	1.2	-1,2471i
	1.3	-1,7250i
	1.4	-2,0757i
	1.5	-2,3411i

Hız ile özdeğerin sanal kısmının değişimi Şekil 3 ile verilmiştir. Çarpınma hızına kadar özdeğerin sanal kısmı sıfırdır ve bu hızdan sonra negatif olmaktadır. Grafikten anlaşılacağı gibi boyutsuz çarpınma hızı 1 dir.

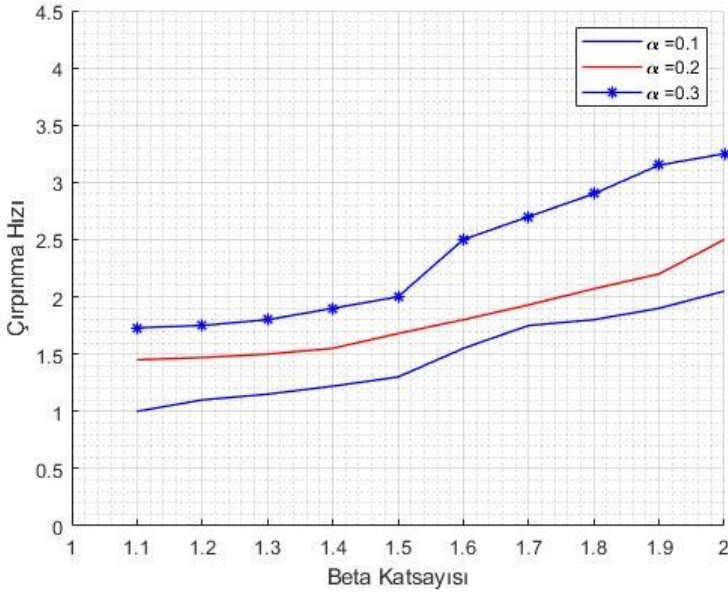


Şekil 3: Boyut hız ile özdeğerin sanal kısmının değişimi

Denklem (17) α ve β katsayıları değiştirilerek ve denklem (21) ile verilen determinanttı faydalanarak çırpınma hızları hesaplanmış Şekil 4 ve Şekil 5 te verilmiştir.



Şekil 4: Alfa katsayısı ile çırpınma hızının değişimi



Şekil 5: Beta katsayısı ile çırpınma hızının değişimi

Mod Biçimleri (Mode Shape) Çizimi

$\alpha = \beta = 1$ için borunun serbest titreşiminde ($u = 0$ durumu) her bir modu için alacağı şekiller çizilmek istenirse öncelikle (22) ile verilen karakteristik denklemin kökleri bulunur .

$$p^4 - \omega^2 = 0 \quad (22)$$

Bu denklemin dört kökü

$$p_1 = +\sqrt{\omega} \quad p_2 = \sqrt{\omega} \quad p_3 = +i\sqrt{\omega} \quad p_4 = -i\sqrt{\omega} \quad (23)$$

olmaktadır. Denklem (18) de yazılmış olan çökme denklemine bu kökler yerleştirilir ve (16) denkleminde verilen sınır şartları uygulanırsa denklem (21) ile verilmiş olan katsayılar matrisinin determinantı

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{\omega} & -\sqrt{\omega} & i\sqrt{\omega} & -i\sqrt{\omega} \\ \omega.e^{\sqrt{\omega}} & \omega.e^{-\sqrt{\omega}} & -\omega.e^{i\sqrt{\omega}} & -\omega.e^{-i\sqrt{\omega}} \\ \omega.\sqrt{\omega}.e^{\sqrt{\omega}} & -\omega.\sqrt{\omega}.e^{-\sqrt{\omega}} & -i.\omega.\sqrt{\omega}.e^{i\sqrt{\omega}} & i.\omega.\sqrt{\omega}.e^{-i\sqrt{\omega}} \end{vmatrix} = 0 \quad (24)$$

olur. Bu determinantın değeri ise

$$2.i.\sin(\sqrt{\omega})[1 + e^{2\sqrt{\omega}}] = 0 \quad (25)$$

şeklinde bulunur. $n \in N$ için bu denklemin kökleri olan ω özdeğerleri için $\omega = n^2\pi^2$ ifadesi geçerlidir. Buna göre pozitif olan ilk üç özdeğeri ise $\pi^2, 4\pi^2$ ve $9\pi^2$ dir. $\omega = \pi^2$ olmak üzere karakterisitik denklemin kökleri

$$p_1 = \pi \quad , \quad p_2 = -\pi \quad , \quad p_3 = i\pi \quad , \quad p_4 = -i\pi \quad (26)$$

olarak bulunacaktır. $C_1 = 1$ kabul ederek diğer keyfi sabitler bulunabilir. (19) denklemine göre aşağıdaki denklem takımı bulunacaktır. Bilinmeyen

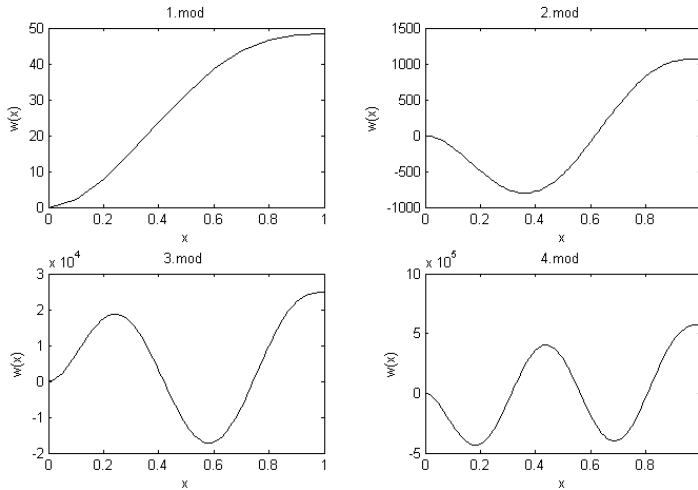
katasayılar üç tane olduğundan denklem sistemindeki son denklem göz önüne alınmamıştır.

$$\begin{aligned}
 C_2 + C_3 + C_4 &= -1 \\
 -3,1416C_2 + 3,1416C_3 - 3,1416C_4 &= -3,1416 \\
 0,4264C_2 + 9,8696C_3 + 9,8696C_4 &= -228,3896
 \end{aligned} \tag{27}$$

Çözüm yapılır ise keyfi sabitler sırasıyla $C_2 = -25.2308$, $C_3 = 12.1154 + 13.1154i$ ve $C_4 = 12.1154 + 13.1154i$ olarak bulunur. Elastik borunun farklı titreşim frekansları altında alacağı şekli denklem (18) deki fonksiyon tanımlayacaktır. Bulunan karakteristik denklem kökleri ve keyfi sabitlere göre bu fonksiyon aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 W(x) = e^{3.1416x} - 25.2308e^{-3.1416x} + (12.1154 + 13.1154i)e^{3.1416ix} \\
 + (12.1154 - 13.1154i)e^{-3.1416ix}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Birinci mod biçimini çizmek için x 'in değerleri 0 ile 1 arasında 0.1 kadar arttırılarak bunlara karşılık gelen \bar{W} değerleri hesaplanmıştır. İkinci mod biçimi için $\omega = 4\pi^2$, üçüncü mod biçimi için $\omega = 9\pi^2$, dördüncü mod biçimi için $\omega = 16\pi^2$ değerleri alınarak aynı hesap adımları ile karakteristik denklemlerin kökleri ve ardından keyfi sabitler bulunarak modeshapeler Şekil 6 da çizdirilmiştir.



Şekil 6: Borunun serbest titreşimine ait mod şekilleri

SONUÇ

Sınır şartları boru titreşimlerinde önemlidir. Bu çalışmada iki ucu basit mesnetlenmiş borunun hareketi incelenmiştir. Yapılan boyutsuzlaştırma ile titreşim hareketini boruya ait özel parametrelerden bağımsız olarak inceleme şansı vermiştir. Denklem (21) ile verilen katsayılar matrisinin determinanı nonlinear bir denklemdir ve bunun bulunacak olan kökleri yani titreşimin özdeğerleri sonsuz sayıda olmaktadır. Bu determinantın köklerinin analitik olarak bulunması mümkün değildir. Bu yüzden sayısal yöntem kullanılmıştır. Denklemin kökleri olan özdeğerleri hesaplayabilmek amacıyla katsayılar matrisinin determinantının mutlak değeri sıfır olana kadar özdeğerin reel ve sanal kısımları belirli aralıklarda değiştirilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 incelediğinde çarpınma hızının, α ve β katsayılarının artışıyla beraber arttığı görülmektedir. $\alpha = \frac{I}{L^4}$ olduğuna göre boyları aynı olan iki borudan et kalınlığı

büyük olanla daha yüksek hızlarda akışkan taşınabilir. $\beta = \frac{m + \rho A}{\rho A}$ olarak tanımlanmıştır. Bu durumda bir akışkan eğer iki borudan birim boyunun kütlesi daha büyük olanla taşınırsa çarpınma olayı meydana gelmez yani boruya zarar vermez. Dolayısıyla daha yüksek hızlarda taşınabilir.

REFERANSLAR

- Von Karman, T., ve Tsien, H.S., (1941), The buckling of thin cylindrical shells under axial compression, journal of aeronaut. sci., 8, 303-312.
- Amabili, M., Sarkar, A., ve Paidoussis, M.P., (2006), Chaotic vibrations of circular cylindrical shells: galerkin versus reduced-order models via the proper orthogonal decomposition method, journal of sound and vibration, 290, 736-762.
- Kana, D.D., ve Craig, Jr.R.R., (1968), parametric oscillations of a longitudinally excited cylindrical shell containing liquid, j. spacecr. rockets, 5, 13-21.
- Shkenez, S., (1964), the dynamics of an elastic and elastoplastic shell filled with an ideal liquid, proc of iv all-union conf. on theory of shells and plates, nauka, moscow, 997-1007.
- Abramson, H.N., ve Kana, D.D., (1966), some recent research on the vibration of elastic shells containing liquids, proc of symp on theory of shells, univ of houston, tx, 253-310.
- Chu, W.H., ve Kana, D.D., (1967), a theory for nonlinear transverse vibration of a partially filled elastic tank, aiaa j., 5, 1828-1835.
- gorman, d.g., reese, j.m., ve zang, y.l., (2000), vibration of a flexible pipe conveying viscous pulsating fluid flow, journal of sound and vibration, 230(2), 379-392.
- Misra, A.K., Wong, S.S.T., ve Paidoussis, M.P., (2001), Dynamics and stability of pinned-clamped and clamped-pinned cylindrical shells conveying fluid, journal of fluid and structures, 15, 1153-1166.

- Uğurlu, B., Ergin, A., (2007), Üniform eksenel akım etkisindeki elastik yapıların dinamik analizi için bir sınır eleman metodu, i.t.ü mühendislik dergisi, 6(1), 25-36.
- Durak, B., (2008), Akışkan taşıyan elastik boruların titreşim analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Türkiye'nin Tarım ve Evsel Su Ayak İzi Analizi ve Diğer Ülkeler ile Karşılaştırılması

Muhammet Yunus PAMUKOĞLU¹

Ahmet Alper BABALIK²

İbrahim DURSUN³

- 1- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü. yunuspamukoglu@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3337-0860
- 2- Prof. Dr.; Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü. alperbabalik@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9365-1088
- 3- Dr. Öğr. Üyesi; Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü. ibrahimdursun@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2261-1112

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin tarım ve evsel su ayak izi bileşenleri (yeşil, mavi ve gri su) detaylı olarak analiz edilmiştir. Analizlerde, su ayak izi bileşenlerinin sektörel ve bölgesel bazda karşılaştırılması yapılmış, Türkiye'nin su kullanımının mevcut durumu ortaya konmuştur. Çalışmada kullanılan şekiller ve veriler, Global Water Footprint Network'ün sunduğu su ayak izi analiz web sayfası üzerinden temin edilmiştir. Bu site, su tüketimi ve kirlilik yüklerini görselleştirerek, tarım ve evsel su ayak izi bileşenlerini karşılaştırmamıza olanak tanımaktadır. Türkiye'de tarım sektörü, su ayak izinin en büyük kısmını oluşturmakta olup, özellikle mavi su kullanımı açısından önemli bir baskı yaratmaktadır. Bu baskıyı azaltmak için sulama verimliliğinin artırılması ve su tasarrufu sağlayan damla sulama gibi modern yöntemlerin yaygınlaştırılması önemlidir. Ayrıca, çiftçilerin suyun doğru kullanımı konusunda eğitilmesi, tarımda su yönetiminin daha etkin hale getirilmesi açısından gereklidir. Evsel sektörde su tüketiminin azaltılması amacıyla, su tasarrufu sağlayan cihazların kullanımı teşvik edilmelidir. Nüfus yoğunluğunun fazla olduğu büyük şehirlerde, su tüketiminin yüksek olduğu göz önüne alındığında, yağmur suyu hasadı ve atık suyun geri dönüşümü gibi sürdürülebilir çözümler önem kazanmaktadır. Yerel yönetimlerin bu tür uygulamaları desteklemesi ve halkı su tasarrufu konusunda bilinçlendirmesi, su kaynaklarının korunmasına önemli katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, Türkiye'nin su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilmesi için tarımsal ve evsel su kullanımlarında bütüncül ve koordineli bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Su kaynaklarının korunması ve verimli kullanımı hem ekolojik dengenin korunmasını hem de gelecekte su kıtlığı yaşanmaması adına güvenli bir çevrenin oluşturulmasını sağlayacaktır. Bu kapsamda, çalışmada elde edilen bulgular, karar alıcıların ve ilgili tüm paydaşların su yönetimi stratejilerini geliştirmesi ve su kaynaklarını daha etkili bir şekilde yönetmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Su ayak izi, Sürdürülebilir su yönetimi, Mavi su, Gri su, Tarımsal su kullanımı.

GİRİŞ

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve sektörel su kullanımlarının karşılaştırmalı analizi, küresel ölçekte artan su talebi ve çevresel sürdürülebilirlik konularında kritik bir öneme sahiptir (Alkur vd., 2024; Pamukoğlu, 2023). Bu çalışmada kullanılan şekiller ve su ayak izi verileri, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve sektörel bazda karşılaştırmalı analizlerin yapılabilmesi amacıyla kullanılan Global Water Footprint Network'ün (WFN, 2024) su ayak izi analiz web sayfasından

alınmıştır. Bu platform, tarımsal ve evsel su ayak izi bileşenlerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, su tüketimi ve kirlilik yüklerini görselleştirmemize olanak tanımaktadır. Water Footprint Assessment, yeşil, mavi ve gri su ayak izlerini nicelendirerek, su kullanımının sürdürülebilirliğini, verimliliğini ve eşitliğini değerlendiren dört aşamalı bir süreçtir. Değerlendirme, belirli bir yıl ya da daha uzun süre boyunca, bir havza ya da küresel düzeyde yapılabilir. Bu yöntemler, Hoekstra vd. (2011) ve diğer çalışmalarda belirtilen yöntemlere dayanmaktadır ve suyun çevresel sürdürülebilirliğini, kaynak verimliliğini ve adil paylaşımını sağlamayı hedeflemektedir (WFN, 2024).

Su ayak izi, belirli bir bölgede veya sektörde tüketilen su miktarını ve bu tüketimin çevresel etkilerini anlamamıza yardımcı olan önemli bir göstergedir. Yeşil su ayak izi, yağışlardan elde edilen ve bitki büyümesi için kullanılan suyu ifade ederken; mavi su ayak izi, yüzey ve yeraltı sularının tarım, evsel ve sanayi amaçlı kullanımlarını kapsamaktadır. Gri su ayak izi ise, kirlletici maddelerin seyreltilebilmesi için gereken su miktarını belirtir (Pierrat vd., 2023).

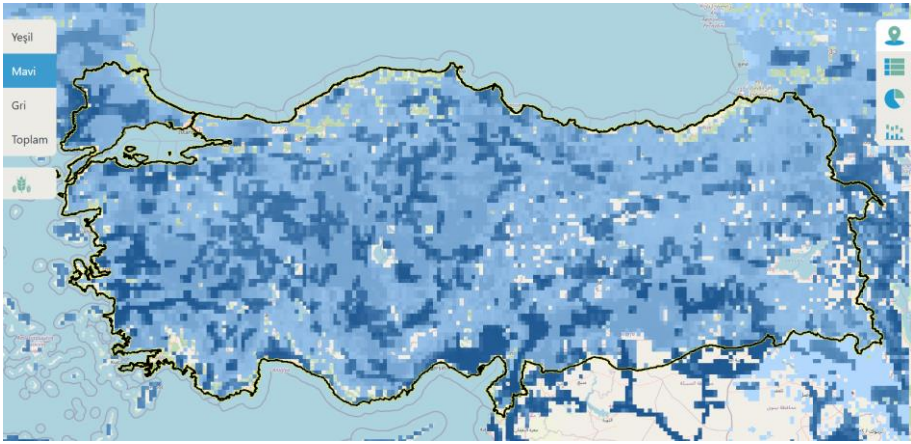
Türkiye'nin Tarım ve Evsel Bazda Mavi, Yeşil ve Gri Su Ayak İzinin Karşılaştırılması

Türkiye'nin tarım ve evsel sektörlerindeki mavi, yeşil ve gri su ayak izlerinin karşılaştırılması, bu sektörlerin su kaynakları üzerindeki etkilerini anlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Tarım sektörü, mavi su (yüzey ve yeraltı suları) ve yeşil su (toprak nemi) kullanımı açısından en büyük tüketimi yaparken, evsel sektör su kaynaklarının daha çok mavi ve gri (kirlenmiş su) bileşenleri üzerinde etki yaratmaktadır (Ding vd., 2024). Bu karşılaştırmalı analiz, tarım ve evsel su kullanımının bölgesel ve sektörel farklılıklarını ortaya koyarak, sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Tarım sektöründe suyun verimli kullanımı ve yeşil suyun daha etkin bir şekilde değerlendirilmesi, evsel sektörde ise gri suyun azaltılması ve mavi su kaynaklarının korunması, bu çalışma kapsamında öne çıkan önerilerdir.

Türkiye'nin mavi su ayak izini gösteren harita Şekil 1'de verilmiştir. Mavi su, yeraltı ve yüzey su kaynaklarından elde edilen ve tarım, sanayi, evsel gibi çeşitli amaçlarla kullanılan suyu ifade eder (Sabale vd., 2023).

Haritada koyu mavi renkler su kullanımının yüksek olduğu bölgeleri, açık mavi renkler ise daha düşük kullanım yoğunluğunu göstermektedir.

Özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu ve Akdeniz bölgeleri, yüksek mavi su ayak izine sahip alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgelerde tarımsal sulama için su kullanımının yoğunluğu belirgindir. Kuzey bölgelerde ise yağış miktarının yüksek olması, sulama ihtiyacını azaltmakta ve bu durum haritada daha açık mavi tonlarla ifade edilmektedir. Bu analiz, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve tarımda su tasarrufunu artıracak yöntemlerin önemini vurgulamaktadır.

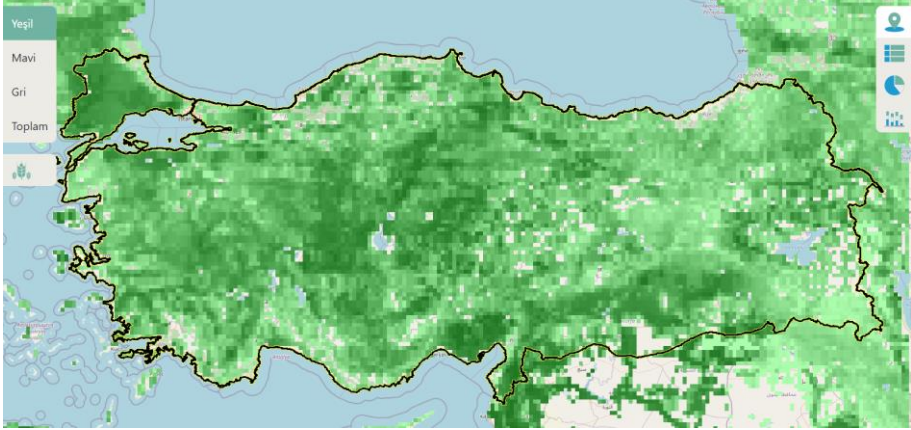


Şekil 1: Türkiye'de tarım sektörü için mavi su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de tarım sektörü için yeşil su ayak izi Şekil 2'de verilmiştir. Yeşil su, toprağa emilen yağmur suyu olup, bitkilerin büyümesi için kullanılan suyu ifade eder. Görüntüdeki yeşil tonları, Türkiye'nin farklı bölgelerinde yeşil su kullanımı ve suya erişim miktarını göstermektedir. Koyu yeşil tonlar, yağış miktarının yüksek olduğu ve tarımsal üretimde doğal yağmur suyunun daha yoğun kullanıldığı bölgeleri ifade eder. Özellikle Karadeniz Bölgesi gibi yüksek yağış alan alanlar koyu yeşil renkte gösterilmiştir. Bu durum, bölgede sulama ihtiyacının az olduğunu ve tarımın büyük ölçüde yağmur suyuyla dayandığını göstermektedir. Daha açık yeşil renkler ise daha düşük yağış miktarını veya tarımsal faaliyetlerde yeşil su kullanımının daha az olduğunu gösterir. İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde, kuraklık ve az yağış nedeniyle bu tonlar daha açık renkte görülmektedir. Bu durum, bu bölgelerde sulama ihtiyacının daha fazla

olduğunu ve su kaynaklarının dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerektiğini gösterir.

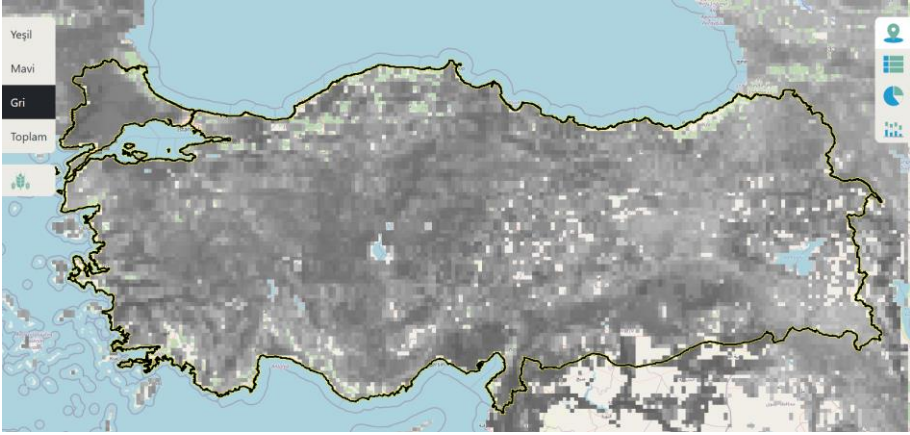
Bu analiz, Türkiye'de tarımsal üretimde yağmur suyu kullanımını ve doğal kaynaklara bağımlılığı anlamak için önemli veriler sunmaktadır.



Şekil 2: Türkiye'de tarım sektörü için yeşil su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de tarım sektörü için gri su ayak izi Şekil 3'te verilmiştir. Gri su, tarımsal faaliyetler, evsel ve sanayi kullanım sonrası kirlenen ve tekrar kullanılabilir hale gelmesi için arıtılması gereken suyu ifade eder (Zhao vd., 2023). Şekil 3'teki gri tonları, su kirliliğinin ve gri su ihtiyacının yoğunluğunu göstermektedir. Koyu gri renkler, kirli su miktarının yüksek olduğu ve gri su arıtım ihtiyacının fazla olduğu bölgeleri temsil eder. Bu tür bölgeler genellikle yoğun sanayi faaliyetlerinin bulunduğu yerlerdir ya da tarımsal faaliyetler nedeniyle kimyasal gübre ve pestisit kullanımı fazladır. Marmara Bölgesi gibi sanayileşmiş bölgeler, yoğun gri su üretimi ve kirlilik kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Açık gri renkler ise daha düşük gri su kirliliğini ve arıtma gereksinimini ifade eder. Bu durum ya sanayi faaliyetlerinin sınırlı olduğu ya da tarımda daha az kirlетici kullanıldığı anlamına gelebilir. Doğu Anadolu Bölgesi gibi daha az sanayileşmiş ve yoğun tarım yapılmayan bölgeler bu sınıfa girer.

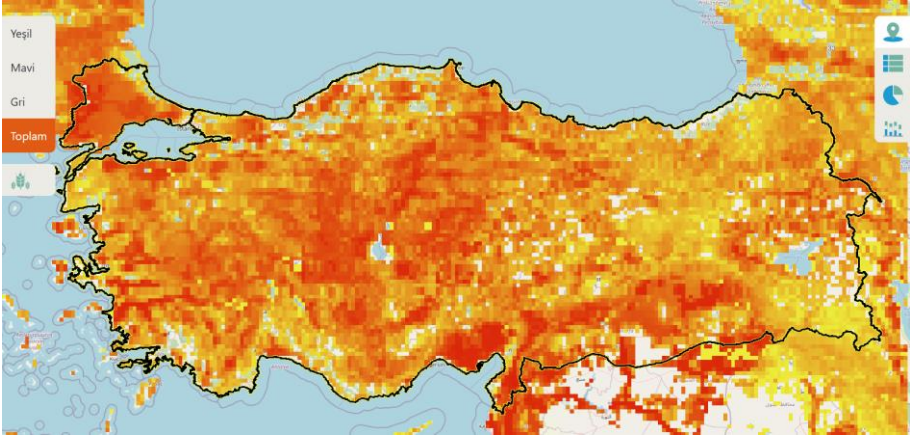
Türkiye'de gri su arıtımı ve su kirliliği ile ilgili sürdürülebilir yönetim politikalarının geliştirilmesi gerektiğini ve bu konuda bölgeler arası farkların belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3: Türkiye'de tarım sektörü için gri su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de tarım sektörü için toplam su ayak izi Şekil 4'te verilmiştir. Haritada kullanılan renk yoğunluğu, farklı bölgelerdeki toplam su kullanım miktarını ifade eder. Kırmızı ve turuncu tonlar, su kullanımının yüksek olduğu bölgeleri göstermektedir. Bu bölgeler, tarımsal sulamanın yoğun olduğu alanlar (örneğin Güneydoğu Anadolu bölgesi), yoğun sanayi faaliyetlerinin ve yüksek nüfusun bulunduğu Marmara bölgesidir. Bu renkler hem tarımsal hem de evsel ve sanayi su kullanımının yüksek olduğunu gösterir. Sarı tonlar ise daha düşük su kullanımını ifade eder. Bu durum, su kullanımının nispeten az olduğu veya su kaynaklarının daha az yoğunlukla kullanıldığı yerleri temsil eder. İç Anadolu gibi bölgeler, suyun kısıtlı olduğu ve sulama ihtiyacının da kontrollü şekilde yapıldığı yerler olarak görülebilir.

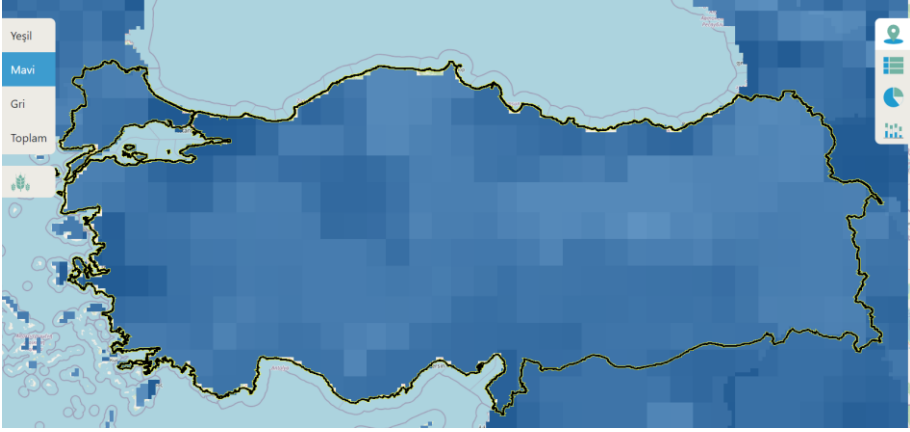
Su kaynaklarının Türkiye genelinde nasıl kullanıldığını ve bölgesel farklılıkları Şekil 4'te görülmektedir. Bu tür bir analiz, su yönetiminde sürdürülebilir politikaların geliştirilmesi ve su kaynaklarının verimli kullanımı açısından önemlidir.



Şekil 4: Türkiye'de tarım sektörü için toplam su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de evsel sektör için mavi su ayak izinin gösterildiği Şekil 5, mavi su kullanımını gösteren bir harita olup, özellikle evsel su kullanımını yansıtmaktadır. Mavi su, yeraltı ve yüzey su kaynaklarından elde edilen, evsel, tarımsal sulama ve endüstriyel işlemler için kullanılan suyu ifade eder (Ma vd., 2024). Görüntüdeki farklı tonlarda mavi renkle, Türkiye genelinde mavi su kullanım yoğunluğu vurgulanmıştır. Koyu mavi tonlar, mavi su kullanımının yoğun olduğu bölgeleri temsil etmektedir. Bu durum, özellikle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu ve evsel su talebinin yüksek olduğu şehir merkezlerinde belirgindir. Örneğin, İstanbul, Ankara, İzmir gibi büyükşehirlerde yoğun su tüketimi gözlemlenebilir. Açık mavi tonlar ise daha düşük mavi su kullanımını ifade eder ve genellikle nüfus yoğunluğunun daha düşük olduğu veya su ihtiyacının sınırlı olduğu kırsal bölgelerde görülmektedir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu gibi daha az nüfuslu bölgelerde bu tür açık tonlar daha belirgin hale gelmiştir.

Bu tür bir harita, evsel su kullanımının dağılımını ve bölgesel farklılıkları anlamak açısından önemlidir. Aynı zamanda, su yönetiminde hangi bölgelerin daha yüksek su talebine sahip olduğu ve bu talebin nasıl optimize edilebileceği konusunda stratejik bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 5: Türkiye'de evsel sektör için mavi su ayak izi (WFN, 2024)

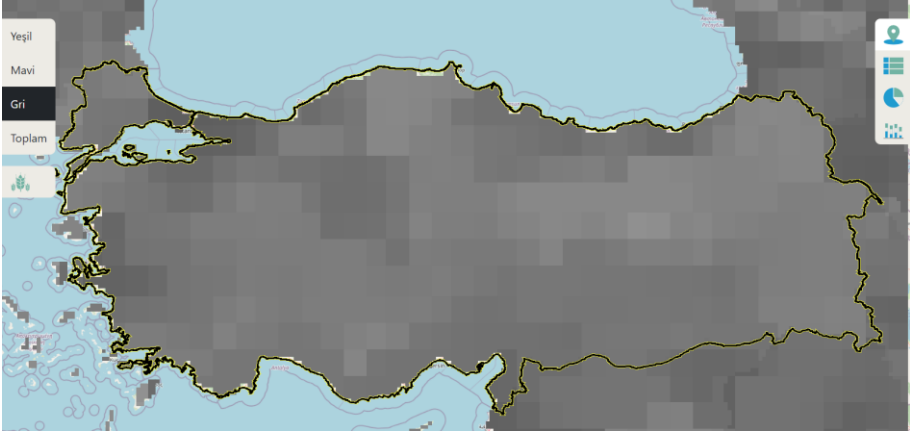
Türkiye'de evsel sektör için yeşil su ayak izi Şekil 6'da verilmiş olup, yeşil su kategorisi belirgin bir şekilde boş olarak sunulmuştur. Bu durumun nedeni, evsel sektörün su ihtiyacının doğrudan yağmur suyuna değil, yüzey ve yeraltı su kaynaklarına dayalı olmasıdır. Yeşil su, yağmur suyunun toprakta tutulup bitkiler tarafından kullanılması anlamına gelir; bu yüzden tarımsal üretimde ve orman ekosistemlerinde öne çıkan bir bileşendir (Ding vd., 2024). Evsel sektörde ise su, genellikle barajlar, göller, nehirler ve yeraltı sularından sağlanmaktadır (mavi su) ve bu su arıtılarak şehir şebekelerine verilmektedir. Ayrıca evsel su kullanımı sonucunda ortaya çıkan kirletici yük, gri su olarak tanımlanır. Bu nedenle evsel kullanımda yeşil su doğrudan bir bileşen olarak yer almaz, çünkü evsel faaliyetler doğrudan yağmur suyunu toprak yoluyla kullanmaz. Harita üzerinde yeşil su bileşeninin olmaması da bu durumu net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 6: Türkiye'de evsel sektör için yeşil su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de evsel sektör için gri su ayak izi Şekil 7'de verilmiştir. Gri su, evsel su kullanımı sonrasında kirlenen ve arıtılması gereken suyu ifade eder (Cao vd., 2023). Haritada kullanılan gri tonlar, bölgesel olarak evsel gri su yükünü ve arıtma ihtiyacını temsil etmektedir. Koyu gri tonlar, evsel su kullanımının ve dolayısıyla kirliliğin yüksek olduğu yerleri gösterir. Bu durum, nüfus yoğunluğunun fazla olduğu ve dolayısıyla evsel su talebi ve kirliliğin yüksek olduğu büyükşehirler ve sanayileşmiş bölgelerde (örneğin, İstanbul, İzmir, Ankara gibi) daha belirgindir. Daha açık gri tonlar ise evsel su kirliliğinin daha düşük olduğu veya daha az nüfus yoğunluğuna sahip bölgeleri ifade eder. Bu durum, kırsal alanlarda ve daha az nüfuslu bölgelerde gözlemlenmektedir.

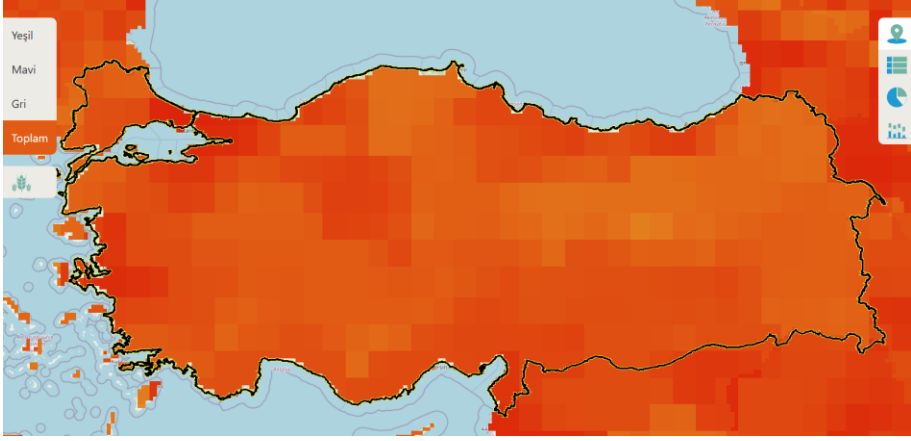
Bu tür bir harita, Türkiye genelindeki gri su yükünün hangi bölgelerde yoğunlaştığını ve su arıtma altyapısının hangi alanlarda daha fazla güçlendirilmesi gerektiğini anlamak için önemli bir kaynaktır. Özellikle büyükşehirlerdeki yüksek gri su yükü, ileri arıtma teknolojilerinin ve sürdürülebilir su yönetimi politikalarının geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 7: Türkiye'de evsel sektör için gri su ayak izi (WFN, 2024)

Türkiye'de evsel sektör için toplam su ayak izi Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu ayak izi, evsel kullanım için tüketilen yeşil, mavi ve gri su miktarlarının toplamını ifade eder (Song vd., 2023). Şekilde kullanılan kırmızı ve turuncu tonlar, Türkiye'nin farklı bölgelerinde evsel su kullanımının yoğunluğunu ve toplam su talebini temsil etmektedir. Koyu kırmızı ve turuncu tonlar, su kullanımının ve talebinin yüksek olduğu bölgeleri gösterir. Bu durum, özellikle büyükşehirler ve yoğun nüfuslu bölgelerde daha belirgin olup İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük şehirlerde evsel su talebinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu yoğunluk, büyükşehirlerin altyapı ve su arıtma kapasitesine olan ihtiyacını da işaret etmektedir. Daha açık turuncu tonlar ise su talebinin daha düşük olduğu bölgeleri ifade eder. Bu tür bölgeler genellikle kırsal ve nüfus yoğunluğunun düşük olduğu yerlerdir. İç Anadolu ve Doğu Anadolu gibi su talebinin daha az olduğu bölgeler bu kategoriye girmektedir.

Bu tür bir harita, su kaynaklarının Türkiye genelinde nasıl kullanıldığını ve hangi bölgelerde evsel su talebinin daha yüksek olduğunu anlamak için önemlidir. Su yönetiminde bölgesel farklılıkların dikkate alınması, su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde kullanılmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 8: Türkiye'de evsel sektör için toplam su ayak izi (WFN, 2024)

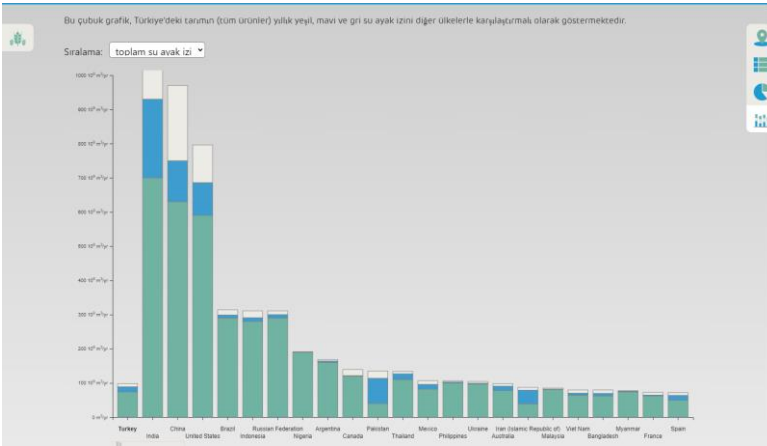
Türkiye'nin Diğer Ülkeler ile Su Ayak İzi Karşılaştırması

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi hem tarımsal hem de evsel kullanım açısından ülkelerin su ayak izi bileşenlerinin karşılaştırılmasıyla daha iyi anlaşılmaktadır (Nalbandan vd., 2023). Bu bölümde, Türkiye'nin tarımsal ve evsel bazda toplam su ayak izleri; mavi, yeşil ve gri su bileşenleri dikkate alınarak diğer ülkelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Türkiye'nin tarımsal bazda toplam su ayak izinin diğer ülkeler ile karşılaştırılması Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü üzere Türkiye'nin toplam tarımsal su ayak izinin diğer ülkelerle karşılaştırıldığında nispeten düşük olduğu görülmektedir. Özellikle Hindistan ve Çin gibi ülkeler, geniş tarım arazilerine ve yüksek nüfusa sahip olmaları nedeniyle toplam su ayak izinde en üst sırada yer almaktadır (Ma vd., 2024). Bu ülkelerde tarımsal üretimde kullanılan mavi ve yeşil su miktarlarının, oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Hindistan ve Çin gibi ülkelerinin ardından, ABD ve Brezilya gibi ülkeler de yüksek toplam su ayak izine sahiptir. Bu ülkelere toplam su ayak izinin yüksekliği, yoğun tarımsal üretim kapasiteleri ve büyük su kaynaklarına erişim imkânlarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir (Hoekstra ve Mekonnen, 2012).

Türkiye'nin toplam tarımsal su ayak izi, büyük oranda yeşil su ayak izine dayanmakta olup sulamada yağmur suyu kullanımının etkili olduğunu göstermektedir (Turan, 2017). Mavi su kullanımı, sulama amaçlı yeraltı ve yüzey suyu kullanımını ifade etmekte olup Türkiye için orta düzeyde

kalmaktadır. Bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması gerektiğini göstermektedir (WWF, 2014). Gri su ayak izi ise, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirlenmiş suyun arıtılması için gereken su miktarını temsil etmektedir. Türkiye'nin gri su ayak izinin diğer büyük tarımsal üretici ülkelere kıyaslandığında daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Türkiye'nin tarımsal su ayak izi bileşenlerinin, diğer büyük tarımsal üretici ülkelerle kıyaslandığında nispeten daha dengeli olduğu söylenebilir. Bu durum, tarımda su verimliliğini artıracak politikalar geliştirilmesi ve özellikle mavi su kullanımının minimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Serio vd., 2018). Ayrıca, gri su ayak izinin düşük olması, çevresel kirleticilerin kontrol altına alınmasında Türkiye'nin başarılı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, Türkiye'nin tarım sektöründeki su yönetimi stratejilerinin güçlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Muratoğlu, 2020; Gedik, 2023).



Şekil 9: Türkiye'nin tarımsal bazda toplam su ayak izinin diğer ülkeler ile karşılaştırılması (WFN, 2024)

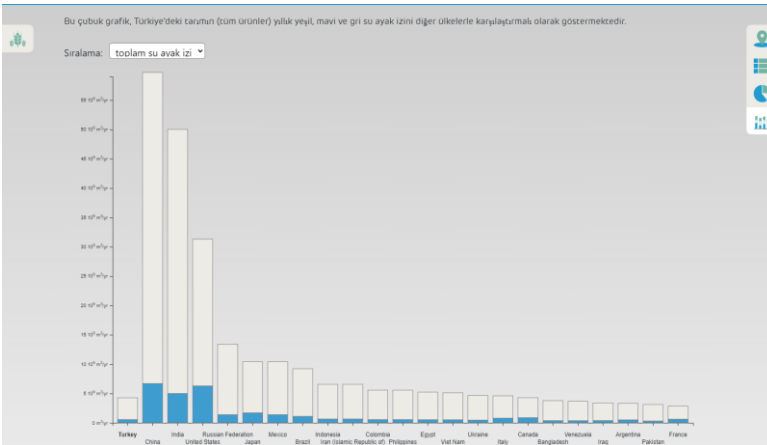
Türkiye'nin evsel bazda toplam su ayak izinin diğer ülkeler ile karşılaştırılması Şekil 10'da gösterilmiştir. Türkiye'nin evsel su ayak izini (yeşil, mavi ve gri su bileşenleri toplamı) diğer ülkelerle karşılaştırmaktadır. Grafik, evsel su kullanımında hangi su bileşenlerinin baskın olduğunu ve bu kullanımın uluslararası düzeyde diğer ülkelerle karşılaştırıldığında nasıl bir konumda olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre, Hindistan, Çin ve ABD gibi ülkeler, evsel su ayak izi bakımından başı çekmektedir. Bu ülkelerdeki yüksek nüfus

yoğunluğu, evsel su talebini artırmakta ve buna bağlı olarak toplam evsel su ayak izinin büyümesine neden olmaktadır (Gong vd.,2023). Hindistan ve Çin gibi ülkelerde evsel su tüketimi, büyük ölçüde mavi su kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu durum, yüzey ve yeraltı suyu kullanımının yüksek olduğunu göstermektedir (Wang ve Zimmerman, 2016).

Türkiye'nin evsel su ayak izi ise, bu ülkelerle kıyaslandığında oldukça düşük seviyededir. Grafikte, Türkiye'deki evsel su ayak izinin bileşenleri arasında mavi su kullanımının baskın olduğu gözlemlenmektedir. Ancak bu miktar Hindistan, Çin ve ABD gibi ülkelere göre oldukça sınırlıdır. Bu durum, Türkiye'de su kaynaklarının evsel kullanım açısından daha verimli bir şekilde yönetildiğini veya nüfus yoğunluğunun diğer ülkelerle kıyaslandığında nispeten daha düşük olduğunu göstermektedir. Gri su bileşeni de oldukça sınırlıdır, bu da evsel kullanımdan kaynaklanan kirliliğin diğer ülkelere oranla daha az olduğunu ifade edebilir.

Bunula birlikte, gelişmiş ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki evsel su tüketim farkını da ortaya koymaktadır (Şekil 10). Örneğin, Rusya ve Brezilya gibi ülkelerde evsel su ayak izi Türkiye ile benzer bir seviyede olup bu durum, nüfus yoğunluğu, su yönetimi politikaları ve evsel su kullanımı üzerindeki çevresel etkilerin farklılıklarıyla ilişkilendirilebilir (Gleick, 2003).



Şekil 10: Türkiye'nin evsel bazda toplam su ayak izinin diğer ülkeler ile karşılaştırılması (WFn, 2024)

Türkiye'nin evsel su ayak izinin düşük olması, suyun evsel tüketim için etkin bir şekilde kullanıldığını ve su yönetimi stratejilerinin etkili

olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, evsel su kullanımında sürdürülebilir politikaların sürdürülmesi ve mavi su kaynaklarının korunması önem taşımaktadır. Bu analiz, evsel su kullanımının uluslararası düzeydeki karşılaştırmasını yaparak Türkiye'nin su yönetimi stratejilerini iyileştirme yönünde yol gösterici olabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye'nin tarım, evsel bazda su ayak izi analiz edilmiştir. Tarım sektörü, Türkiye'nin toplam su tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmakta olup, özellikle mavi su kullanımı açısından önemli bir baskı yaratmaktadır. Bu baskının azaltılması amacıyla, sulama verimliliğinin artırılması ve su tasarrufu sağlayan yöntemlerin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Damla sulama gibi verimli sulama tekniklerinin teşvik edilmesi ve suyun doğru kullanımı konusunda çiftçilerin eğitimi önemli adımları oluşturmaktadır.

Evsel sektörde, su tüketiminin azaltılması için su tasarrufu sağlayan cihazların kullanımı teşvik edilmelidir. Özellikle büyük şehirlerde su tüketiminin yüksek olduğu göz önüne alındığında, atık suyun geri dönüşümü ve yağmur suyu hasadı gibi sürdürülebilir çözümler önem kazanmaktadır. Yerel yönetimlerin bu tür uygulamaları teşvik etmesi ve halkı bilinçlendirmesi, su kaynaklarının korunmasında etkili olacaktır.

Türkiye'nin su kaynaklarını daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilmesi için tarım ve evsel bazda bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Su kaynaklarının korunması ve verimli kullanımı hem ekolojik dengeyi koruyacak hem de gelecek nesillere sağlıklı bir çevre bırakılmasını sağlayacaktır. Bu kapsamda, karar alıcıların ve ilgili tüm paydaşların birlikte çalışması büyük önem arz etmektedir.

Türkiye'de tarım ve evsel su kullanımı ve suyun çevresel etkileri, sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle sulama için kullanılan mavi suyun ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan gri suyun etkilerini azaltmak için, etkin su yönetimi uygulamalarına ve su tasarrufu yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın bulguları, gelecekte su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını destekleyecek politikalara ışık tutmaktadır. Evsel su tüketiminin azaltılması, atık su arıtma altyapısının geliştirilmesi ve tarımsal sulama tekniklerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

REFERANSLAR

- Alkur, M.A., Uyanık, P., Göncü, S., Avdan, Z.Y., ve Gedik, K. (2024). Endüstriyel atık suların proste tekrar kullanılabilirliğine yönelik metodolojik değerlendirme. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 383-393.
- Cao, X., Bao, Y., Li, Y., Li, J., ve Wu, M. (2023). Unravelling the effects of crop blue, green and grey virtual water flows on regional agricultural water footprint and scarcity. *Agricultural Water Management*, 278, 108165.
- Ding, B., Zhang, J., Zheng, P., Li, Z., Wang, Y., Jia, G., ve Yu, X. (2024). Water security assessment for effective water resource management based on multi-temporal blue and green water footprints. *Journal of Hydrology*, 632, 130761.
- Gedik, Y. (2023). Tarımsal pazarlama: Faydaları, zorlukları ve stratejileri üzerine kavramsal bir çerçeve. *Turizm Ekonomi ve İşletme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 134-147.
- Gleick, P.H. (2003). Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. *Science*, 302(5650), 1524-1528.
- Gong, B., Liu, Z., Liu, Y., ve Zhou, S. (2023). Understanding advances and challenges of urban water security and sustainability in China based on water footprint dynamics. *Ecological Indicators*, 150, 110233.
- Hoekstra, A.Y., ve Mekonnen, M.M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(9), 3232-3237.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., ve Mekonnen, M.M., (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London, UK.
- Ma, X., Liu, C., Niu, Y., ve Zhang, Y. (2024). Spatio-temporal pattern and prediction of agricultural blue and green water footprint scarcity index in the lower reaches of the Yellow River Basin. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140691.
- Muratoğlu, A. (2020). Üretimin su ayak izinin incelenmesi: Diyarbakır ili için bir vaka çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 845-858.
- Nalbandan, R.B., Delavar, M., Abbasi, H., ve Zaghiyan, M.R. (2023). Model-based water footprint accounting framework to evaluate new water management policies. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135220.
- Pamukoğlu Y. (2023). Su kirliliği ve atık su arıtımı: analiz, sınıflandırma ve çevresel etkiler, *Mühendislik Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler II*, s: 49-65.
- Pierrat, É., Laurent, A., Dorber, M., Rygaard, M., Verones, F., ve Hauschild, M. (2023). Advancing water footprint assessments: Combining the impacts of water pollution and scarcity. *Science of the Total Environment*, 870, 161910.
- Sabale, R., Venkatesh, B., ve Jose, M. (2023). Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 17.
- Serio, F., Miglietta, P.P., Lamastra, L., Ficocelli, S., Intini, F., De Leo, F., ve De Donno, A. (2018). Groundwater nitrate contamination and agricultural land

- use: A grey water footprint perspective in Southern Apulia Region (Italy). *Science of the Total Environment*, 645, 1425-1431.
- Song, M., He, W., An, M., Fang, X., Wang, B., & Ramsey, T. S. (2023). Toward better agricultural grey water footprint allocation under economy-resource factors constraint. *Ecological Indicators*, 154, 110806.
- Turan, E.S. (2017). Türkiye'nin su ayak izi değerlendirmesi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(EK-1), 55-62.
- Wang, R., ve Zimmerman, J. (2016). Hybrid analysis of blue water consumption and water scarcity implications at the global, national, and basin levels in an increasingly globalized world. *Environmental Science & Technology*, 50(10), 5143-5153.
- WWF, 2014. Türkiye'nin Su Ayak İzi Raporu Su, Üretim ve Uluslararası Ticaret İlişkisi, Ankara.
- Water Footprint Network (WFN), (2024). (<https://www.waterfootprintassessmenttool.org>). html adresinden 1 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Zhao, D., Liu, W., Gao, R., Zhang, P., Li, M., Wu, P., ve Zhuo, L. (2023). Spatiotemporal evolution of crop grey water footprint and associated water pollution levels in arid regions of western China. *Agricultural Water Management*, 280, 108224.

Isparta İlinde Taşıt Trafikinden Kaynaklı Karbon Salınımının Belirlenmesi ve Alınabilecek Önlemler

Muhammet Yunus PAMUKOĞLU¹

Ahmet Alper BABALIK²

İbrahim DURSUN³

- 1- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü. yunuspamukoglu@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3337-0860
- 2- Prof. Dr.; Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü. alperbabalik@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9365-1088
- 3- Dr. Öğr. Üyesi.; Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Mühendisliği Bölümü. ibrahimdursun@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2261-1112

ÖZET

Günümüzde karbon salınımına bağlı olarak çok ciddi olumsuz sonuçlarını gördüğümüz küresel iklim değişikliği, giderek artan küresel bir problem haline gelmiştir. Küresel iklim değişikliğine yol açan en büyük unsur ise karbon salınımıdır. Karbon salınımını arttıran etkenlerden bir tanesi de taşıt trafiğidir. Çalışmanın yürütüldüğü Isparta ilinde de bireysel araç kullanımı oldukça yaygın olup, bunun da en büyük kısmını taşıt trafiği oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle şehir içi ve ana arterlerde trafik yoğunluğuna, dolayısıyla da karbon salınımının yüksek olmasına yol açmaktadır. Taşıt trafiği, Isparta'da fosil yakıt kullanımının yaygın olması nedeniyle önemli bir karbon salınım kaynağıdır. Çalışma kapsamında Tier metodu uygulanmış ve bunun sonucunda CO₂ emisyonu, 2021, 2022, 2023 yılları için sırası ile 393.07 Gg, 432.43 Gg ve 567.28 Gg olarak hesaplanmıştır. Bu artış, araç sayısının ve yakıt tüketiminin artmasıyla doğru orantılı olarak gözlemlenmektedir. Şehirde en çok kullanılan taşıt türleri arasında binek araçlar, hafif ticari araçlar ve ağır vasıtalar bulunmaktadır ve bu araçlar farklı seviyelerde karbon salınımına neden olmaktadır. Bu durum hem çevre sağlığı hem de sürdürülebilirlik açısından tehdit oluşturmaktadır. Bununla birlikte, Isparta ilindeki orman ve mera alanları karbon yakalama kapasitesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Isparta'da 476.658 hektar orman alanı ve 18.798 hektar mera alanı bulunmaktadır. Bu alanların toplam karbon yakalama kapasitesi yıllık yaklaşık 3.135,87 Gg CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu kapasite, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını dengelemek için büyük bir potansiyele sahiptir. Fakat, yıllık karbon salınımındaki sürekli artış bu potansiyeli tehdit etmekte ve karbon dengesini koruyabilmek için taşıt kaynaklı emisyonların azaltılmasını zorunlu kılmaktadır. Toplu taşımanın teşvik edilmesi, alternatif yakıtların kullanımı ve akıllı trafik yönetimi gibi stratejik önlemler oldukça önemlidir. Orman ve mera alanlarının korunarak karbon yakalama kapasitesinin artırılması da çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir gerekliliktir.

Anahtar Kelimeler: Karbon, Emisyon, Taşıt, Isparta, İklim değişikliği

GİRİŞ

Günümüzde karbon salınımının olumsuz etkileri, küresel iklim değişikliğinin başlıca nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Pamukoğlu ve Atay, 2021a; Pamukoğlu ve Atay, 2021b; Şentürk vd., 2023). Bu bağlamda, özellikle taşıt trafiği gibi fosil yakıt tüketimine dayalı insan faaliyetlerinin emisyon seviyeleri üzerindeki etkileri giderek artmaktadır. Isparta, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde yer alan ve Batı Akdeniz'in iç kısmında konumlanan bir ildir. Doğal güzellikleri, gölleri ve zengin tarım alanlarıyla bilinir. Şehir, kuzeyde Eğirdir Gölü ve Batı Toros Dağları ile çevrilidir. Isparta'nın toplam yüzölçümü yaklaşık 8.933 km² olup, iklimi genellikle Akdeniz iklimi ile karasal iklimin geçiş özelliklerini gösterir (Dursun ve Babalık, 2021). Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. Nüfusu 2023 verilerine göre yaklaşık 450.000'dir. Bu nüfusun büyük bir kısmı tarım ve hizmet sektöründe çalışmaktadır. Ayrıca, şehirde bulunan üniversitelerin varlığı nedeniyle şehir, öğrenci nüfusu açısından da yoğundur. Bu durum sosyal ve ekonomik dinamiklerini çeşitlendirmektedir. Isparta'nın ulaşım altyapısı karayollarına dayalıdır; şehirlerarası yollar üzerinden Antalya, Konya ve Afyonkarahisar gibi çevre illere bağlantı sağlanmaktadır. Şehir içi ulaşımında ise bireysel araç kullanımının oldukça yaygın olması taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımında yüksek olmasına yol açmaktadır.

Isparta ilinde, artan nüfusu ve ekonomik gelişimiyle birlikte taşıt trafiğinde belirgin bir artış yaşanmaktadır (Pamukoğlu ve Tekeli, 2022). Şehirde bireysel araç kullanımı yaygındır ve toplu taşımanın henüz istenilen seviyeye ulaşmaması, bireysel araç sahipliğinin teşvik edilmesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle şehir içi ve ana arterlerde trafik yoğunluğu ve dolayısıyla yüksek karbon salınımına neden olmaktadır. Taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımı, fosil yakıtlarla çalışan araçlardan çıkan karbondioksit (CO₂) gibi sera gazlarının atmosfere salınmasıyla oluşmaktadır (Kaya, 2020; Pamukoğlu vd., 2023). Isparta'da kullanılan araçların büyük çoğunluğu benzinli veya dizel motorlu olduğundan, bu durum karbon salınımının yüksek olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, yoğun trafik ve dur-kalk yapma gibi faktörler de yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını artırmaktadır. Isparta'nın şehir içi ve şehirlerarası ulaşım taleplerinin artmasıyla birlikte, taşıt kaynaklı karbon salınımı çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle karbon salınımının azaltılması ve sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi, bölgenin çevre sağlığını korumak için kritik bir önem taşımaktadır.

KARBON SALINIMININ KAYNAKLARI

Taşıt Tiplerine Göre Karbon Salınımı

Taşıt tiplerine göre karbon salınımı, aracın yakıt türüne, motor büyüklüğüne ve kullanım amacına bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Isparta ilinde kullanılan taşıt türleri arasında binek araçlar, hafif ticari araçlar, ağır vasıtalar ve motosikletler yer almaktadır ve her bir taşıt türü farklı seviyelerde karbon salınımına neden olmaktadır.

• **Binek Araçlar:** Şehir içi ve şehirlerarası ulaşımında en yaygın olarak kullanılan taşıt türüdür. Benzinli veya dizel yakıtla çalışan binek araçlar, ortalama olarak kilometre başına yüksek miktarda karbon salımı yapmaktadır ve toplam emisyonun önemli bir kısmını oluşturur.

• **Hafif Ticari Araçlar:** Genellikle ticari faaliyetler için kullanılan kamyonet ve minibüs gibi araçlar, daha büyük motor kapasiteleri nedeniyle binek araçlara kıyasla daha fazla karbon salınımına neden olurlar. Isparta'da ticaret ve tarım faaliyetlerinin yoğun olması nedeniyle bu araçların sayısı oldukça fazladır.

• **Ağır Vasıtalar:** Kamyonlar ve otobüsler gibi ağır vasıtalar, büyük miktarda yakıt tüketmekte ve dolayısıyla yüksek karbon salınımına neden olmaktadır. Özellikle şehirlerarası taşımacılıkta kullanılan bu taşıtlar, karbon salınımının büyük bir bölümünden sorumludur.

• **Motosikletler:** Düşük yakıt tüketimi ile bilinen motosikletler, genellikle binek araçlara kıyasla daha az karbon salınımına neden olur. Ancak eski model motosikletler ve düşük verimli motorlar, belirli seviyelerde karbon emisyonuna yol açabilir.

Isparta ilinde taşıt sayısının artışı ve farklı taşıt türlerinin yoğun kullanımı, karbon salınımını artıran önemli bir faktördür. Bu nedenle, karbon salınımını azaltmak için farklı taşıt türlerine yönelik stratejik önlemler geliştirilmesi gerekmektedir (Tarhan ve Ercoşkun, 2023).

Taşıt Trafığının Isparta İlindeki Dağılımı

Isparta ilinde taşıt trafiği, kent merkezi ve ana arterlerde yoğunlaşmaktadır. Şehir içi taşıt trafiği genellikle iş saatlerinde, özellikle sabah ve akşam saatlerinde artış göstermektedir (Dönmez vd., 2023). Bu durum, bireysel araç kullanımının yaygın olmasından ve toplu taşımının henüz yeterince tercih edilmemesinden kaynaklanmaktadır. Kentin ana caddeleri ve ticaret merkezleri, gün boyunca en yüksek trafik yoğunluğunun gözlemlendiği yerlerdir. Şehirler arası yollar üzerinde de önemli bir trafik yoğunluğu bulunmaktadır. Isparta'nın Antalya, Konya ve Afyonkarahisar gibi komşu illere olan bağlantısı nedeniyle, şehirler arası yük ve yolcu

taşımacılığı da trafikte önemli bir paya sahiptir. Tarım ve ticaret sektörlerinin etkisiyle hafif ticari araçlar ve ağır vasıtalar da şehir genelinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu taşıt trafiği dağılımı, kent merkezinde yüksek karbon salınımına yol açarken, bölgedeki hava kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Isparta ilindeki taşıt trafiği dağılımının doğru bir şekilde analiz edilmesi ve trafiğin yoğun olduğu bölgelerde karbon salınımını azaltmak için önlemler alınması, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

TÜRKİYE İSTATİSTİK KURUMU VERİLERİNE DAYALI ANALİZLER

Isparta İlinde Taşıt Sayısının Yıllara Göre Değişimi

Isparta ilinde taşıt sayısı, son yıllarda birçok şehirde olduğu gibi düzenli olarak artış göstermiştir (Bostancı ve Aliefendioğlu, 2024). Ekonomik gelişme, artan nüfus ve yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte bireysel araç sahipliği yaygınlaşmış ve bu durum taşıt sayısının her yıl belirgin bir şekilde artmasına yol açmıştır. TÜİK (2024) verilerine göre, özellikle binek araç ve hafif ticari araç sayısında dikkat çeken bir artış söz konusudur. 2010'lu yılların başından bu yana taşıt sayısındaki artış hem şehir içi hem de şehirler arası ulaşım talebindeki büyümeyle paralel ilerlemiştir. Bu artışın sonucunda, yakıt tüketimi ve karbon salınımı da önemli oranda yükselmiş ve bu durum çevresel sürdürülebilirlik açısından olumsuz sonuçlar doğurmuştur. Ayrıca, ağır vasıta sayısındaki artış da tarım ve lojistik faaliyetlerinin artışıyla ilişkili olup, şehirdeki karbon salınımının artmasına neden olmuştur. Isparta ilindeki taşıt sayısının yıllara göre artışını anlamak, karbon salınımını kontrol altına almak ve azaltıcı önlemler geliştirmek için kritik bir önem taşımaktadır.

KARBON SALINIMI ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE KULLANILAN MODELLER

Emisyon Faktörleri ve Hesaplama Yöntemleri

Emisyon faktörleri, belirli bir taşıt türünün belirli bir miktar yakıt tüketmesi sonucu atmosfere saldırdığı CO₂ miktarını ifade eden standartlaştırılmış değerlerdir. Bu faktörler, araç türüne, yakıt türüne, motor hacmine ve kullanım şartlarına göre farklılık göstermektedir. Emisyon faktörleri, karbon salınımının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve bu sayede farklı taşıt türlerinin çevresel etkileri kolayca hesaplanabilir (Kılıç vd., 2021; Civelekoğlu ve Bıyık, 2020). Emisyon hesaplamalarında genellikle IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) ve EMEP (Avrupa İzleme ve Değerlendirme

Programı)/CORINAIR(CORE INventory of AIR emissions) gibi uluslararası kuruluşların belirlediği emisyon faktörleri kullanılır (Abdallah vd., 2020). Bu faktörler, taşıtların ne kadar karbon salınımına neden olduğunu anlamak ve bu salınımı kontrol etmek için oldukça önemlidir. Hesaplama yöntemi, taşıtların tükettiği yakıt miktarı ile emisyon faktörlerinin çarpılması yoluyla yapılır. Örneğin, bir litre benzin tüketen bir aracın atmosfere yaklaşık 2.3 kg CO₂ saldığı kabul edilmektedir (Taylor, 2021). Isparta ili özelinde taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını hesaplamak için bu emisyon faktörleri ve yakıt tüketimi verileri kullanılarak emisyon miktarları belirlenebilir. Bu yöntem, karbon salınımını kontrol altına almak ve azaltıcı önlemler geliştirmek için gerekli olan temel verileri sağlar.

Türkiye ve Uluslararası Standartlar (IPCC, EMEP)

Karbon salınımının hesaplanması ve kontrol altına alınması için hem Türkiye'de hem de uluslararası düzeyde kabul görmüş çeşitli standartlar ve yöntemler kullanılmaktadır. Bu standartlar, emisyonların belirlenmesi, raporlanması ve azaltılması için gerekli olan temel kuralları ve yöntemleri sunar. IPCC, Birleşmiş Milletler tarafından iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla kurulmuş bir paneldir ve karbon salınımının hesaplanması konusunda uluslararası rehberlik sağlar. IPCC, farklı sektörlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplanması için kılavuzlar ve emisyon faktörleri geliştirmiştir (Solazzo vd., 2021). Bu kılavuzlar, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını belirlemek için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. EMEP, Avrupa'daki hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarının izlenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuş bir programdır (Van Caspel, vd., 2024). CORINAIR veri tabanı ile birlikte, Avrupa'daki taşıt kaynaklı emisyonların hesaplanmasına yönelik standartlar ve yöntemler geliştirmiştir (Dimitrovski vd., 2023). Bu yöntemler, Avrupa ülkelerinde karbon salınımını belirlemek ve izlemek için kullanılır ve Türkiye de bu standartlardan yararlanmaktadır. Bu uluslararası standartlar, Isparta ilinde taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını doğru bir şekilde belirlemek ve sürdürülebilir politikalar geliştirmek için rehberlik sağlar. Bu sayede, yerel yönetimler ve politika yapıcılar karbon salınımını azaltmak için etkin stratejiler geliştirebilirler.

ISPARTA ÖRNEĞİNDE KARBON SALINIMI DEĞERLENDİRMESİ

Verilerin Analizi ve Yorumlanması

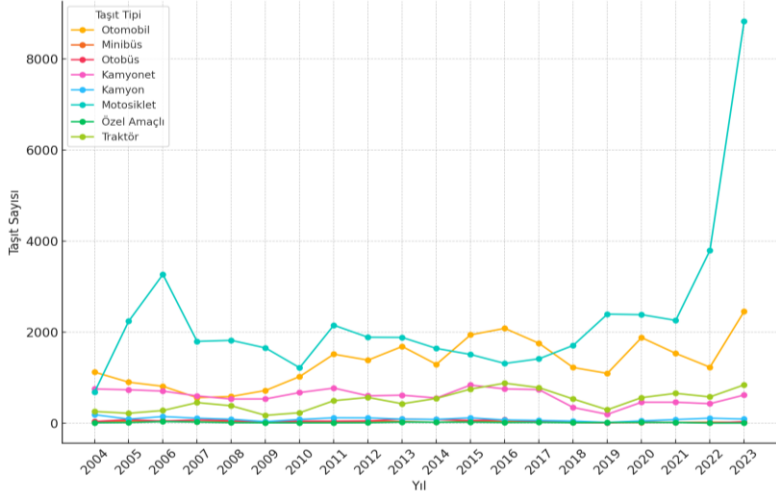
Isparta ilinde taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımının değerlendirilmesi, taşıt sayısının yıllara göre değişimi, yakıt türleri ve trafik yoğunluğu gibi verilerin analiz edilmesiyle mümkündür. Bu analiz, karbon

salınımının en yüksek olduğu taşıt türlerini ve en yoğun bölgeleri belirlemek amacıyla yapılır.

TÜİK'den elde edilen verilere göre, Isparta'daki binek araç, hafif ticari araç ve ağır vasıta sayılarında yıllar içinde belirgin bir artış gözlenmiştir (TÜİK, 2024). Özellikle benzinli ve dizel araçların yaygın kullanımı, karbon salınımının yüksek olmasına neden olmuştur. Şehir merkezindeki trafik yoğunluğu, pik saatlerde en üst seviyeye çıkarak karbon salınımını artıran önemli bir faktördür. Isparta ilindeki taşıt sayılarının 2004-2023 yılları arasındaki değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Bu verilere göre, farklı taşıt türlerinde yıllar boyunca farklı artış ve azalış trendleri gözlemlenmektedir.

Otomobil sayısı genel olarak yıllar içinde artış göstermiştir. 2004'te 1.122 olan otomobil sayısı 2023 yılında 2.453'e yükselmiştir, bu da bireysel araç kullanımının yaygınlaştığını göstermektedir. Minibüs ve otobüs sayılarında ise dalgalı bir seyir gözlenmiş, bazı yıllarda azalış olmuştur. Özellikle 2022 yılında minibüs ve otobüs sayılarında ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Kamyonet ve kamyon sayıları yıllar boyunca değişiklik göstermiş, özellikle 2023 yılında kamyonet sayısında artış dikkat çekmektedir. Motosiklet sayısı, özellikle 2022 ve 2023 yıllarında önemli bir artış göstermiştir. 2022 yılında 3.794 olan motosiklet sayısı, 2023 yılında 8.825'e çıkmıştır. Bu artış, motosiklet kullanımının popülaritesinde belirgin bir artış olduğunu işaret etmektedir. Özel Amaçlı Araçlar ve Traktör sayılarında ise yıllar boyunca küçük değişimler gözlemlenmiştir. Özel amaçlı araç sayısı genelde düşük seviyelerde kalmışken, traktör sayısında 2023 yılında artış görülmektedir (841 adet) (TÜİK, 2024).

Bu veriler, bireysel araç ve motosiklet kullanımının artmasıyla birlikte taşıt kaynaklı karbon salınımının artabileceğini ve bu durumun sürdürülebilirlik açısından bir tehdit oluşturabileceğini göstermektedir. Toplu taşıma araçlarında görülen azalma ve bireysel araçlarda görülen artış, trafik yoğunluğunun ve emisyonların artmasına neden olabilir.



Şekil 1: Isparta ili yıllara göre taşıt sayıları (TÜİK, 2024)

Isparta ilinde taşıt trafiğinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yıllara göre hesaplanması adımları aşağıda sunulmaktadır. 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait veriler, yakıt tüketim miktarlarına (EPDK, 2024) dayalı olarak CO₂ emisyonlarının nasıl değiştiğini göstermek amacıyla analiz edilmiştir. Hesaplamalar, yakıt tüketimi, enerji dönüşümü, karbon emisyon faktörleri ve karbon oksitlenme oranları kullanılarak yapılmıştır (Ekinci, 2022). Her bir yıl için, benzin tüketimi verileri kullanılarak enerji tüketimi ve bunun sonucunda oluşan karbon miktarı belirlenmiş, ardından bu değerler karbon emisyonlarına dönüştürülerek CO₂ salınımı Gigagram (Gg) cinsinden ifade edilmiştir. Bu hesaplamalar, taşıt trafiğinin karbon salınımı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmek açısından önem arz etmektedir.

2021, 2022 ve 2023 Yılları için CO₂ Emisyon Hesaplamaları

2021 Yılı CO₂ Emisyonu Hesaplamaları:

Benzin Tüketimi: 129,568.115 ton

○ **Enerji Tüketimi (TJ):**

$$\begin{aligned} \text{Enerji Tüketimi} &= 129,568.115 \text{ ton} \times 44.30 \text{ TJ/kt} \times \\ &10^{-3} = 5740.88 \text{ TJ} \end{aligned}$$

Karbon Emisyon Faktörü: 18.9 t C/TJ (ton karbon/terajoule)

Karbon İçeriği (ton C):

$$\text{Karbon İçeriği} = 5740.88 \text{ TJ} \times 18.9 \text{ t C/TJ} = 108,513.63 \text{ ton C}$$

Gigagram Cinsine Dönüşüm:

$$\text{Karbon İçeriği (Gg C)} = 108,513.63 \text{ ton C} \times 10^{-3} = 108.51 \text{ Gg C}$$

Karbon Oksitlenme Oranı: 0.99

- o Gerçek Karbon Emisyonu (Gg C) = $108.51 \text{ Gg C} \times 0.99 = 107.43 \text{ Gg C}$

CO₂ Emisyonu (Gg CO₂):

- o CO₂ Emisyonu = $107.43 \text{ Gg C} \times (44 / 12) = 393.07 \text{ Gg CO}_2$

2022 Yılı CO₂ Emisyonu Hesaplamaları:

Benzin Tüketimi: 142,325.274 ton

- o **Enerji Tüketimi (TJ):**
 - Enerji Tüketimi = $142,325.274 \text{ ton} \times 44.30 \text{ TJ/kt} \times 10^{-3} = 6303.01 \text{ TJ}$

Karbon Emisyon Faktörü: 18.9 t C/TJ (ton karbon/terajoule)

Karbon İçeriği (ton C):

- o Karbon İçeriği = $6303.01 \text{ TJ} \times 18.9 \text{ t C/TJ} = 119,126.56 \text{ ton C}$

Gigagram Cinsine Dönüşüm:

- o Karbon İçeriği (Gg C) = $119,126.56 \text{ ton C} \times 10^{-3} = 119.13 \text{ Gg C}$

Karbon Oksitlenme Oranı: 0.99

- o Gerçek Karbon Emisyonu (Gg C) = $119.13 \text{ Gg C} \times 0.99 = 117.94 \text{ Gg C}$

CO₂ Emisyonu (Gg CO₂):

- o CO₂ Emisyonu = $117.94 \text{ Gg C} \times (44 / 12) = 432.43 \text{ Gg CO}_2$

2023 Yılı CO₂ Emisyonu Hesaplamaları:

Benzin Tüketimi: 187 130.51 ton

- o **Enerji Tüketimi (TJ):**
 - Enerji Tüketimi = $187 \text{ 130, 51 ton} \times 44,30 \text{ TJ/kt} \times 10^{-3} = 8289,87 \text{ TJ}$

Karbon Emisyon Faktörü: 18,9 t C/TJ (ton karbon/terajoule)

Karbon İçeriği (ton C):

- o Karbon İçeriği = $8289.87 \text{ TJ} \times 18.9 \text{ t C/TJ} = 156,274.62 \text{ ton C}$

Gigagram Cinsine Dönüşüm:

- o Karbon İçeriği (Gg C) = $156,274.62 \text{ ton C} \times 10^{-3} = 156.27 \text{ Gg C}$

Karbon Oksitlenme Oranı: 0.99

- o Gerçek Karbon Emisyonu (Gg C) = $156.27 \text{ Gg C} \times 0.99 = 154.71 \text{ Gg C}$

CO₂ Emisyonu (Gg CO₂):

o $\text{CO}_2 \text{ Emisyonu} = 154.71 \text{ Gg C} \times (44 / 12) = 567.28 \text{ Gg CO}_2$

2021-2023 yılları arasındaki CO₂ emisyonları, yıllar geçtikçe artış eğilimi göstermektedir (Tablo 1).

Tablo 1: 2021-2023 yılları arası CO₂ emisyonları tablosu

Yıl	CO₂ Emisyonu (Gg CO₂)
2021	393,07
2022	432,43
2023	567,28

2021 yılında 393,07 Gg CO₂, 2022'de 432,43 Gg CO₂ ve 2023'te 567,28 Gg CO₂ olarak artmıştır. Bu artış, araç sayısının ve yakıt tüketiminin artmasıyla doğru orantılı olarak gözlemlenmektedir.

TRAFİK YOĞUNLUĞUNUN KARBON SALINIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Trafik yoğunluğu, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımının artmasında önemli bir rol oynar (Lei vd., 2023). Özellikle şehir içi trafik yoğunluğu, araçların sık sık dur-kalk yapmasına ve düşük hızda seyretmesine neden olarak yakıt tüketimini artırır. Bu durum, araçlardan kaynaklanan CO₂ ve diğer zararlı emisyonların artmasına yol açar.

Isparta ilinde özellikle sabah ve akşam saatlerinde yaşanan trafik yoğunluğu, karbon salınımını önemli ölçüde yükseltmektedir. Şehir merkezi, iş yerleri ve ana arterler üzerinde yoğunlaşan trafik, yakıt tüketiminin ve dolayısıyla karbon salınımının artmasına neden olur. Ayrıca, düzensiz trafik akışı ve trafik sıkışıklığı da motorların verimli çalışmasını engeller, bu da daha fazla karbon salınmasına yol açar.

Trafik yoğunluğunun karbon salınımı üzerindeki bu olumsuz etkilerini azaltmak için akıllı trafik yönetim sistemleri, toplu taşımanın teşviki ve alternatif ulaşım seçeneklerinin (bisiklet, yaya yolları) yaygınlaştırılması gibi önlemler alınması gerekmektedir (Zhang vd., 2020). Bu sayede, trafik yoğunluğunun karbon salınımı üzerindeki etkisi en aza indirilebilir.

Isparta ilindeki Ormanlık Alanların Karbon Salınımı Tutulumu

Karbon salınımı tutulumunu hesaplamak için bazı kabuller gerekmektedir. Bu bağlamda, ortalama olarak bir hektarlık orman yılda 5-10 ton CO₂ emebilir (Jarvis, 1989; Daniels, 2010). Bu, ormandaki ağaç türlerine ve yaş sınıflarına göre değişim gösterebilir. Örneğin, Türkiye'de ortalama olarak 1 hektar ormanın yılda yaklaşık 6.5 ton CO₂ emdiği varsayılabilir. Çayır ve mera alanlarının karbon Emilimi ormanlardan daha düşüktür (Chang vd., 2021). Ortalama olarak, meralar hektar başına yılda 2 ton CO₂ emebilir. Bu çalışmada orman arazi kullanımında 6.5 ton CO₂ emildiği varsayılırken mera arazi kullanımında ise karbon Emilimi 2 ton CO₂ olarak kabul edilmiştir. Isparta ilindeki orman alanı toplamda yaklaşık 476.658 hektar ve mera alanı ise 18.798 hektar olarak tespit edilmiştir (ITOİM, 2024). Bu veriler ışığında hesaplama adımları aşağıda verilmiştir;

Orman Alanı İçin Karbon Yakalama Kapasitesi:

CO₂ Yakalama Kapasitesi (ton) = Orman Alanı (hektar) × CO₂ Yakalama Oranı (ton CO₂/ha/yıl)

$$476.658 \text{ ha} \times 6,5 \text{ ton CO}_2/\text{ha/yıl} = 3.098.277 \text{ ton CO}_2$$

Mera Alanı İçin Karbon Yakalama Kapasitesi:

CO₂ Yakalama Kapasitesi (ton) = Mera Alanı (hektar) × CO₂ Yakalama Oranı (ton CO₂/ha/yıl)

$$18.798 \text{ ha} \times 2,0 \text{ ton CO}_2/\text{ha/yıl} = 37.596 \text{ ton CO}_2$$

Toplam Karbon Yakalama Kapasitesi:

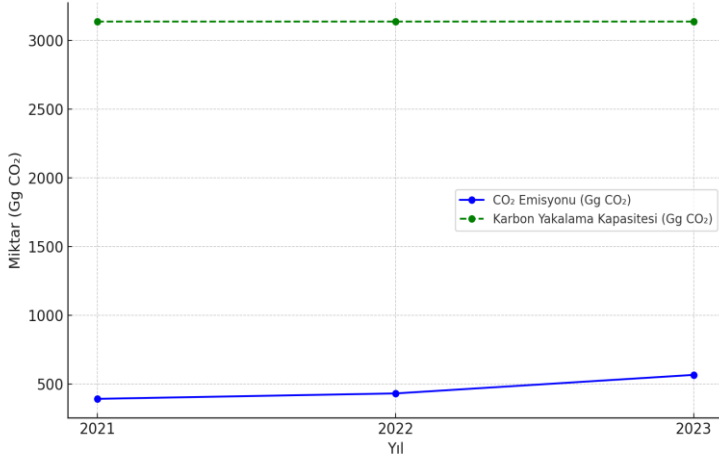
Toplam CO₂ Yakalama Kapasitesi (ton) = Orman Alanı CO₂ Yakalama Kapasitesi + Mera Alanı CO₂ Yakalama Kapasitesi

$$3.098.277 \text{ ton CO}_2 + 37.596 \text{ ton CO}_2 = 3.135.873 \text{ ton CO}_2 = 3.135,87 \text{ Gg CO}_2$$

Tablo 2 ve Şekil 2'ye göre CO₂ emisyonları 2021'den 2023'e doğru yıllık olarak belirgin bir artış göstermektedir. 2021 yılında CO₂ emisyonu 393,07 Gg iken, 2023 yılında bu değer 567,28 Gg'ye çıkmıştır. Buna karşın, karbon yakalama kapasitesi orman ve mera alanlarında bir değişim olmadığı için 3.135,87 Gg seviyesinde sabit kalmıştır. Bu durum, karbon yakalama kapasitesinin sabit kalmasına rağmen emisyonların artmasıyla birlikte net karbon salınımının arttığını göstermektedir. Emisyon artışını dengeleyebilmek için karbon yakalama kapasitesinin artırılması veya emisyonların azaltılması gerekmektedir.

Tablo 2: CO₂ emisyonu ve karbon yakalama kapasitesinin yıllara göre değişimi

Yıl	CO ₂ Emisyonu (Gg CO ₂)	Karbon Yakalama Kapasitesi (Gg CO ₂)
2021	393,07	3.135,87
2022	432,43	3.135,87
2023	567,28	3.135,87



Şekil 2: Yıllara göre CO₂ emisyonu ve karbon yakalama kapasitesi değişimleri

KARBON SALINIMINI AZALTMAK İÇİN ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Toplu Taşımanın Teşviki ve Altyapı Geliştirmeleri

Toplu taşımanın teşviki, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını azaltmanın en etkili yollarından biridir (Patil, 2021). Bireysel araç kullanımı yerine toplu taşımanın tercih edilmesi, yakıt tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltır. Bu amaçla, toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesi ve cazip hale getirilmesi kritik öneme sahiptir. Isparta ilinde toplu taşıma araçlarının sayısının artırılması, mevcut otobüs hatlarının genişletilmesi ve yeni hatların eklenmesi, toplu taşımanın erişilebilirliğini artırarak daha fazla kişinin bu sistemi kullanmasını sağlayabilir. Ayrıca, toplu taşıma araçlarının modernizasyonu ve elektrikli otobüslerin devreye alınması, karbon salınımının azaltılmasına önemli katkı sağlar. Toplu taşımanın teşvik edilmesi için, şehir genelinde otobüs duraklarının iyileştirilmesi, sefer sıklıklarının artırılması ve yolcu bilgilendirme sistemlerinin kurulması da önemlidir. Bu altyapı geliştirmeleri sayesinde,

toplu taşıma sisteminin daha verimli ve çekici hale getirilmesi sağlanarak, Isparta ilindeki karbon salınımı ve trafik yoğunluğu azaltılabilir.

Alternatif Yakıt Kullanımının Yaygınlaştırılması

Alternatif yakıt kullanımı, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını düşürmenin etkili yollarından biridir (Teixeira vd., 2021). Benzin ve dizel yakıtların yerine daha temiz ve çevre dostu olan elektrikli, hibrit, LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) ve biyoyakıt gibi alternatif yakıtların kullanılması, karbon salınımını önemli ölçüde azaltılabilir. Isparta ilinde alternatif yakıt kullanımının yaygınlaştırılması, özellikle elektrikli araçların ve hibrit araçların teşvik edilmesiyle mümkündür. Bu araçlar, fosil yakıtlara oranla çok daha düşük karbon salınımına neden olur. Şarj altyapısının geliştirilmesi ve elektrikli araçlara yönelik teşviklerin artırılması, bu araçların kullanımını cazip hale getirebilir. LPG ve biyoyakıtların kullanımı da karbon salınımını azaltmada diğer etkili yöntemler arasındadır. LPG, benzine göre daha az karbon salınımı yaparken, biyoyakıtlar yenilenebilir kaynaklardan üretildiği için çevre üzerindeki olumsuz etkileri daha düşüktür. Isparta'da bu tür yakıtların kullanımını yaygınlaştırmak, çevresel sürdürülebilirlik ve karbon salınımının azaltılması açısından önemli bir adım olacaktır.

Şehir Planlaması ve Trafik Yönetimi

Şehir planlaması ve trafik yönetimi, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını azaltmanın önemli bileşenlerindendir (Lei vd., 2021). Etkin bir şehir planlaması, trafik yoğunluğunu azaltarak daha sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturmayı amaçlar. İyi planlanmış şehirler, karbon salınımını en aza indirmek için çeşitli ulaşım alternatiflerini ve düşük emisyon bölgelerini dikkate alır. Isparta ilinde trafik yoğunluğunu azaltmak ve karbon salınımını kontrol altında tutmak için akıllı trafik yönetim sistemleri kurulabilir. Bu sistemler, trafik ışıklarının senkronizasyonu ve yoğun saatlerde alternatif güzergahların kullanılması gibi uygulamalarla trafik akışını optimize eder. Ayrıca, şehir planlamasında yaya ve bisiklet yollarının artırılması, toplu taşıma merkezlerine kolay erişimin sağlanması gibi unsurlar, bireysel araç kullanımını azaltarak karbon salınımına katkıda bulunabilir. Bunun yanında, "park ve sür" (Park & Ride) sistemlerinin uygulanması gibi önlemler de bireysel araç trafiğini azaltıp toplu taşımayı teşvik ederek şehir içi karbon salınımını önemli ölçüde düşürebilir (Obaid vd., 2021). Böylece Isparta'da daha temiz ve sürdürülebilir bir ulaşım ağı oluşturulması mümkün hale gelebilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Isparta ilinde taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımı ve bu salınımın azaltılması için alınabilecek önlemler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. 2021-2023 yılları arasında taşıt kaynaklı CO₂ emisyonları, şehirdeki taşıt sayısının ve fosil yakıt tüketiminin artmasıyla birlikte önemli bir artış göstermiştir. 2021 yılında 393,07 Gg olan CO₂ emisyonu, 2023 yılında 567,28 Gg'ye ulaşmıştır. Bu durum, taşıt trafiğinin kontrol altına alınmaması halinde karbon salınımının giderek artacağını göstermektedir. Buna karşın, orman ve mera alanlarının karbon yakalama kapasitesi sabit kalmış ve yıllık 3.135,87 Gg olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, karbon salınımının kontrolsüz bir şekilde artması ve karbon yakalama kapasitesinin yetersiz kalması sonucu net karbon dengesinin bozulduğunu göstermektedir. Şehirde özellikle binek araçlar, hafif ticari araçlar ve ağır vasıtalar, karbon salınımına en büyük katkıyı sağlamaktadır ve bu durum hem çevre sağlığına hem de sürdürülebilirliğe tehdit oluşturmaktadır.

Karbon salınımını azaltmak ve sürdürülebilir bir çevre sağlamak adına çeşitli stratejik önlemler önerilmiştir. Toplu taşımanın teşvik edilmesi, taşıt trafiğinden kaynaklanan karbon salınımını azaltmanın en etkili yollarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bireysel araç kullanımı yerine toplu taşımanın tercih edilmesi, yakıt tüketimini ve dolayısıyla emisyonları önemli ölçüde azaltabilir. Bu kapsamda, Isparta ilinde toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesi, otobüs hatlarının genişletilmesi, sefer sıklıklarının artırılması ve modernizasyonun sağlanması, toplu taşımanın cazip hale getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Alternatif yakıt kullanımı da karbon salınımını azaltmada etkili bir strateji olarak sunulmuştur. Elektrikli ve hibrit araçların teşviki, fosil yakıtlara dayalı emisyonları önemli ölçüde azaltabilir. Bunun yanında, şehir planlamasında yaya ve bisiklet yollarının artırılması, toplu taşıma merkezlerine kolay erişimin sağlanması ve akıllı trafik yönetim sistemlerinin kurulması, şehir içi trafik yoğunluğunu azaltarak karbon salınımını kontrol altına almayı amaçlamaktadır.

Bu öneriler, Isparta ilindeki karbon dengesini korumak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için büyük bir potansiyele sahiptir. Orman ve mera alanlarının korunarak karbon yakalama kapasitelerinin artırılması, şehirde karbon dengesinin korunması açısından önemli bir diğer gerekliliktir. Isparta'nın mevcut doğal potansiyeli, karbon salınımını dengelemek için değerlendirilmeli ve sürdürülebilir politika önerileri geliştirilmelidir. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin ve politika yapımcıların karbon salınımını azaltıcı önlemler geliştirmesi ve çevresel bilincin artırılması büyük önem taşımaktadır. Sürdürülebilir ulaşım ve alternatif enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması hem Isparta'nın hem de genel olarak çevrenin korunmasına önemli katkılar sunacaktır.

REFERANSLAR

- Abdallah, C., Afif, C., Sauvage, M., Borbon, A., Salameh, T., Kfoury, A., ve Sartelet, K. (2020). Determination of gaseous and particulate emission factors from road transport in a Middle Eastern capital. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102361.
- Bostancı, S., ve Aliefendioğlu, Y. (2024). Türkiye’de Büyükşehirlerde Kent İçi Ulaşım Sorunları ve Çözüm Önerileri: Ankara İli Örneği. *Kent Akademisi*, 17(2), 346-368.
- Chang, J., Ciais, P., Gasser, T., Smith, P., Herrero, M., Havlik, P., ve Zhu, D. (2021). Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, 12(1), 118.
- Civelekoğlu, G., ve Bıyık, Y. (2020). Isparta ilinde karayolu kaynaklı karbon ayak izinin hesaplanması. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(2), 78-87.
- Daniels, T.L. (2010). Integrating forest carbon sequestration into a cap-and-trade program to reduce net CO₂ emissions. *Journal of the American Planning Association*, 76(4), 463-475.
- Dimitrovski, D., Manev, N., ve Dzinlev, V. (2023). Novel Approach to Model Passenger Cars’urban Exhaust Emissions, Air Pollution Impact: The Case of the City of Skopje. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 22(12).
- Dursun, İ., ve Babalık, A.A. (2021). De Martonne-Gottman ve Standart Yağış İndeksi yöntemleri kullanılarak kuraklığın belirlenmesi: Isparta ili örneği. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 22(3), 192-201
- Dönmez, S., Dölgen, D., Bozkurt, Z., Kınay, E.H., ve Alpaslan, M.N. (2023). Karayolu Ulaşımından Kaynaklanan Çevresel Gürültünün SoundPLAN ile Haritalandırması: DEU Tınaztepe Kampüsü Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(74), 451-466.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), (2024). Petrol Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu.html> adresinden 1 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Ekinci, F. (2022). Bursa İli Karayolundan Kaynaklanan Karbon Ayak İzi Miktarının Belirlenmesi ve Alınabilecek Önlemlerin Ortaya Konulması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Jarvis, P.G. (1989). Atmospheric carbon dioxide and forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 324(1223), 369-392.
- Isparta Tarım Orman İl Müdürlüğü (ITOİM), (2024). Isparta İli Arazi Durumu.<https://isparta.tarimorman.gov.tr/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=29>.html adresinden 1 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Kaya, G. (2020). Tekkeköy (Samsun) ilçe merkezinde karayolu trafiğinden kaynaklanan emisyon envanterinin belirlenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğ Afet Çev Derg.*, 6(1), 24-36.

- Kılıç, M.Y., Dönmez, T., ve Adalı, S. (2021). Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955.
- Lei, H., Zeng, S., Namaiti, A., ve Zeng, J. (2023). The impacts of road traffic on urban carbon emissions and the corresponding planning strategies. *Land*, 12(4), 800.
- Obaid, M., Torok, A., ve Ortega, J. (2021). A comprehensive emissions model combining autonomous vehicles with park and ride and electric vehicle transportation policies. *Sustainability*, 13(9), 4653.
- Pamukoğlu Y., Atay B. (2021a). General evaluation of thermal power plants and the status of energy resources in turkey and the world, *Academic Studies in Engineering Sciences*, s: 105-120.
- Pamukoğlu, Y., ve Atay, B. (2021b). Evaluation of the effects of thermal power plants on air, water and soil quality, *Academic Studies in Engineering Sciences*, s: 121-136.
- Pamukoğlu, Y., ve Tekeli, A. (2022). Isparta ilinin ekim 2020-mart 2021 tarihleri arasındaki hava kalite parametrelerinin HYSPLIT programı ile modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler*, s: 399-434.
- Pamukoğlu, Y., Babalık, A. A., ve Dursun, İ. (2023). An Assessment of Climate Change And Carbon Management. In N.Y. Bozdoğan & A.M. Bozdoğan (Eds.), *Academic Research and Reviews in Agriculture, Forestry and Aquaculture Sciences*, (pp. 284-297). Ankara: Platanus Publishing
- Patil, P. (2021). Sustainable transportation planning: Strategies for reducing greenhouse gas emissions in Urban Areas. *Empirical Quests for Management Essences*, 1(1), 116-129.
- Solazzo, E., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Choulga, M., ve Janssens-Maenhout, G. (2021). Uncertainties in the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) emission inventory of greenhouse gases. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(7), 5655-5683.
- Şentürk, G.O., Gök, G., ve Koçyiğit, H. (2023). Tarımda Karbon Ayak İzi ve İklim Değişikliğine Etkisi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 12-24.
- Tarhan, A.K., ve Ercoşkun, O. (2023). İstanbul park et devam et sisteminin sürdürülebilir ve entegre ulaşımına etkisi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(2), 446-465.
- Taylor, R.I. (2021). Energy efficiency, emissions, tribological challenges and fluid requirements of electrified passenger car vehicles. *Lubricants*, 9(7), 66.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), (2024). İllere göre motorlu kara taşıtları sayısı. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453>.html adresinden 1 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Teixeira, A.C.R., Machado, P.G., Collaço, F.M.D.A., ve Mouette, D. (2021). Alternative fuel technologies emissions for road heavy-duty trucks: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 20954-20969.
- Van Caspel, W.E., Klimont, Z., Heyes, C., ve Fagerli, H. (2024). Impact of methane and other precursor emission reductions on surface ozone in Europe: Scenario analysis using the EMEP MSC-W model. *EGUsphere*, 2024, 1-34.

Zhang, L., Long, R., Li, W., ve Wei, J. (2020). Potential for reducing carbon emissions from urban traffic based on the carbon emission satisfaction: Case study in Shanghai. *Journal of Transport Geography*, 85, 102733.

Bataryalı ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araç Teknolojileri

Adem TÜYLÜ¹

Yasin AKIN²

Muhammed Asım KESERCİOĞLU³

- 1- Arş. Gör. Adem TÜYLÜ; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ademtuylu@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9828-1573
- 2- Arş. Gör. Yasin AKIN; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü yasinakin@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3201-379X
- 3- Arş. Gör. Muhammed Asım KESERCİOĞLU; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü mkesercioglu@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5526-380X

ÖZET

Fosil yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin en önemli sebeplerindendir. Bu kapsamda, ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılması ve içten yanmalı motorların (Internal Combustion Engine - ICE) sürdürülebilir alternatiflerle değiştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araçlar (Electric Vehicles - EV'ler), sıfır emisyon ve daha yüksek enerji verimliliği sunarak bu sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır.

Tarihsel süreçte, elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla geri planda kalmış olsa da, günümüzde çevresel endişeler ve teknolojik gelişmelerle birlikte EV'lerin kullanımında büyük bir artış gözlenmektedir. Bu bağlamda, bataryalı elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles - BEV'ler), yakıt hücresel elektrikli araçlar (Fuel Cell Electric Vehicles - FCEV'ler), Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicles - HEV'ler), Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (Plug in Hybrid Electric Vehicles - PHEV'ler) ve Menzili Uzatılmış Elektrikli Araçlar (Extended Range Electric Vehicles - ER-EV'ler) geliştirilmiş ve halihazırda kullanımda olan teknolojilerdir. Bu teknolojiler arasında bünyesinde ICE barındırmayan türler BEV ve FCEV'dir. Otomotiv sektörü için BEV teknolojisi öne çıkan tür lityum-iyon pilli (Lithium Ion Battery - LIB) iken FCEV teknolojisi en çok tercih edilen tür proton değişim membranlı yakıt hücresel (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) elektrikli araçlardır. BEV, daha yaygın bir şarj altyapısı, düşük bakım maliyetleri ve enerji verimliliği sunarken; FCEV, daha uzun menzil ve hızlı dolum süreleri ile dikkat çekmektedir. Ancak, hidrojen yakıtının üretim maliyetleri ve dolum altyapısının sınırlı olması, FCEV'lerin yaygınlaşmasını engelleyen başlıca nedenlerdir.

Bu çalışmada, EV'ler arasında yer alan BEV ve FCEV teknolojileri açıklanmış ve teknolojiler kendi içinde mukayese edilerek üstün özellikleri vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Elektrikli araç, BEV, FCEV, Lityum iyon batarya, PEM yakıt hücresi

GİRİŞ

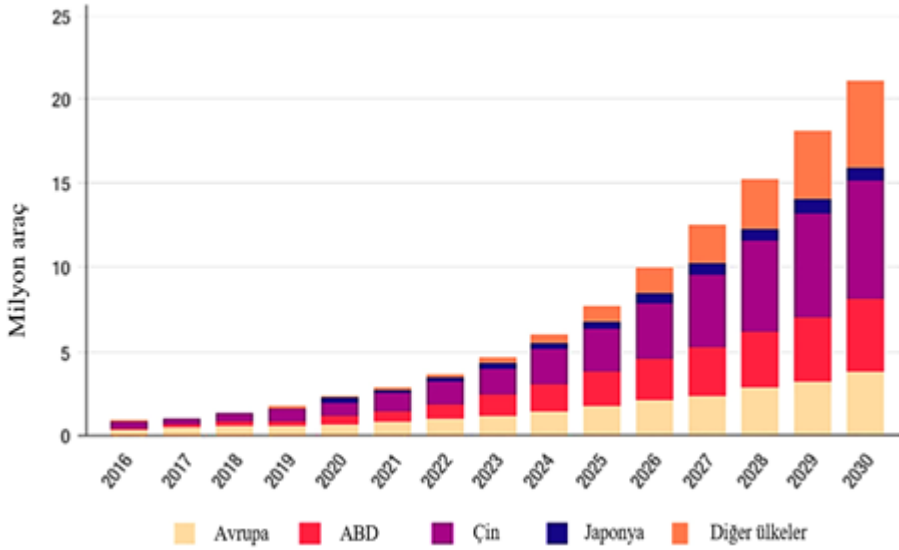
Elektrikli araçlar (EV'ler), küresel enerji tüketiminin büyük bir kısmını fosil yakıtların yakılması ile karşılayan dünyada, çevresel ve sağlık sorunlarına yönelik önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucunda açığa çıkan sera gazları (GHG'ler), küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel tehditlerin en önemli sebeplerindendir. Bu gazlar, başlıca karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azot

oksitler (NO_x) ve karbon monoksit (CO) gibi zararlı bileşenlerden oluşmaktadır. Ulaşım sektörü, özellikle içten yanmalı motorlu (ICE) araçlar, bu sera gazlarının önemli bir kısmını salmakta ve bu durum ulaşımın karbonsuzlaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Elektrikli araçlar, sıfır emisyon özelliği ile bu soruna bir alternatif olarak sunulmaktadır (Ehsani et al., 2021).

Elektrikli araçların tarihi oldukça eskilere dayanmaktadır. İlk elektrikli araç, 1881 yılında Fransız mucit Gustave Trouvé tarafından tasarlanan ve üç tekerlekli bir araç olarak literatüre geçmiştir. Bu araçta, 0,1 beygir gücünde bir doğru akım (DC) motoru kullanılmış ve kurşun-asit batarya ile çalıştırılmıştır. 20. yüzyılın ilk çeyreğinde elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha popülerdi ve üretimde önemli bir paya sahipti. Ancak zamanla içten yanmalı motor teknolojisinin gelişmesi, daha yüksek güç ve uzun menzil gibi avantajlar sunması ile birlikte, elektrikli araçlar geri planda kalmıştır. İçten yanmalı motorlu araçların daha uygun maliyetli olması da bu geçişi hızlandırmıştır (Durmuş F. S. & Kaymaz H., 2020).

Günümüzde birçok ülke, sera gazı emisyonlarını azaltma hedefleri doğrultusunda elektrikli araç kullanımını teşvik etmektedir. Elektrifikasyona dayalı taşımacılık, sadece çevresel faydalar sunmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji güvenliğini artırmak ve ekonomik büyümeye katkı sağlamak açısından da önemli bir potansiyele sahiptir. Elektrikli araçlar, daha verimli güç aktarma organları ve yüksek performanslı elektrik motorları ile içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla üstün bir performans sergilemektedir (Yong et al., 2015).

Son yıllarda elektrikli araçların geliştirilmesi ve uygulanması hız kazanmıştır. Çevre ve iklimle ilgili artan küresel farkındalık, hükümetlerin ve özel sektörün bu alana yatırım yapmasını sağlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın verilerine göre, 2020 yılı itibarıyla dünya genelinde elektrikli araç sayısının 18 milyon birime ulaşması beklenmektedir. Özellikle Çin, elektrikli araç pazarında lider konumda olup, 2015 yılına kıyasla dört kat artışla 5 milyon satış hedefini yakalamıştır (Wang et al., 2020). Elektrikli araçların bu hızlı yükselişi, gelecekte ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılması konusunda umut verici bir gelişmedir.



Şekil 1: Elektrikli araç sayılarının ülkelere göre dağılımı (Hasan et al., 2021)

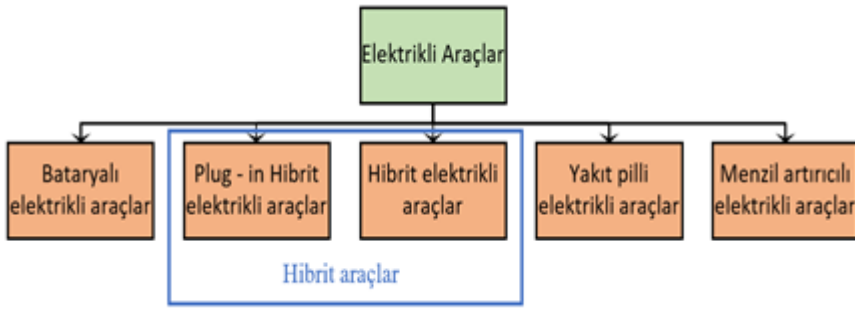
Günümüzde, motor teknolojilerine göre sınıflandırılan çeşitli elektrikli araç türleri gözlemlenebilir. Genel olarak, bu araçlar beş ana gruba ayrılmaktadır (Bkz. Şekil 1):

- **Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV'ler):** Tamamen elektrik enerjisi ile çalışan araçlardır. Bataryalı Elektrikli Araçlarda (BEV'ler) içten yanmalı motor bulunmaz ve herhangi bir sıvı yakıt kullanılmaz. BEV'ler, araca yeterli menzil sağlamak için genellikle büyük batarya paketleri kullanır. Standart bir BEV, tek bir şarj ile 160 ila 250 km menzil elde edebilirken, bazı modeller bu mesafeyi 500 km'ye kadar uzatabilmektedir.
- **Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV'ler):** Bu hibrit araçlar, geleneksel içten yanmalı motoru bir elektrik motoru ile birleştirir ve dış bir elektrik kaynağından şarj edilir. Şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler), şebekeden yeterli miktarda elektrik depolayarak, tipik sürüş senaryolarında yakıt tüketimlerini önemli ölçüde azaltabilirler.
- **Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV'ler):** Bu araçlar, geleneksel içten yanmalı motor ile elektrik motorunun bir karışımıyla çalışır. PHEV'lerden farkı, HEV'lerin şebekeye bağlanamamasıdır. Elektrik motoruna enerji sağlayan batarya, aracın içten yanmalı motoru tarafından üretilen güçle şarj edilir. Modern araçlarda, frenleme sırasında üretilen enerji kullanılarak kinetik

enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle bataryalar şarj edilebilmektedir.

- **Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV'ler):** Bu araçlar, sıkıştırılmış hidrojen ve atmosferden alınan oksijenin birleşimini kullanarak elektrik motorunu çalıştırır ve bu süreçte sadece su yan ürün olarak ortaya çıkar. Bu araçlar "sıfır emisyonlu" olarak kabul edilse de, yeşil hidrojenin varlığına rağmen kullanılan hidrojenin büyük bir kısmının doğal gazdan elde edildiği unutulmamalıdır.

- **Menzili Uzatılmış Elektrikli Araçlar (ER-EV'ler):** Bu araçlar, bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler) ile büyük ölçüde benzerdir. ER-EV'ler, gerektiğinde aracın bataryalarını şarj eden yardımcı bir içten yanmalı motorla donatılmıştır. Bu motor türü, PHEV ve HEV'lerde kullanılan motorların aksine yalnızca şarj amaçlıdır ve aracın tekerleklerine bağlı değildir (Vanitha et al., 2024).



Şekil 2: Motor teknolojilerine göre elektrikli araçların sınıflandırılması (Vanitha et al., 2024)

Bataryalı Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçların hızlı gelişimi ve yaygınlaşması, bu araçların en temel bileşenlerinden biri olan elektrikli araç pillerine (Electric Vehicle Battery - EVB) olan ilgiyi artırmıştır. Mevcut EVB teknolojileri arasında, kurşun-asit, nikel-metal hidrit (Ni-MH), lityum-iyon (Li-ion) ve nikel-nikel klorür piller öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, Li-ion piller endüstride en yaygın kullanılan teknolojidir. Bunun temel sebepleri arasında hammadde üretimindeki maliyet etkinliği, uzun çevrim ömrü, yüksek özgül kapasite ve nikel metal kullanımı gibi avantajlar yer almaktadır. Li-ion piller, özellikle kurşun-asit ve Ni-MH pillere kıyasla çok daha üstün güç (800–2000 W/kg) ve özgül enerji (100–250 Wh/kg) değerleri sunmaktadır, bu da onları elektrikli ve hibrit araçlar için birincil enerji depolama seçeneği haline

getirmiştir. Li-ion pillerin bu üstün özellikleri, enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik büyümeyi destekleyen elektrikli mobilite çözümlerinin yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Ancak bu pillerin performansı ve ömrü, hücrelerin modüller ve paketler içerisinde yetersiz entegrasyonu, ısı yönetim eksiklikleri gibi çeşitli teknik zorluklarla sınırlanabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar, Li-ion pillerin kimyasal yapılarını bozarak ömrünü kısaltırken, düşük sıcaklıklar ise pilin enerji kapasitesini ve gücünü olumsuz etkileyerek elektrikli araçların menzilin ve performansını sınırlamaktadır. Bu nedenle, Li-ion pillerin etkin ısı yönetimi, elektrikli araçların optimum performansına ulaşması ve daha uzun ömürlü olması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Elektrik enerjisinin verimli bir şekilde depolanması, ulaşımın elektrifikasyonunun başarılı olabilmesi için kritik bir faktördür ve lityum-iyon piller, elektrikli mobilitenin gereksinimlerini karşılayabilen uzun ömür, hızlı şarj, düşük sıcaklıklarda çalışma gibi kritik özellikleriyle bu sürecin merkezinde yer almaktadır. Ancak bu özelliklerin daha da geliştirilmesi ve güvenliğin artırılması, elektrikli araç teknolojisinin gelecekteki başarısı için üzerinde durulması gereken başlıca konular arasında yer almaktadır (Alaoui, 2013; Lin et al., 2021; Wang et al., 2020).

Li-ion pillerin avantajlarını daha etkili bir şekilde anlayabilmek için, lityum-iyon-kobalt (LCO), lityum-iyon-mangan (LMO) ve lityum-iyon-fosfat (LFP) gibi üç varyantın, kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd) ve nikel-metal hidrit (NiMH) gibi diğer pil türleriyle karşılaştırılması Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Çeşitli batarya türlerine ait özellikler (Haram et al., 2021)

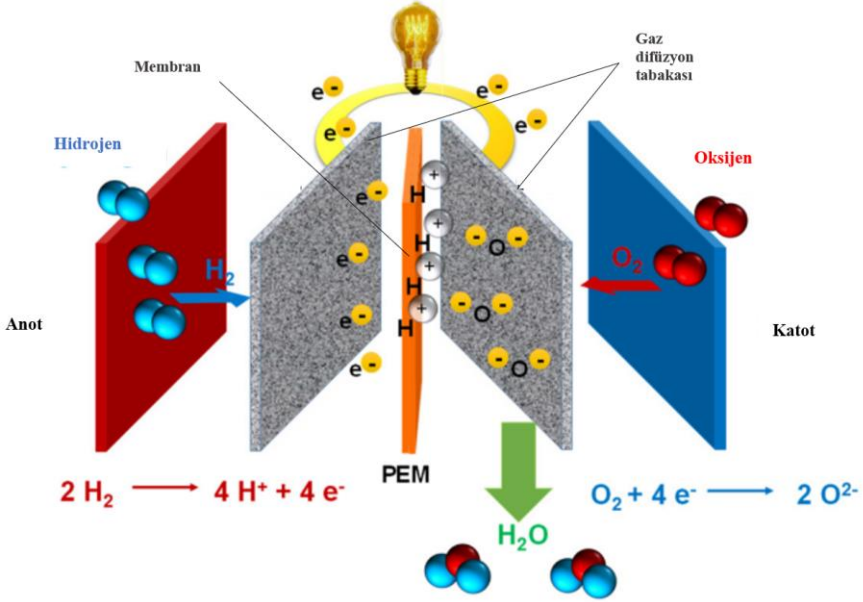
Özellikler	Kurşun-asit	NiCd	NiMH	LCO	LMO	LFP
Özgül enerji yoğunluğu (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
İç direnç (mΩ)	<100	100–300	200–300	150–300	25–75	25–50
Çevrim ömrü (80% deşarj)	200–300	1000	300–500	500–1000	500–1000	1000–2000
Hızlı şarj süresi	8–16 saat	1 saat	2–4 saat	2–4 saat	1 saat veya daha az	1 saat veya daha az
Aşırı şarj toleransı	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Kendiliğinden deşarj (ayda, oda sıcaklığında)	%5	%20	%30	<%10	<%10	<%10
Nominal hücre voltajı (V)	2	1.2	1.2	3.6	3.8	3.3

Şarj kesilme voltajı (V/hücre)	2.4	Tam şarj tespiti	1.45	4.2	4.2	3.6
Deşarj kesilme voltajı (V/hücre)	1.75	1.00	1.00–1.10	2.5–3.00	2.5–3.00	2.5–3.00
Tepe yük akımı	5C	20C	5C	>3C	>30C	>30C
En iyi sonuç	0.2C	1C	0.5C	>1C	<10C	<10C
Şarj sıcaklığı (°C)	20–50	0–45	0–45	0–45	0–45	0–45
Deşarj sıcaklığı (°C)	20–50	20–65	20–60	20–60	20–60	20–60
Bakım gereksinimi	3–6 ay	30–60 gün	60–90 gün	Gerekmiyor	Gerekmiyor	Gerekmiyor
Güvenlik gereksinimleri	Termal olarak kararlı	Termal olarak kararlı, sigorta koruması yaygın	Koruma devresi zorunlu	Koruma devresi zorunlu	Koruma devresi zorunlu	Koruma devresi zorunlu
Toksisite	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Kullanımda olduğu tarih	1800'lerin sonu	1950	1990	1991	1996	1999

Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

Yakıt hücresi, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren temiz enerji teknolojisidir ve fosil yakıtlar yerine kullanıldığında çevresel zararlarını azaltarak sürdürülebilir enerji çözümleri sunar. Bu sistemler, hidrojen gibi yakıtları kullanarak kimyasal reaksiyonlar sonucu sadece su ve ısı açığa çıkararak elektrik üretirler. Bu teknoloji sıfır emisyonlu bir enerji üretim yöntemidir. Otomotiv sektöründe özellikle Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC) yaygın olarak kullanılmakta olup, hidrojen ve oksijenin reaksiyona girmesiyle elektrik enerjisi üretir, Şekil 3. Yakıt hücreli araçlar, içten yanmalı motorlara kıyasla daha yüksek verimlilik sağlayarak egzoz emisyonlarını tamamen ortadan kaldırır. Ayrıca, hidrojenin yakıt olarak kullanımı, sadece otomobillerde değil, otobüsler, trenler vb. ağır vasıtalar için de büyük bir potansiyele sahiptir. Yakıt hücreli araçlar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon emisyonlarını düşürmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bir ulaşım altyapısına geçişi hızlandırmaktadır. Yakıt hücrelerinin maliyetlerinin düşmesi ve hidrojen dolum altyapısının yaygınlaşmasıyla, bu teknolojinin gelecekte daha geniş bir alanda

kullanılacağı öngörülmektedir (Galitskaya et al., 2018; Garche & Jörissen, 2015; Kahraman & Akın, 2024; Sazali et al., 2020; Singla et al., 2021).



Şekil 3: Tek bir Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin (PEMFC) bileşenlerini gösteren şematik diyagram: anot, katot, gaz difüzyon katmanı membran ve anot ve katot reaksiyonları (Tellez-Cruz et al., 2021).

PEMFC, yüksek güç yoğunluğu, yüksek enerji verimliliği, düşük sıcaklıklarda, sessiz ve titreşimsiz çalışması gibi avantajları dolayısıyla otomotiv sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek güç yoğunluğu ve düşük korozyon riskleri nedeniyle tercih edilen bu sistemlerin dezavantajları arasında deiyonize suya olan ihtiyaç, platin katalizör kullanımı ve düzenli membran bakımı yer almaktadır. PEMFC, Carnot döngüsü sınırlaması olmadan çalışarak yüksek enerji verimliliği ve güvenilirlik sağlar. Bu teknolojinin, düşük emisyonlu, çevre dostu ve sessiz olması gibi avantajları, onu otomotiv endüstrisinde stratejik bir ürün haline getirmiştir ve fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahip en umut verici enerji dönüşüm cihazlarından biri olarak değerlendirilmektedir (Korkut et al., 2024; Zhao et al., 2021). Tablo 2’de farklı yakıt hücresi türlerinin verimlilikleri, çalışma sıcaklıkları, yük taşıyıcıları ve kullandıkları yakıt türleri açısından karşılaştırmasını sunulmuştur.

Tablo 2: Yakıt hücresi çeşitleri ve karakteristikleri (Korkut et al., 2024)

Yakıt Hücresi Türü	Verim (%)	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Yük	Yakıt Türü
Düşük Sıcaklık PEM	40 – 60	60 – 80	H ⁺	H ₂
Yüksek Sıcaklık PEM	50 – 60	110 – 180	H ⁺	H ₂
Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMFC)	35 – 60	Ortam – 110	H ⁺	Sıvı Metanol-su karışımı
Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi (DEFC)	20 – 40	Ortam – 120	H ⁺	Sıvı Etanol-su karışımı
Proton Seramik Yakıt Hücresi (PCFC)	55 – 65	700 – 750	H ⁺	Metan
Çinko-Hava Yakıt Hücresi (ZAFC)	30 – 50	Sıfır altı – 60	OH ⁻	Çinko
Doğrudan Borhidrür Yakıt Hücresi (DBFC)	40 – 50	20 – 85	Na ⁺	Sodyum Borhidrür
Doğrudan Formik Asit Yakıt Hücresi (DFAFC)	30 – 50	30 – 60	H ⁺	Sıvı Formik Asit
Doğrudan Karbon Yakıt Hücresi (DCFC)	70 – 90	600 – 1000	O ₂	Katı Karbon
Enzimatik Yakıt Hücresi (BFC)	30	20 – 40	H ⁺	Glukoz
Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MFC)	15 – 65	20 – 60	-	Organik Madde

Bataryalı ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araçların Karşılaştırılması

Bu bölüme olan kısımda bataryalı ve yakıt hücreli elektrikli araçlara dair temel bilgiler verilmiştir. Bu başlık altında ise her iki teknoloji verimlilik, menzil, şarj edilme süresi, maliyet, çevresel etki vb. kriterler gözetilerek mukayese edilmiştir. Bataryalı elektrikli araç için elektrik şebekesi kaynağından araç tekerine, yakıt hücreli araç için enerji kaynağı olan yakıttan araç tekerine olan enerji aktarım verimleri Şekil 4'te yer almaktadır.



Şekil 4: Elektrikli araçların kaynaktan tekere verimlilikleri (Aydin, 2018)

Elektrikli araçlar üzerine yapılan araştırmalar neticesinde FCEV'lerin uzun mesafeli ve ticari kullanımda daha avantajlı olduğu, ancak BEV'lerin maliyet etkinliği ve mevcut altyapının yaygınlığı nedeniyle bireysel ve kentsel ulaşımda daha uygun bir seçenek olduğu görülmektedir. Her iki teknolojinin de sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynayabileceği, ancak enerji kaynağı ve kullanım senaryosuna bağlı olarak performanslarının değişebileceği vurgulanmaktadır. FCEV'ler, daha uzun menzil ve hızlı yakıt ikmali avantajına sahipken, BEV'ler şehir içi yolculuklar için daha verimli ve çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bataryalı elektrikli araç ile yakıt hücresel elektrikli araçların menzil, verimlilik vb. kriterlere göre mukayesesi Tablo 3'te (De Wolf & Smeers, 2023; Li et al., 2016; Sagaria et al., 2021) verilmiştir.

Tablo 3: Bataryalı ve PEM yakıt hücreli elektrikli araçların mukayesesi

Kriter	BEV (Bataryalı Elektrikli Araç)	PEMFC (Yakıt Hücreli Araç)
Menzil (Range)	300-500 km, uzun yolculuklarda sık şarj gerekebilir.	400-800 km, uzun mesafeli yolculuklar için daha uygundur.
Dolum Süresi (Refueling/Charging Time)	Hızlı şarj ile 30 dakika, standart şarj ile birkaç saat.	Hidrojen dolumu 3-5 dakika sürer, benzin dolumuna benzer.
Verimlilik (Efficiency)	%85-90 arası, elektrikten tekerleğe daha az enerji kaybı.	%50-60 arası, hidrojen üretimi ve depolamadaki kayıplar daha fazla.
Altyapı (Infrastructure)	Şarj altyapısı genişliyor, evde şarj imkânı var.	Hidrojen dolum altyapısı sınırlı, genelde büyük şehirlerde mevcut.
Maliyet (Cost)	Başlangıç maliyeti yüksek ama düşüyor, düşük bakım ve enerji maliyeti.	Üretim maliyeti yüksek, hidrojen yakıtı da daha pahalı.
Çevresel Etki (Environmental Impact)	Yenilenebilir enerji ile şarj edildiğinde çevre dostu, batarya üretimi çevresel zarar verebilir.	Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretilirse temizdir, ancak çoğu hidrojen fosil yakıtlardan üretilir.
Dayanıklılık ve Yaşam Ömrü (Durability and Lifespan)	Bataryalar 8-15 yıl dayanır, ancak kapasite zamanla azalır.	Yakıt hücreleri uzun süre dayanıklı, özellikle ticari uygulamalarda avantajlıdır.

Günümüzde batarya teknolojisi üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Bataryalar, doğal olarak nadir bulunan ve dolayısıyla sınırlı olan nadir toprak metalleri içermektedir ve bu metallerin yerkabuğundan çıkarılması ve kullanılabilir hale getirilmesi için büyük miktarda enerji gerekmektedir.

Evrende en yaygın olarak bulunan elementi olan hidrojendir. Hidrojenin yüksek reaktivitesi ve saf formda bulunmasının zorluğu nedeniyle, kirlетici madde yaymadan saf hidrojen üretmek için araştırmalar devam etmektedir. Mevcut teknoloji ile hidrojenle çalışan otomobillerin ve

iki tekerlekli araçların pratik olması beklenmemektedir, ancak yeterli alanı olan ve yakıt açısından verimsiz motorlar kullanan ağır hizmet araçlarında, FCEV güç aktarma sistemi, BEV güç aktarma sistemine kıyasla çok daha kısa sürede yakıt doldurma imkanı sunduğundan pratik bir çözüm olarak görülmektedir. Ayrıca, yakıt hücreleri, verimlilikleri nedeniyle konut ve ticari binaların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için uygun bir seçenek sunmaktadır. Temiz enerji ve gelişmiş batarya üretim yöntemlerindeki mevcut teknolojik ilerlemeler göz önüne alındığında, lityum BEV'ler geleceğin en uygun çözümü gibi görünmektedir. Ancak, alternatif bir seçenek belirlenmelidir (Parikh et al., 2023).

FCEV, özellikle uzun menzil, hızlı yakıt ikmali (3-5 dakika) ve geniş yolcu ile bagaj kapasitesi açısından BEV'lere göre avantajlar sunmaktadır. FCEV'ler, tam fonksiyonlu yolcu araçları olarak modern sürücülerin taleplerini karşılayabilirken, şehir içi ve kısa mesafeli yolculuklar için BEV'ler uygun görülmektedir. Batarya teknolojisinin, uzun menzilli elektrikli araçlarda müşteri beklentilerini karşılayabilmesi için şarj süreleri ve performans açısından daha da gelişmesi gerekmektedir (Arun et al., 2022; Thomas, 2009).

SONUÇ

Elektrikli araç teknolojileri arasında yer alan Bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler) ve yakıt hücresel elektrikli araçlar (FCEV'ler) üzerine literatür okuması yapılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. Her iki teknolojinin verimli, sürdürülebilir, çevre dostu olduğu ve fakat uygulamada çeşitli zorlukların yaşandığı anlaşılmaktadır. BEV'ler bireysel ve kentsel ulaşımında maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilirken, FCEV'ler uzun mesafe ve ticari taşımacılıkta avantaj sunmaktadır. İki teknolojinin de sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli, enerji kaynaklarına ve kullanım senaryolarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.

BEV'lerin taşıma kapasitesini artırmak ve bataryalarının şarj olma hızını iyileştirmek için etkili enerji depolama cihazlarına sahip olması gerekmektedir. Tüm bu gereksinimler karşılandığında, BEV'ler halkın geneli için kullanımına sunulabilecektir. Öte yandan, FCEV'ler için şarj istasyonu vb. altyapı sistemlerinin iyileştirilmesi, yakıt üretim ve depolama işlemlerinden kaynaklanan ve yüksek maliyetin düşürülmesi gerekmektedir.

REFERANSLAR

- Alaoui, C. (2013). Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(1), 98–107. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2214246>
- Arun, V., Kannan, R., Ramesh, S., Vijayakumar, M., Raghavendran, P. S., Siva

- Ramkumar, M., Anbarasu, P., & Sundramurthy, V. P. (2022). Review on Li-Ion Battery vs Nickel Metal Hydride Battery in EV. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7910072>
- Aydin, K. (2018). *Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles ScienceDirect Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles* *rul Baltacio* g. 4(November).
- De Wolf, D., & Smeers, Y. (2023). Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9), 1–13. <https://doi.org/10.3390/wevj14090262>
- Durmuş F. S., & Kaymaz H. (2020). Elektrikli araç şarj yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 3(2), 123–139. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jitsa/issue/57732/742474>
- Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967–984. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3072788>
- Galitskaya, E. A., Gerasimova, E. V., Dobrovol'skii, Y. A., Don, G. M., Afanas'ev, A. S., Levchenko, A. V., Sivak, A. V., & Sinitsyn, V. V. (2018). Pulsed Activation of a Fuel Cell on the Basis of a Proton-Exchange Polymer Membrane. *Technical Physics Letters*, 44(7), 570–573. <https://doi.org/10.1134/S1063785018070064>
- Garche, J., & Jörissen, L. (2015). Applications of fuel cell technology: Status and perspectives. *Electrochemical Society Interface*, 24(2), 39–43. <https://doi.org/10.1149/2.F02152if>
- Haram, M. H. S. M., Lee, J. W., Ramasamy, G., Ngu, E. E., Thiagarajah, S. P., & Lee, Y. H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4517–4536. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.021>
- Hasan, M. K., Mahmud, M., Ahasan Habib, A. K. M., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41(December 2020), 102940. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>
- Kahraman, H., & Akın, Y. (2024). Recent studies on proton exchange membrane fuel cell components, review of the literature. *Energy Conversion and Management*, 304(January), 118244. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118244>
- Korkut, O., Fen, A. Ü., Enstitüsü, B., Savran, E., Büyük, M., & Karpas, F. (2024). A Review on Recent Advances and Challenges of Fuel Cell Electric Vehicles Reviews ABSTRACT. *OKU Journal of The Institute of Science and Technology*, 7(1), 424–439.
- Li, M., Zhang, X., & Li, G. (2016). A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. *Energy*, 94(2016), 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.023>
- Lin, X., Khosravinia, K., Hu, X., Li, J., & Lu, W. (2021). Lithium Plating Mechanism, Detection, and Mitigation in Lithium-Ion Batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, 87(August). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100953>
- Parikh, A., Shah, M., & Prajapati, M. (2023). Fuelling the sustainable future: a

- comparative analysis between battery electrical vehicles (BEV) and fuel cell electrical vehicles (FCEV). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20), 57236–57252. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26241-9>
- Sagaria, S., Moreira, A., Margarido, F., & Baptista, P. (2021). From Microcars to Heavy-Duty Vehicles: Vehicle Performance Comparison of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles. *Vehicles*, 3(4), 691–720. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040041>
- Sazali, N., Salleh, W. N. W., Jamaludin, A. S., & Razali, M. N. M. (2020). New perspectives on fuel cell technology. *Membranes*, 10(5), 99.
- Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 15607–15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- Tellez-Cruz, M. M., Escorihuela, J., Solorza-Feria, O., & Compañ, V. (2021). Proton exchange membrane fuel cells (Pemfcs): Advances and challenges. *Polymers*, 13(18), 1–54. <https://doi.org/10.3390/polym13183064>
- Thomas, C. E. (2009). Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6005–6020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003>
- Vanitha, N. S., Manivannan, L., Radhika, K., Karthikeyan, A., & Meenakshi, T. (2024). A Review of Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Electric Vehicle Design: Design, Simulation and Applications*, 81–99.
- Wang, L., Wang, X., & Yang, W. (2020). Optimal design of electric vehicle battery recycling network – From the perspective of electric vehicle manufacturers. *Applied Energy*, 275(May), 115328. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115328>
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>
- Zhao, J., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Carbon corrosion mechanism and mitigation strategies in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): A review. *Journal of Power Sources*, 488(June 2020), 229434. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229434>

Termoelektrik Modüller ve Kullanım Alanları

Sinan ÇOBANER¹

Ömer ÇERLEK²

Kubilay HAN³

- 1- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. sinancobaner@subu.edu.tr ORCID No: 0009-0000-6821-4265
- 2- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. omercerlek@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2490-5915
- 3- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. kubilayhan@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1472-2832

ÖZET

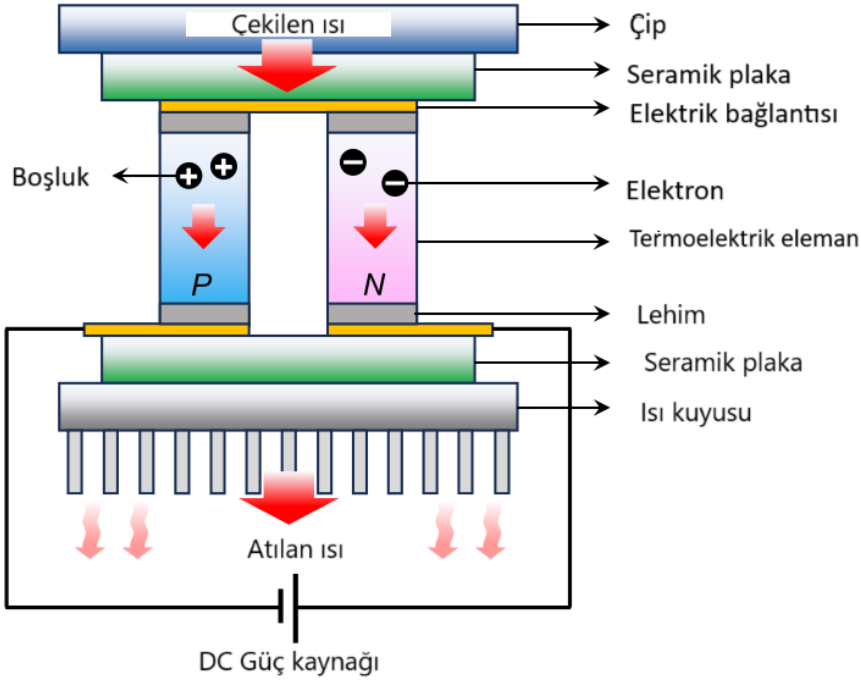
Termoelektrik modüller, Seebeck, Peltier ve Thomson etkilerini kullanarak ısı enerjisi ile elektrik enerjisi arasında dönüşüm sağlar. Seebeck etkisi, iki farklı malzeme arasında sıcaklık farkı olduğunda elektrik akımı üretirken; Peltier etkisi, elektrik akımının malzemeler arası hareketiyle soğutma ya da ısıtma oluşturur. Thomson etkisi ise tek bir iletken boyunca sıcaklık gradyanı oluşturduğunda ortaya çıkar. Termoelektrik modüller farklı alanlarda kullanılmaktadır, atık ısıdan enerji üretimi ve araç içi iklimlendirme için kullanılır, taşınabilir medikal cihazlar ve soğutma gerektiren taşımacılıkta önemli bir rol oynar, bilgisayar işlemcilerinin soğutulmasında ve mini buzdolaplarında kullanılır, uzay araçlarında ve sessiz enerji çözümlerinde tercih edilir, atık ısı geri kazanımı ve yüksek sıcaklık gerektiren sensörlerde enerji sağlar, güneş ve jeotermal enerji uygulamalarında verimliliği artırır, portatif cihazlar ve termal güç kaynakları olarak kullanılır, vücut ısını enerjiye çevirme potansiyeli taşır. Termoelektrik modüllerin avantajları arasında sessiz çalışma, düşük bakım gereksinimi ve küçük ölçekli uygulamalarda yüksek hassasiyetle çalışması bulunurken, en büyük dezavantajı düşük verimliliği ve yüksek enerji tüketimidir. Termoelektrik modüller, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından umut vaat etmektedir. Ancak, düşük enerji dönüşüm verimlilikleri nedeniyle büyük ölçekli uygulamalar için sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanında yapılacak araştırmalarla verimliliklerinin artırılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler – Termoelektrik, Seebeck, Peltier, Thompson, Isı geri kazanımı, Isıl kontrol

GİRİŞ

1821 yılında, temas eden iki farklı metalin sıcaklık farkının (ΔT) bir elektrik akımı oluşturduğu ve devrede bir elektromotor kuvvet meydana geldiği keşfedildi. Bu durum, keşfi yapan Thomas Seebeck'in ismini alarak "Seebeck etkisi" olarak adlandırılmıştır, bu etkiyle oluşan akıma "termo-akım" ve oluşturulan elektromotor kuvvete "termo-elektromotor kuvvet" denmiştir. Metaller arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), voltaj farkının (ΔV) artırılmasıyla yükseltilebilir. Bu bilgiyi kullanarak Seebeck bir katsayı geliştirmiştir. Seebeck katsayısı (α) olarak adlandırılan bu sabit, malzemeye özgüdür ve farklı maddelerde farklı değerler alır. Metaller için bu katsayı genellikle oldukça düşüktür, yaklaşık 0 mV/K civarındadır. Ancak yarı iletken malzemelerde, Seebeck katsayısı oldukça yüksek değerlere ulaşabilir, genellikle 200 mV/K civarında olabilir. Seebeck katsayısı, bir malzeme

üzerindeki voltaj farkının (ΔV) sıcaklık farkına (ΔT) oranı olarak tanımlanır. Burada oluşan voltaj farkı şu şekilde açıklanır; bir elektrik devresinde farklı iki metal veya yarı iletken malzeme arasında sıcaklık farkı olduğunda, N tipi yarı iletkenlerdeki fazla elektronların P tipi yarı iletkenlerdeki boşluklara hareket etmesiyle bir elektrik akımı oluşturur (Liu et al., 2022) Bu etki, sıcaklık gradyanı nedeniyle elektronların hareket etmesiyle elektriksel enerji elde edilmesini sağlar.



Şekil 1: Çip soğutucunun şematik diyagramı(Li et al., 2024)

1834 yılında, bir devreye akım verildiğinde, akımın yönüne bağlı olarak çeşitli iletken malzemelerin birleşim noktalarında ısıyı soğurduğu veya yaydığı keşfedildi. Bu durum "Peltier etkisi" olarak adlandırıldı. Bu durumun nedeni, birleştirilen malzemeler arasındaki Fermi enerjileridir (sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda, dolu elektronların enerji durumları ile ilgili kuantum fiziki kavramı). Sisteme harici bir elektrik enerjisi uygulandığında ortaya çıkar. Bu durumda, elektronlar bir yüzeyden diğerine hareket ederken, ısı enerjisini de beraberinde taşır. Elektrik akımı düşük enerji seviyesine sahip olan P tipi yarı iletken, yüksek enerji seviyesine sahip N tipi yarı iletken doğru ilerlerken, elektronlar bir yüzeyden ısı alır ve diğer yüzeye bırakır (Şekil 1). Bu süreç, yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşturur ve bu fark soğutma veya ısıtma amacıyla kullanılabilir (Raghav et al., 2013). İki farklı iletken

malzemenin özellikleri ve birleşim noktasının sıcaklığı, ısının soğutulma veya yayılma kapasitesini belirler. Bu kapasite, bir malzemenin termoelektrik performansını belirtmek için kullanılan boyutsuz bir parametre olan "figure of merit" (ZT) ile ifade edilir. Burada ZT, elektriksel iletkenlik (σ), sıcaklık (T) ve termal iletkenlik (k) gibi değişkenlere bağlıdır. ZT sayısı denklem 1 ile hesaplanır (Pourkiaei et al., 2019).

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{k} \quad (1)$$

Ayrıca bir tasarım yaparken termoelektrik modüllerin verimleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Termoelektrik modüllerin maksimum verimleri denklem 2 ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde \bar{T} ortalama sıcaklık değerini temsil etmektedir.

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2)$$

Son olarak, üçüncü termoelektrik etki olan "Thomson etkisi," tek bir iletkende akım nedeniyle üretilen (tersinir) ısının oranıyla ilgilidir. Bir iletkenin boyunca sıcaklık değişimi olduğunda, sıcaklık gradyanı boyunca kutuplaşma ve bir elektriksel potansiyel farkı yaratılmasıdır. Bu durum, bir iletkende elektronların hareketiyle kutuplaşmanın artması ve bu kutuplaşmanın manyetik alanlarla etkileşime girmesiyle "Thomson ısı" olarak bilinen ısının açığa çıkmasına yol açar (Yu et al., 2020). Thomson etkisi, aynı zamanda Peltier etkisinin sürekli bir versiyonu olarak kabul edilir ve 1851'de William Thomson tarafından keşfedilmiştir (Das, 2018).

Termoelektrik modüller (TE modüller), bu üç etkiyi kullanarak elektrik enerjisi ile ısı enerjisi arasında dönüşüm sağlar. Avantajları arasında hareketli parça içermemeleri, sessiz ve titreşimsiz çalışmaları, düşük bakım gereksinimleri ve uzun ömürleri bulunmaktadır. Basit çalışma prensipleri sayesinde, küçük enerji değişikliklerine hızlı tepki vererek hassas ısı kontrolü sağlarlar (Tosun et al., 2014). Bu özellikleri, termoelektrik modülleri, özellikle taşınabilir ve sessiz çalışması gereken cihazlar için cazip bir seçenek haline getirir. Ancak, termoelektrik modüllerin dezavantajları da vardır. Bu modüller, düşük enerji tüketimine sahip sistemlerle karşılaştırıldığında daha fazla enerji harcarlar ve verimlilikleri genellikle klasik soğutma yöntemlerine göre daha düşüktür. Termoelektrik soğutucuların enerji dönüşüm verimliliği, genellikle %5-8 arasında değişir, bu da yüksek enerji ihtiyaçları olan sistemler için yeterli olmayabilir. Ayrıca, geniş alanlarda soğutma gerektiğinde bu yöntem,

ekonomik olarak uygun olmayabilir ve sistemin toplam maliyetini artırabilir. Yine de, küçük ölçekli uygulamalarda ve özel durumlarda bu dezavantajlar tolere edilebilir ve termoelektrik modüller, yenilikçi bir soğutma çözümü olarak değerlendirilebilir.

KULLANIM ALANLARI

Termoelektrik modüller, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerini bir araya getiren yenilikçi bir teknoloji olarak, birçok endüstride devrim niteliğinde uygulamalar sunmaktadır. Temel işleyiş prensibi, sıcaklık farklarını elektrik enerjisine dönüştürmek olan bu modüller, atık ısıyı değerlendirilmesi, taşınabilir cihazların enerji ihtiyaçlarının karşılanması ve hassas sıcaklık kontrolü gibi kritik işlevleri başarıyla yerine getirir. Termoelektrik modüller, içten yanmalı motorların atık ısını enerjiye dönüştürerek otomotiv sektöründe yakıt tüketimini azaltma hedeflerine katkı sağlarken, uzay ve askeri teknolojilerde güvenilir, bakım gerektirmeyen enerji çözümleri sunar.

Ayrıca, medikal cihazlarda sıcaklık değişimlerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanıyarak tıp sektöründe de güvenilirlik ve enerji tasarrufu sağlar. Giyilebilir teknolojilerde vücut ısısından elektrik üretimi gibi yenilikçi kullanım alanları, enerji verimliliğini artırırken kullanıcı deneyimini de iyileştirir. Bunun yanı sıra, jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla verim elde edilmesini sağlayarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini destekler. Bu çok yönlü modüller, ev tipi cihazlardan denizcilik uygulamalarına, telekomünikasyon altyapılarından endüstriyel tesislere kadar uzanan geniş bir yelpazede enerji tasarrufu, güvenilirlik ve çevre dostu çözümler sunmaktadır (Zaferani et al., 2021).

Termoelektrik teknolojinin bu kadar çeşitli ve etkili kullanım alanlarına sahip olması, gelecekte enerji verimliliğini artırma ve karbon ayak izini azaltma çabalarına büyük katkılar sağlayacağına işaret etmektedir.

Otomotiv Sektörü:

- **Atık ısıdan enerji üretimi:** İçten yanmalı motorlar büyük miktarda atık ısı üretir. Termoelektrik modüller bu ısıyı elektrik enerjisine dönüştürerek motor verimliliğini artırır. Bu enerji, aracın bataryasını şarj etmek veya elektrikle çalışan bileşenleri beslemek için kullanılabilir. Örneğin, BMW ve Ford gibi otomobil üreticileri bu teknolojiyi yakıt tüketimini azaltmak amacıyla araştırmaktadır.

Isı kaynağı olarak otomobilin egzoz borusunun ısını kullanılan bir projede, modülün bir tarafı egzoz borusuna temas

halinde tutulmuştur, diğer tarafında ise serbest dönen mekanik bir fanla soğutulan saf alüminyum soğutucu vardır (elektrikli fan kullanılmadı). Araç hareket ettikçe egzoz borusu ısınmaya başlar ve yaklaşık 150°C'ye ulaşır. Bu, yaklaşık 70-80°C'lik iyi bir sıcaklık farkı sağlar ve bu da küçük cihazları çalıştırmaya yetecek kadar çıkış gücü üretir (Sonal Renge et al., 2017).

- **Araç içi iklimlendirme:** Termoelektrik modüller, elektrikli ısıtıcı ve soğutucu işlevi görerek araç içi sıcaklık kontrolüne katkı sağlar. Geleneksel klima sistemlerinden farklı olarak, bu teknoloji daha az enerji harcar ve çevre dostudur.

Peltier modüller klima olarak da kullanılmaktadır. Hem bir ortamı hem de araçları soğutmak amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır, fakat bu alanda yapılan çalışmalarda sisteme verilen güç ile COP değerinin düştüğü gözlemlenmiştir (Attar et al., 2015).

Tıp Sektörü:

- **Taşınabilir medikal cihazlar:** Taşınabilir oksijen makineleri veya solunum cihazları gibi medikal cihazlar, termoelektrik modüller sayesinde uzun süre güvenle çalışabilir. Sıcaklık değişimlerinin hayati önem taşıdığı cihazlarda bu modüller sıcaklığı hassas bir şekilde düzenleyebilir.
- **Soğutma gerektiren tıbbi taşımacılık:** Aşılar, plazma gibi biyolojik materyaller veya ilaçlar, belirli bir sıcaklık aralığında tutulmalıdır (Şekil 2). Termoelektrik soğutucular, bu tür maddelerin güvenli taşınmasını sağlar ve elektrik gerektirmeyen, bataryalı sistemlerle uzun mesafelerde kullanılabilir.

Sağlık alanında Polimer Zincir Reaksiyonu (PZR) test cihazlarının tepkime sıcaklıklarını kontrol altına almak amacıyla Peltier modüller kullanılmaktadır (Raghav et al., 2013). Bu reaksiyonlar gerçekleşirken sıcaklık artışı yaşanmaktadır yapılan çalışmalarda Peltier modülün anlık sıcaklık artışını engellediği ve enzimlerin zarar görmeden tepkimeyi gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Termoelektrik modüllerin stabil çalışabilmeleri ve tepki aralığının çok küçük olması bu alanda büyük bir avantaj sağlamıştır.



Şekil 2: PM ile tasarlanmış aşı taşıma kutusu (Gastelo-Roque & Morales-Acevedo, 2017).

Tüketici Elektronik:

- **Bilgisayar ve elektronik soğutma:** Yüksek performanslı bilgisayar işlemcileri ve grafik kartları aşırı ısındığında performans düşebilir veya cihazlar zarar görebilir. Termoelektrik soğutucular, bu tür donanımların aşırı ısınmasını engelleyerek daha verimli ve güvenli çalışmasını sağlar.

Mikroişlemcilerin soğutulmasında da termoelektrik modüller kullanılmaktadır. Mikroişlemci gibi ısı akısı yüksek elektronik cihazların soğutulması mühendisliğin nemli konularından birisidir. Bu alanda yapılan çalışmalarda Peltier modül ile mikroişlemci soğutmanın mümkün olduğu görülmüştür (Chen et al., 2022).

- **Mini buzdolapları:** Özellikle seyahatlerde ve küçük ofislerde kullanılan mini buzdolapları termoelektrik modüllerle soğutulur. Kompresör yerine termoelektrik modüller kullanmak, sessiz çalışma ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunar.

Hacı ve Kahraman çalışmalarında, farklı sıcaklıklarda gıda ve içecek taşıyabilen, aynı anda hem ısıtma hem de soğutma yapabilen endüstriyel mutfaklara yönelik mobil yemek taşıma modülü geliştirilmiştir. Soğutma bölümünde PM, ısıtma bölümünde ise boru rezistans kullanılmıştır. Tasarlanan kabinin istenilen sıcaklık aralığına en uygun termoelektrik modül gücü ve rezistans yerleşimiyle

ulaşmasını sağlamak amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ile gerçekleştirilmiştir(Hacı & Kahraman, 2016).

Askeri ve Uzay Teknolojisi:

- **Uzay araçları:** Uzak mesafelerde enerji kaynağına erişimin zor olduğu uzay görevlerinde, termoelektrik modüller güvenilir bir enerji kaynağı sağlar. NASA, derin uzay araştırmalarında güneş ışığından faydalanmanın mümkün olmadığı durumlarda termoelektrik jeneratörler kullanmaktadır (Şekil 3).

Dayanıklı bir yapıya sahip olması, bakım gerektirmemesi gibi özellikleri sayesinde uzay uygulamalarında da kullanılabilir. Radyoizotop termoelektrik jeneratör adı verilen bu sistemler nükleer reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıyı termoelektrik jeneratörler ile elektrik enerjisine çevirmeye olanak sağlar (Candolfi et al., 2021). Bu sayede uzaya gönderilen uydular, keşif araçları ve insansız araçlar ihtiyaç duydukları elektrik enerjisini karşılayabilmektedir.



Şekil 3: Termoelektrik modül ile enerji sağlayan bir uzay aracı (Zaferani et al., 2021).

- **Sessiz enerji çözümleri:** Termoelektrik modüller, herhangi bir hareketli parça içermediğinden sessiz çalışır. Bu, askeri uygulamalarda, özellikle gizli operasyonlarda önemli bir avantajdır.

Endüstriyel Uygulamalar:

- **Atık ısıının geri kazanımı:** Büyük sanayi tesislerinde üretilen atık ısı, termoelektrik modüllerle yeniden kullanılarak enerji üretiminde değerlendirilir. Bu süreç, enerji maliyetlerini düşürür ve aynı zamanda karbon ayak izini azaltır.,

Açığa ısı çıkan çoğu uygulamada kullanılabilen termoelektrik modüller katı oksit yakıt hücrelerinden atık ısı geri kazanımı yapmak amacıyla da kullanılmaktadır (Zhang et al., 2017). Açığa çıkan ısı ile TEJ'in bir yüzeyi ısıtılarak iki yüzey arasında sıcaklık farkı oluşturulmuş ve enerji üretiminin gerçekleşmesi sağlanmıştır.

- **Sensör ve algılayıcılar:** Termoelektrik modüller, sıcaklık farklarını algılayarak hassas sensörler için enerji sağlayabilir. Özellikle yüksek sıcaklık gerektiren üretim süreçlerinde bu teknoloji verimli ve uzun ömürlü sensörler geliştirilmesine yardımcı olur.

Yenilenebilir Enerji:

- **Güneş enerjisi uygulamaları:** Güneş panellerinin ürettiği fazla ısı, termoelektrik modüller kullanarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu, güneş enerji santrallerinin verimliliğini artırarak daha fazla elektrik üretmelerini sağlar.

TEJ'ler, güneş enerjisi sistemlerinin atık ısını güç üretmek için çeşitli tasarımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu atık ısıının geri kazanımı sayesinde verimliliğin arttığı gözlemlenmiştir (Shoeibi et al., 2022).

- **Jeotermal enerji:** Yeraltından elde edilen sıcak su kaynaklarının ısısı, termoelektrik modüllerle elektrik enerjisine çevrilebilir. Bu yöntem, yenilenebilir enerji üretiminde temiz bir alternatif sunar ve jeotermal santrallerin daha verimli çalışmasına yardımcı olur.

Sıcak su ve buhar kullanımı; Jeotermal enerji santrallerinde yeraltından çıkan sıcak su ve buhar, termoelektrik modüllerle elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu süreç, jeotermal enerji santrallerinin verimini artırarak yenilenebilir enerji üretim kapasitesini genişletir.

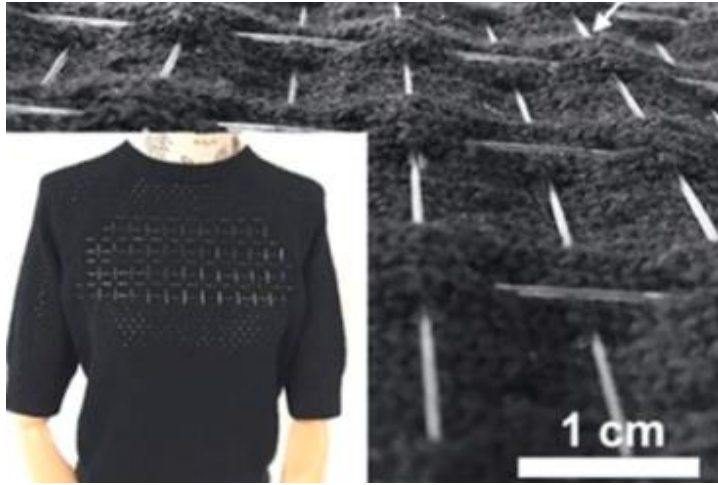
Düşük sıcaklık kaynaklarından elektrik üretimi; Termoelektrik modüller, düşük sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan dahi enerji elde edebilir. Bu, daha önce ekonomik olarak değerlendirilemeyen kaynakları kullanıma açar.

Ev Tipi Cihazlar:

- **Portatif cihazlar:** Şarj edilebilir bataryalarla çalışan portatif cihazlar, termoelektrik modüller sayesinde vücut ısısı veya çevredeki ısı farklarından enerji elde edebilir. Bu, pil ömrünü uzatır ve cihazın daha sürdürülebilir şekilde kullanılmasını sağlar.
- **Termal güç kaynakları:** Bazı evlerde termoelektrik modüller, özellikle kırsal alanlarda, ısı kaynaklarından elektrik üretmek için kullanılır. Bu, güneş enerjisi veya ısıtma sistemlerinden ek enerji üretimine imkan verir.

Giyilebilir Teknolojiler:

- **Vücut Isısını enerjiye çevirme:** Termoelektrik modüller, vücut ısını kullanarak akıllı saatler, fitness takip cihazları gibi giyilebilir teknolojilerin pil ömrünü uzatabilir (Şekil 4). Özellikle sağlık izleme cihazları sürekli enerji gerektirdiğinden bu teknolojinin önemi giderek artmaktadır (Chen et al., 2021).



Şekil 4: Giysiye entegre edilmiş termoelektrik modül (Wang & Zhang, 2020)

- **Sağlık izleme sensörleri:** Vücut sıcaklığındaki değişimleri izleyen termoelektrik sensörler, sağlık izleme cihazlarında kullanılabilir. Bu modüller vücut ısını elektrikçe çevirirken aynı zamanda vücut sıcaklığını da ölçebilir.

Denizcilik Uygulamaları:

- **Atık ısıdan elektrik üretimi:** Deniz araçları, motorlarının ürettiği atık ısıyı termoelektrik modüller kullanarak elektriğe dönüştürebilir. Bu, özellikle uzun süreli deniz yolculuklarında enerji verimliliğini artırır.
- **Su altı araştırmaları:** Termoelektrik jeneratörler, su altında enerji kaynağı sağlamada önemli bir rol oynar. Denizaltı araştırmalarında kullanılan cihazlar, bu modüllerle sürekli enerji elde edebilir, bu da kablolama veya batarya değiştirme ihtiyacını ortadan kaldırır.

Telekomünikasyon:

- **Uzak bölgelerde enerji üretimi:** Telekomünikasyon kuleleri ve istasyonları, uzak ve zorlu bölgelerde elektrik altyapısına bağlı olmadan termoelektrik modüllerle enerji üretebilir. Bu sistemler, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gibi kaynaklarla entegre çalışabilir.
- **Ekipman soğutma:** Telekomünikasyon ekipmanları, sıcaklık değişimlerine duyarlıdır, termoelektrik modüller bu cihazları soğutarak daha verimli çalışmasını sağlar ve arıza riskini azaltır (Şekil 5).



Şekil 5: Peltier modül ile yağ tipi transformatör soğutucu(TOREN & MOLLAHASANOGLU, 2022)

Güvenlik ve İzleme Sistemleri:

- **Uzaktan güç sağlama:** Güvenlik kameraları, sensörler ve diğer izleme ekipmanları, termoelektrik jeneratörler sayesinde enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilir. Bu teknoloji, özellikle kablolama imkanı olmayan geniş alanlarda yaygın olarak kullanılır.
- **Termal görüntüleme:** Termoelektrik modüller, termal görüntüleme cihazlarının soğutma sistemlerinde kullanılır, bu da daha hassas ve güvenilir görüntü elde edilmesini sağlar.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Termoelektrik modüller, Seebeck, Peltier ve Thomson etkilerini kullanarak ısı enerjisi ile elektrik enerjisi arasında doğrudan dönüşüm sağlayan yenilikçi bir teknolojidir. Sessiz, hareketli parça içermeyen ve düşük bakım gerektiren yapıları, özellikle taşınabilir, hassas sıcaklık kontrolü ve enerji verimliliği gerektiren uygulamalarda tercih edilmelerini sağlamaktadır. Bununla birlikte, mevcut teknolojik sınırlamalar nedeniyle termoelektrik modüllerin enerji dönüşüm verimlilikleri halen düşüktür, bu da büyük ölçekli enerji uygulamalarında sınırlı bir kullanım alanı yaratmaktadır.

Termoelektrik modüllerin otomotiv, tıp, tüketici elektroniği, yenilenebilir enerji ve uzay teknolojileri gibi çeşitli alanlarda önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Özellikle atık ısıнын geri kazanımı ve enerji üretimi gibi çevresel faydalar, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine büyük ölçüde katkı sağlamaktadır. Giyilebilir teknolojiler ve taşınabilir medikal cihazlar gibi yenilikçi uygulamalarda termoelektrik modüller, kullanıcı deneyimini iyileştirirken aynı zamanda çevreye duyarlı enerji çözümleri sunmaktadır.

Termoelektrik modüllerin günümüzdeki en büyük dezavantajı düşük verimlilikleridir. Araştırmaların, özellikle malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanlarında, termoelektrik modüllerin verimliliğini artıracak yeni malzemeler geliştirmeye odaklanması büyük önem taşımaktadır. Bu sayede, modüllerin daha geniş alanlarda ekonomik olarak kullanılabilirliği sağlanabilir. Yarı iletkenler, termoelektrik cihazların performansında belirleyici bir rol oynamaktadır. Yüksek Seebeck katsayısına sahip yeni yarı iletken malzemelerin keşfi, termoelektrik jeneratörlerin enerji dönüşüm kapasitelerini ciddi ölçüde artırabilir. Termoelektrik modüller özellikle atık ısı geri kazanımında önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, sanayi tesislerinde bu modüllerin kullanımı artırılarak enerji verimliliği sağlanabilir. Şirketler, üretim süreçlerindeki atık ısıları elektrik enerjisine dönüştürmek için

termoelektrik modülleri entegre edebilir ve böylece hem maliyet tasarrufu sağlayabilir hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunabilir. Termoelektrik modüller, güneş enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji sistemlerine entegre edilerek bu sistemlerin verimliliğini artırabilir. Güneş panellerinin açığa çıkardığı fazla ısıyı geri kazanmak veya jeotermal kaynaklardan elde edilen düşük sıcaklıklı enerji ile termoelektrik üretim yapmak, enerji sektöründe önemli ilerlemeler sağlayabilir. Giyilebilir teknolojilerde, taşınabilir tıbbi cihazlarda ve küçük elektronik aletlerde termoelektrik modüllerin kullanımı artırılmalıdır. Vücut ısısını elektrığe çevirme gibi uygulamalar hem enerji tasarrufu sağlarken hem de pil ömrünü uzatarak kullanıcı deneyimini iyileştirebilir. Hükümetler, termoelektrik teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için teşvik ve hibe programları sunabilir. Enerji verimliliğini artıracak projelere sağlanacak mali destek, özellikle otomotiv ve endüstriyel sektörlerde bu teknolojinin kullanımını yaygınlaştırabilir.

Gelecekte, termoelektrik malzemelerin ve tasarımların gelişmesiyle birlikte bu teknolojinin enerji dönüşüm verimliliği artacak ve daha geniş bir yelpazede kullanılabilir hale gelecektir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre çalışabilen bu modüller, küresel enerji dönüşümünde kilit bir rol oynayabilir. Teknolojinin gelişimine paralel olarak, termoelektrik modüllerin kullanım alanları daha da genişleyebilir ve dünya genelinde enerji verimliliğini artırma çabalarına önemli katkılar sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Attar, A., Lee, H. S., & Weera, S. (2015). Experimental Validation of the Optimum Design of an Automotive Air-to-Air Thermoelectric Air Conditioner (TEAC). *Journal of Electronic Materials*, 44(6), 2177–2185. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3750-4>
- Candolfi, C., Oualid, S. El, Ibrahim, D., Misra, S., Hamouli, O. El, Léon, A., Dauscher, A., Masschelein, P., Gall, P., Gougeon, P., Semprimoschnig, C., & Lenoir, B. (2021). Thermoelectric materials for space applications. *CEAS Space Journal*, 13(3), 325–340. <https://doi.org/10.1007/s12567-021-00351-x>
- Chen, W. Y., Shi, X. L., Zou, J., & Chen, Z. G. (2021). Wearable fiber-based thermoelectrics from materials to applications. *Nano Energy*, 81(October 2020), 105684. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105684>
- Chen, W. Y., Shi, X. L., Zou, J., & Chen, Z. G. (2022). Thermoelectric coolers for on-chip thermal management: Materials, design, and optimization. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 151(August), 100700. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2022.100700>
- Das, A. K. (2018). *A Review on Thermoelectric Effects and Phenomenon*. 08(09),

- Gastelo-Roque, J. A., & Morales-Acevedo, A. (2017). Design of a photovoltaic system using thermoelectric Peltier cooling for vaccines refrigeration. *2017 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference, URTC 2017, 2018-Janua*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/URTC.2017.8284211>
- Hacı, M., & Kahraman, Z. (2016). Termoelektrik sistemli yemek taşıma modülü tasarımı ve analizi. *Journal of FCE*, 4(December), 65–71.
- Li, C., Luo, Y., Li, W., Yang, B., Sun, C., Ma, W., Ma, Z., Wei, Y., Li, X., & Yang, J. (2024). The on-chip thermoelectric cooler: advances, applications and challenges. *Chip*, 3(2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.chip.2024.100096>
- Liu, H., Zhao, X., Li, G., & Ma, X. (2022). Investigation of a novel separately-configured micro-thermoelectric cooler to enabling extend application scope. *Applied Energy*, 306(PB), 117941. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117941>
- Pourkiaei, S. M., Ahmadi, M. H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L., Pour Yazdi, M. A., & Kumar, R. (2019). Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*, 186, 115849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.179>
- Raghav, A., Rajendran, S., Shetty, P. B., Kirana, B. R., Damaruganath, P., Shashanka, D., Bhat, S., & Chandrashekar, A. (2013). A simple and intelligent nonlinear PID temperature control with ambient temperature feedback for nonlinear systems. *2013 International Conference on Circuits, Controls and Communications, CCUBE 2013*. <https://doi.org/10.1109/CCUBE.2013.6718568>
- Shoeibi, S., Kargarsharifabad, H., Sadi, M., Arabkoohsar, A., & Mirjalily, S. A. A. (2022). A review on using thermoelectric cooling, heating, and electricity generators in solar energy applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PB), 102105. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102105>
- Sonal Renge, Yashika Barhaiya, Shikhar Pant, & Shubham Sharma. (2017). A Review on Generation of Electricity using Peltier Module. *International Journal of Engineering Research And*, V6(01), 453–457. <https://doi.org/10.17577/ijertv6is010308>
- TOREN, M., & MOLLAHANNOGLU, H. (2022). Termoelektrik Soğutma Sisteminin Alternatif Transformatör Soğutma Sistemi Olarak Performansı. *European Journal of Science and Technology*, 32, 498–507. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1039820>
- Tosun, A., Yöneten, P., Can, D., & Çolpan, Ö. (2014). *TERMOELEKTRİK Modül Kullanarak Soğutma Kabi Tasarimi Ve Deneyisel ÇalışmasBitirmeProjesi*.
- Wang, L., & Zhang, K. (2020). Textile-Based Thermoelectric Generators and Their Applications. *Energy and Environmental Materials*, 3(1), 67–79.

<https://doi.org/10.1002/eem2.12045>

- Yu, Y., Zhu, W., Kong, X., Wang, Y., Zhu, P., & Deng, Y. (2020). Recent development and application of thin-film thermoelectric cooler. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 14(4), 492–503. <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1829-9>
- Zaferani, S. H., Sams, M. W., Ghomashchi, R., & Chen, Z. G. (2021). Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: Design, optimization, and advancement. *Nano Energy*, 90(PA), 106572. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106572>
- Zhang, H., Kong, W., Dong, F., Xu, H., Chen, B., & Ni, M. (2017). Application of cascading thermoelectric generator and cooler for waste heat recovery from solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 148, 1382–1390. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.089>

Seralarda Isı Pompası Kullanımı

Muhammed Asım KESERCİOĞLU¹

Sinan ÇOBANER²

Yasin AKIN²

- 1- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. mkesercioglu@subu.edu.tr ORCID No: 0009-0003-3751-4224
- 2- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. sinancobaner@subu.edu.tr ORCID No: 0009-0000-6821-4265
- 3- Arş. Gör.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. yasinakin@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3201-379X

ÖZET

Bu çalışma, seralarda ısı pompası kullanımının enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet avantajlarını incelemektedir. Isı pompaları, seralarda sıcaklık yönetimini sağlarken geleneksel ısıtma sistemlerine göre daha az enerji tüketimi ve daha düşük karbon salınımı sunmaktadır. Bu sistemler, enerji tüketimini düşürür ve sera gazı emisyonlarını minimuma indirerek, modern tarımsal uygulamalar için sürdürülebilir bir seçenek oluşturmaktadır. Araştırmada, hava kaynaklı, toprak kaynaklı, su kaynaklı, hibrit, jeotermal ve güneş destekli ısı pompalarının sera uygulamalarındaki etkinliği karşılaştırılmıştır.

Hava kaynaklı ısı pompaları, kurulum maliyetlerinin düşüklüğü ve esneklikleriyle küçük ve orta ölçekli seralarda tercih edilen bir çözüm sunarken, soğuk iklimlerde performans düşüşü yaşanabilir. Toprak ve su kaynaklı ısı pompaları, enerji verimliliklerinin yüksekliği ve stabil performanslarıyla büyük ölçekli seralar için uzun vadeli sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır, ancak yüksek kurulum maliyetleri dezavantajdır. Hibrit sistemler, enerji verimliliği ve esneklik sağlayarak hem soğuk hem de ılıman iklimlerde avantajlıdır. Güneş destekli ısı pompaları ise, özellikle güneşli bölgelerde, işletme maliyetlerini büyük oranda düşüren yenilenebilir bir çözüm sunar.

Sonuç olarak her ısı pompası türü; iklim koşulları, kurulan seranın büyüklüğü, harcanan enerji maliyetleri gibi faktörlere göre değerlendirilmelidir. Isı pompası teknolojisinin doğru seçimi, seralarda sürdürülebilir tarım uygulamalarına önemli katkılar sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler – Sera, Isı Pompası, Isıtma, Verimlilik, Tarım

GİRİŞ

Günümüzde enerji talebinin artması ve iklim değişikliği gibi sorunlar, tarımsal üretimde enerji verimliliğini artıracak çözümlere olan ilgiyi arttırmaktadır (Ataman, 2007). Seracılık, kontrollü ortam koşulları ile bitki yetiştiriciliğini optimize ederken, bu sistemlerin enerji tüketimi önemli bir gider kalemi oluşturur. Geleneksel enerji kaynaklarının yüksek maliyetleri ve çevreye zararları göz önüne alındığında, alternatif enerji yönetimi yaklaşımları giderek daha önemli hale gelmektedir. Dolayısıyla, sera ortamında sıcaklık kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan ısı pompaları hem enerji verimlilikleri hem de çevre dostu olmaları sebebiyle mantıklı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Oguni, 2010).

Isı pompaları, çevredeki ısıyı toplayarak bir başka ortama taşıyan cihazlardır. Geleneksel ısıtma ve soğutma sistemlerinin aksine, ısı pompaları düşük enerji tüketimiyle yüksek verim sağlar. Bu özellikleri sayesinde, sera

uygulamalarında enerji tüketiminin azaltılması ve sera gazı emisyonunun düşürülmesi için etkili bir çözüm sunmaktadırlar (Stafell vd., 2012).

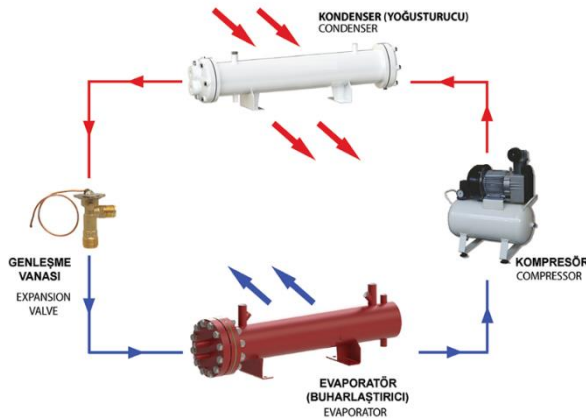
Isı pompaları, dış ortamdan enerji alarak düşük sıcaklıkta bulunan bir ortamdan ısıyı alıp, ısı alınan ortama göre daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama aktarabilen cihazlardır. Kış aylarında ısıtma amaçlı kullanılan bu sistemler, yaz aylarında da soğutma işlevi görebilir. Bu çok yönlü kullanım, ısı pompalarının enerji verimliliğini artırarak hem soğutma hem de ısıtma gereksinimlerini karşılamasına olanak tanır. (Ni vd., 2015).

Isı pompaları, buhar sıkıştırma çevrimini kullanır. Şekil 1’de çevrimin şematigi örnek olarak verilmiştir. Bu çevrim, soğutma ve ısıtma amaçlı çalışan ısı pompalarının temel prensibini oluşturur. Temel olarak, bir soğutucu akışkanını kullanarak ortamdan aldığı ısıyı bir çevrim içinde dolaştırır. Bu sistemin temel parçaları evaporatör, kompresör, kondenser ve genişleme valfidir. Çevrim dört temel aşamadan oluşur. Buharlaştırma: Isı pompası, soğutucu akışkanını (genellikle düşük basınç ve sıcaklıktaki bir sıvı) dışarıdaki su, hava, toprak gibi ısı sağlayan bir kaynaktan ısı alacak şekilde dolaştırır. Bu aşamada, akışkan buharlaştırıcıda buharlaşarak ısıyı soğurur (Aikins vd., 2013). Şekil 2’de ise ısı pompalarının şematik gösterimi yer almaktadır.

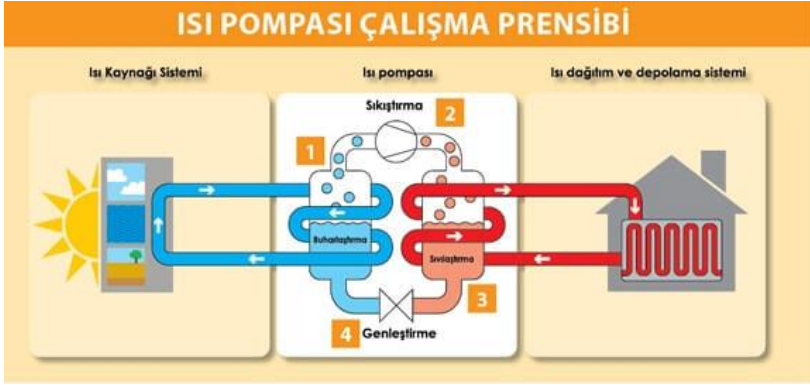
Sıkıştırma: Buharlaştırıcıda ısıyı emen ve buharlaşan soğutucu akışkan, bir kompresöre gönderilir. Kompresör, soğutucu akışkanın basıncını artırarak sıcaklığını da yükseltir. Bu aşamada akışkan gaz halindedir ve yüksek sıcaklık ve basınç seviyesine ulaşır.

Yoğuşurma: Kompresörden çıkan yüksek sıcaklık ve basınçtaki buhar, kondensere girer. Burada soğutucu akışkan, ısıyı hedef ortama (örneğin seranın içinde bulunan havaya) aktarır ve bu süreçte yoğuşarak tekrar sıvı hale gelir.

Genleştirme: Sıvı hale gelen soğutucu akışkan, genişleme valfinden geçer. Genişleme valfi, soğutucu akışkanın basıncını düşürür ve sıcaklığını düşürerek tekrar buharlaştırıcıya döner. Bu aşamada çevrim tekrar başlar.



Şekil 1. Temel soğutma çevrimi



Şekil 2. Isı pompasının şematik gösterimi

Soğutma makineleri ve ısı pompaları temelde aynı çevrimi gerçekleştirirler de kullanım amaçları arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bir soğutma makinesinin temel maksadı, düşük sıcaklıktaki ortamdan ısı çekerek, ortam sıcaklığını çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Bu süreçte çevreye ya da sıcaklığı yüksek olan bir ortama ısı geçişi gerçekleşir. Bu işlem çevrimin tamamlanması için zorunludur ve asıl amaç değildir (Ünlü, 2005).

Isı pompalarının temel amacıysa, bir ortamı sıcak tutmaktır. İşlem esnasında düşük sıcaklıkta bulunan bir ısı enerji kaynağından elde edilen ısı, ısıtılması gereken alana transfer edilir. Genellikle bu enerji kaynakları, soğuk hava, kuyu suyu veya toprak gibi düşük sıcaklıktaki depolar olarak kullanılırken, ısıtılmak istenen ortam genellikle bir evin iç mekanlarıdır. Bu sistemler, enerji verimliliğini sağlamada etkili bir yöntem sunar. Bunun yanında konforlu bir yaşam alanı oluşturulmasına yardımcı olur (Chua, 2010).

Isı pompalarının performansını tanımlayan en önemli parametrelerden biri etkinlik katsayısı (COP) değeridir (Tong, 2010). COP, bir ısı pompasının harcadığı bir birim enerji karşılığında ne kadar ısı taşıyabileceğini ifade eder. Buhar sıkıştırma çevrimini kullanan ısı pompaları, yüksek COP değerleri ile enerji verimliliği sağlar (Ertesvåg, 2011).

Isı pompası sistemlerinde, buharlaştırıcıların ısı aldığı kaynaklara “ısı kaynakları” denir. Isı kaynaklarının ısı pompasıyla uyumlu olması, sistemin verimliliği ve performansı açısından büyük önem taşır. Uyum sağlamak için gereken koşullar, aşağıda belirtilen faktörlere bağlıdır. (Sarbu, 2014):

- Kaynak sıcaklığının mümkün olduğunca büyük olması ve sabit kalması,
- Kaynağın kolay erişilebilir olması ve coğrafi koşullardan en az şekilde etkilenmesi,
- Kaynağın kirletici maddeler içermemesi,
- Korozyona yol açmaması

Seralarda ısıtma sistemi olarak merkezi ısıtma, soba, elektrik enerjisiyle ısıtma, sıcak havayla ısıtma, doğal enerji kaynaklarından yararlanma (güneş, jeotermal kaynaklar), atık enerjiden yararlanılarak ısıtma gibi birçok alternatif

kullanılmaktadır (Cuce, 2016). Isı pompaları uzun zamandır enerji açısından verimli ısıtma ve soğutma sistemleri olarak yaygın olarak kabul edilmektedir ve 1970'lerin başındaki petrol krizinden bu yana sera ısıtması için önerilmektedir (Byun vd., 2006; Nisbet vd., 1977). Ancak, ısı pompaları o dönemde performans katsayılarının (COP) düşük ve yüksek kurulum maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmamıştır (Kozai, 1986; Sami vd., 1994). Bununla birlikte, enerji maliyetleri arttıkça ve teknik ilerlemeler kaydedildikçe, ısı pompaları artık alternatif bir ısıtma sistemi olarak yeniden değerlendirilmeye başlanmıştır. Sürdürülebilir olması, giriş maliyeti diğer seçeneklere göre daha yüksek olsa da işletme maliyetinin yüksek olmaması, çevre dostu olması, çift yönlü çalışması gibi birçok seçenek ısı pompasının seçilmesinde öncülük etmektedir (Kozai vd., 2009). Düşük yatırım ve işletme maliyetleri de ısı pompası sistemlerinin etkinliği için kritik öneme sahiptir (Hájovský, 2008).

Seralarda kullanılacak ısı pompası sisteminin tasarımında tarımın yapıldığı bölgeden toprağın özelliklerine, yetiştirilen ürünlerin ihtiyaç duyduğu çeşitli koşullara kadar bir dizi coğrafi ve ürüne özgü faktör gibi belirleyici sınırlar bulunmaktadır. Yatırımla ilgili maliyetlerin yanı sıra, kullanılacak ekipmanlar da tasarımı sınırlayan unsurlar arasındadır. Isı kaynağının seçimi, ısı pompaları açısından önemli bir farklılıktır. İdeal bir ısı kaynağı, yüksek ve sabit bir sıcaklığa sahip olmalı, kolayca erişilebilir olmalı ve coğrafi koşullardan en az şekilde etkilenmelidir. Ayrıca, bu kaynaklar korozyon ve kirlenici maddeler içermemeli ve gerekli termofiziksel özelliklerde olmalıdır.

Bu çalışmada, seralarda ısı pompası kullanımının avantajlarını ve dezavantajlarını inceleyecek, farklı tiplerin karşılaştırması yapılacaktır. Isı pompası teknolojisi, sera sistemlerinde daha sürdürülebilir ve ekonomik bir enerji yönetimi sunarak gelecekte önemli bir rol oynamaya adaydır.

Isı kaynağının bulunabilirliği, çoğu durumda en önemli faktördür. Sera sistemlerinde kullanılan ısı pompası türleri arasında su, toprak kaynaklı, hava kaynaklı, hibrit, güneş destekli ve jeotermal ısı pompaları yer almaktadır. Bu çeşitlilik, sera iklim kontrolünün etkinliğini artırmak ve enerji verimliliğini sağlamak amacıyla çeşitli seçenekler sunar.

Her bir kaynağın farklı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Hava Kaynaklı Isı Pompaları

Havayı kaynak olarak kullanan ısı pompaları, dış ortam havasından ısı çekerek seranın içindeki havayı ısıtmak veya soğutmak için kullanılır (Auce vd., 2021).

Avantajları:

- Hava kaynaklı ısı pompalarının kurulumu diğer sistemlere (özellikle su ve toprak kaynaklıya) göre daha basittir ve kazı ya da sondaj gerektirmez. Bu da ilk yatırım maliyetlerini düşürür.

- Dezavantajları:***

-
- Hava Kaynaklı Isı Pompası**

353

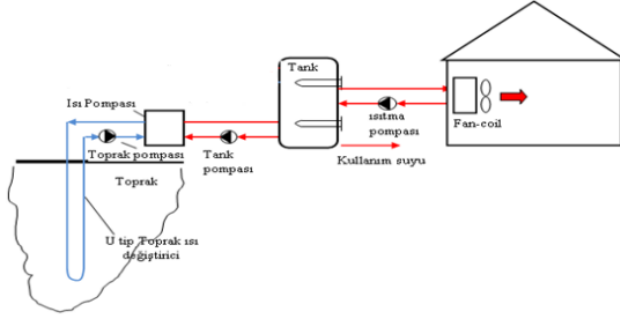
Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Bu tür ısı pompaları, yer altına döşenen borular aracılığıyla toprakta mevcut olan ısıyı toplar ve bu ısıyı seraya aktarır. Yer altına yerleştirilen boruların içinden soğutucu akışkan geçirilir. Toprak sıcaklığı yıl boyunca nispeten sabit olduğu için bu borular, topraktaki ısıyı emer ve akışkan buharlaşır. Topraktan toplanan buharlaşmış akışkan, kompresör yardımıyla sıkıştırılır. Bu işlem akışkanın sıcaklığını ve basıncını artırır. Sıkıştırılmış ve ısınmış olan akışkan, seranın iç ortamına ısıyı vermek üzere kondansatöre girer. Burada akışkan yoğuşur, yani sıvı hale geçer ve ısı seranın içine aktarılır. Yoğuşmuş sıvı haldeki soğutucu akışkan, genişleme valfinden geçerek tekrar düşük sıcaklık ve düşük basınca ulaşır. Bu noktada akışkan, borulara geri döner ve çevrim tekrar başlar (Chai vd., 2012).

Toprak kaynaklı ısı pompaları, boruların yerleşimine göre iki farklı kurulum şekline sahip olabilir:

Dikey yerleşim: Daha derin sondajlar yapılarak borular dikey olarak toprağa yerleştirilir. Bu yöntem, daha az alan gerektirir ancak sondaj maliyeti yüksektir.

Yatay yerleşim: Yüzeye daha yakın bir derinlikte borular yatay olarak toprağa döşenir. Dikey yerleşime göre daha düşük maliyetlidir, ancak geniş bir alana ihtiyaç duyar.



Şekil 4. Toprak kaynaklı ısı pompası şematik gösterimi

Avantajları:

- Toprak sıcaklıkları yıl boyunca neredeyse sabit kalır, bu da toprak kaynaklı ısı pompalarının enerji verimliliğinin çok yüksek olmasını sağlar. Dış hava sıcaklığından bağımsız olarak çalıştığı için performans kaybı yaşanmaz.
- Hava kaynaklı ısı pompalarının aksine, soğuk havalarda verimlilik kaybı olmaz. Toprağın sıcaklığı yıl boyunca daha sabit olduğundan, bu sistemler kışın bile yüksek verimlilikle çalışır.
- İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasına rağmen, enerji tüketimi çok düşük olduğu için uzun vadede işletme maliyetleri düşüktür. Bu, özellikle büyük ölçekli seralarda enerji tasarrufu sağlar.

- Toprak kaynaklı ısı pompaları uzun ömürlü sistemlerdir. Yer altındaki borular genellikle 50 yıla kadar dayanıklıdır ve dış etkenlere maruz kalmazlar. Bunun sonucunda sistem daha az bakım gerektirir.
- Toprak kaynaklı ısı pompaları, fosil yakıt kullanmadan çalışır. Karbon salınımı oldukça düşüktür ve yenilenebilir enerji kaynağıdır.
- Toprak kaynaklı ısı pompaları, seraları ısıtmak ve soğutmak için kullanılabilir. Tersinir çevrim sayesinde yaz aylarında soğutma sağlamak için kullanılabilirler (Omer, 2008).

Dezavantajları:

- Toprak kaynaklı ısı pompalarının kurulumu, hava kaynaklı sistemlere kıyasla çok daha pahalıdır. Toprağa boru döşenmesi, sondaj yapılması gibi işlemler önemli maliyet gerektirir. Bu nedenle küçük ölçekli seralarda tercih edilmesi zor olabilir.
- Yatay yerleşim tercih edilirse geniş bir araziye ihtiyaç duyulur. Dikey yerleşim içinse sondaj yapılması gerektiği için bu yöntem genellikle daha maliyetlidir. Bu kurulum, özellikle mevcut seralarda oldukça zor olabilir.
- Toprağın yapısı ve durumu (örneğin kayalık veya çok kuru toprak) ısı transferini etkileyebilir. Bazı toprak türlerinde verimlilik düşebilir ve bu da sistemin etkinliğini azaltabilir.
- Yer altına döşenen borularda bir sorun çıkarsa, bu borulara erişim oldukça zordur. Korozyon veya sızıntı gibi durumlar, onarım sürecini maliyetli hale getirebilir.
- Yüksek ilk yatırım maliyeti nedeniyle, sistemin enerji tasarrufu ile yatırımın karşılanma süresi uzun olabilir. Bahsedilen süre büyük projelerde kabul edilebilir olsa bile, küçük seralar için geri dönüş süresi uzayabilir (Fujii vd., 2009).

Su Kaynaklı Isı Pompaları

Kaynak olarak suyu kullanan ısı pompaları, su kütlelerinden (nehir, deniz, göl veya yeraltı suyu gibi) ısıyı alarak seraların ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılayan sistemlerdir. Bu pompalar, suyun genellikle yıl boyunca sabit sıcaklıkta kalması sayesinde yüksek enerji verimliliği sunar. Özellikle su kaynaklarına yakın seralarda tercih edilirler. Sistem, bir su kütlesinden ısıyı alır ve seranın iç ortamına taşır. Isı pompası, su kütlesinden toplanan ısıyı buharlaştırıcıda (evaporatör) soğutucu akışkana aktarır. Su, genellikle göl, nehir, yeraltı suyu veya deniz gibi doğal bir kaynaktan çekilir. Soğutucu akışkan, suyun ısınıp emerek buharlaşır. Buharlaştırıcıda ısınan ve buharlaşan soğutucu akışkan, kompresör yardımıyla sıkıştırılır. Bu işlem sonucunda akışkanın sıcaklığı ve basıncı yükselir. Sıkıştırılmış yüksek sıcaklıktaki akışkan, kondensere girerek seranın iç ortamına ısıyı bırakır. Bu işlem sırasında akışkan, yoğunlaşarak tekrar sıvı hale gelir ve seranın iç ortamını ısıtır. Akışkan genişleme valfine girer, basıncı düşer ve sıcaklığı azalır. Bu noktada, akışkan yeniden su kaynağından ısı almak için buharlaştırıcıya geri döner ve

çevrim tekrar başlar. Su kaynaklı ısı pompaları tersinir çevrimle çalışabilir, bu da yaz aylarında serayı soğutmak için kullanabilecekleri anlamına gelir. Bu durumda, sistem suya ısıyı aktararak seranın iç ortamını serinletir (Chen vd., 2011).



Şekil 5. Su kaynaklı ısı pompası şematik gösterimi

Avantajları:

- Su kaynaklı ısı pompaları, suyun sabit sıcaklığından faydalandıkları için çok yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Su kaynakları, yıl boyunca daha stabil sıcaklıklara sahip oldukları için, bu sistemler dış ortam sıcaklıklarından bağımsız olarak verimli çalışır.
- Su kaynaklı ısı pompaları, mevsim değişikliklerinden etkilenmez. Sıcaklık dalgalanmaları minimum düzeyde olduğunda, kış ve yaz aylarında sabit ve güvenilir bir performans sunar.
- Su kaynaklı ısı pompaları, ters çevrimle hem ısıtma hem de soğutma yapabilir. Yaz aylarında serayı soğutmak için kullanılabilirler.
- Toprak kaynaklı ısı pompalarının aksine, geniş bir toprak alanı veya sondaj ihtiyacı yoktur. Su kaynağı yakınlarında kurulabilir ve toprak kaynaklı sistemlere göre daha az yer kaplar.
- Doğru kurulmuş bir su kaynaklı ısı pompası uzun ömürlüdür. Suyu yerleştirilen boru sistemleri dayanıklı olup, bakım gereksinimi azdır.
- İlk kurulum maliyeti yüksek olsa bile, işletme sırasında enerji tüketimi düşük olduğundan uzun vadede maliyeti avantajlıdır. Su kaynaklarının sabit sıcaklıkları, ısı pompalarının daha az enerji tüketmesine olanak tanır (Kavanaugh, 1991).

Dezavantajları:

- Su kaynaklı ısı pompaları, su kütlelerine yakın seralarda kullanılabilir. Nehir, göl, deniz veya yeraltı suyu gibi su kaynakları olmayan bölgelerde bu sistemin kullanımı mümkün değildir.

- Su kaynaklı ısı pompalarının kurulumu, hava kaynaklı sistemlere göre daha pahalıdır. Boruların suya yerleştirilmesi ve sistemin kurulması, ciddi bir yatırım maliyeti gerektirir.
- Su kaynaklarının kirlilik riski, sistemin performansını etkileyebilir. Ayrıca, nehir ve göl suları kışın donabilir, bu da sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilir. Donma sorunu deniz suyu için geçerli olmasa da, nehir ve göller için bir dezavantajdır.
- Suya yerleştirilen boru sistemlerinin bakım ve onarımı zor olabilir. Korozyon veya boru sisteminde tıkanıklık gibi durumlar bakım maliyetlerini artırabilir. Ayrıca, suların kirlenmesi veya yabancı maddelerle tıkanması sistemin verimliliğini düşürebilir.
- Su kaynaklı sistemlerin kurulumu teknik açıdan karmaşık olabilir. Suya yerleştirilen boruların doğru döşenmesi ve sistemin dengeli çalışması için profesyonel bir kurulum gereklidir.
- Su kaynaklı sistemler, su kütleleri üzerinde çevresel etkiler yaratabilir. Özellikle doğal ekosistemlerde bu tür sistemlerin kullanımı, çevresel düzenlemelere tabi olabilir (Kavanaugh, 1989).

Hibrit Isı Pompaları

Hibrit ısı pompalarının çalışma prensibi, birden fazla ısı kaynağını kullanarak enerji verimliliğini optimize etmek üzerine kuruludur. Sistemde, farklı çevrimler ve kaynaklar arasında geçiş yapılarak en uygun ısıtma veya soğutma kaynağı kullanılır. Hibrit sistemde genellikle iki ana kaynak bulunur: Hava kaynaklı ısı pompası ve ek ısı kaynağı (örneğin, toprak kaynaklı ısı pompası veya geleneksel bir gazlı kazan). Sistem, dış ortam koşullarına ve enerji ihtiyacına bağlı olarak en verimli kaynağı seçer. Örneğin, hava kaynaklı ısı pompası uygun dış hava sıcaklığında çalıştırılır, ancak hava sıcaklığı düştüğünde daha verimli olan toprak veya gazlı sistem devreye girer. Hibrit ısı pompaları, hava kaynaklı çevrimin yanı sıra toprak ya da su kaynaklı çevrimle birlikte çalışabilir. Hava sıcaklığı düştüğünde, sistem otomatik olarak daha verimli olan toprak veya su kaynağına geçerek enerji tasarrufu sağlar. Hibrit ısı pompaları genellikle soğutma ve ısıtma amacıyla kullanılabilir. Bu, yaz aylarında soğutma ihtiyacı olduğunda hava kaynaklı ısı pompasının çalışmasını sağlar. Isıtma ihtiyacı arttığında ise sistem, daha verimli olan toprak veya geleneksel enerji kaynaklarına geçer. Hibrit ısı pompaları, enerji maliyetlerini ve verimliliği sürekli olarak izleyen akıllı sistemlerle donatılmıştır. Bu sistemler, hangi kaynağın ne zaman kullanılacağını hesaplar ve seranın enerji ihtiyacını en verimli şekilde karşılar (Jeon vd., 2015).

Avantajları:

- Hibrit ısı pompaları, hava koşullarına göre en verimli enerji kaynağını seçerek çalışır. Örneğin, dış hava sıcaklığı uygun olduğunda hava kaynaklı sistem çalışır, ancak sıcaklık düştüğünde daha verimli

olan toprak kaynaklı sistem devreye girer. Bu durum enerji maliyetlerini optimize eder ve tasarruf sağlar.

- Hibrit ısı pompaları, birden fazla ısı kaynağına sahip oldukları için sistemin her koşulda verimli çalışmasını sağlar. Hava kaynaklı ısı pompalarının düşük verimli olduğu soğuk havalarda, daha güvenilir ve verimli olan toprak veya su kaynaklı sistem devreye girer.
- Hibrit ısı pompaları, çevre dostu enerji kaynaklarıyla (güneş enerjisi, toprak, su) entegre edilebildiği için karbon emisyonunu azaltır. Fosil yakıtların kullanımı minimal düzeyde tutulur.
- İlk yatırım maliyeti fazla olsa da hibrit sistemler uzun vadede enerji tasarrufu sağlar. Sistem, en uygun enerji kaynağını kullanarak enerji maliyetlerini düşürür ve işletme maliyetlerini azaltır.
- Hibrit ısı pompaları, seraları soğutmak ve ısıtmak için kullanılabilir. Tersinir çevrim sayesinde, yaz aylarında serayı soğutmak için hava kaynaklı ısı pompası kullanılırken, kış aylarında toprak kaynaklı sistemler devreye girebilir.
- Hibrit sistemler, düşük enerji tüketimi sayesinde uzun vadede işletme maliyetlerini düşürür. Özellikle büyük ölçekli seralarda, enerji maliyetleri hibrit sistemlerle önemli ölçüde azaltılabilir (Klein vd., 2014).

Dezavantajları:

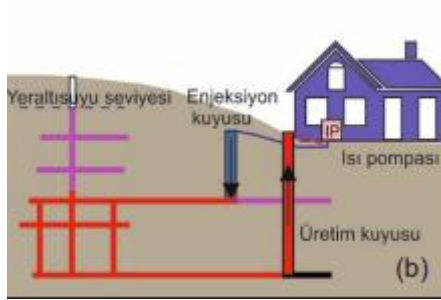
- Hibrit ısı pompalarının kurulumu, tek bir enerji kaynağına dayanan sistemlere göre daha pahalıdır. Birden fazla enerji kaynağını entegre eden ve enerji yönetimini sağlayan teknoloji, yüksek maliyetli olabilir. Bu nedenle, ilk yatırım maliyeti küçük ölçekli seralar için dezavantaj oluşturabilir.
- Hibrit ısı pompalarının kurulumu daha karmaşık olabilir. Hem hava kaynaklı hem de toprak veya su kaynaklı sistemlerin kurulumu, daha fazla alan ve teknik bilgi gerektirir. Ayrıca bu sistemlerin entegrasyonu ve yönetimi profesyonel bir kurulum gerektirir.
- Hibrit sistemlerde birden fazla kaynağın kullanılması nedeniyle, sistemin düzenli bakım ve izleme gereksinimi olabilir. Özellikle su veya toprak kaynaklı sistemlerin bakımı, hava kaynaklı sistemlere göre daha karmaşıktır.
- Hibrit sistemler, özellikle toprak kaynaklı sistemlerin entegre edilmesi durumunda geniş alanlara ihtiyaç duyabilir. Seraların bulunduğu yerin coğrafi koşulları hibrit sistemlerin kurulumunu zorlaştırabilir.
- Yüksek kurulum maliyeti nedeniyle, hibrit sistemlerin geri ödeme süresi uzayabilir. Bu, özellikle küçük ölçekli seralarda hibrit sistemlerin kullanımını kısıtlar. Ancak büyük ölçekli projelerde bu süre kabul edilebilir (Klein vd., 2014).

Jeotermal Isı Pompaları

Jeotermal kaynaklı ısı pompaları, yerin derinliklerinden gelen doğal ısıyı kullanarak seraların ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılayan sistemlerdir. Bu pompalar, yeraltı sıcaklıklarının yıl boyunca sabit kalmasından faydalanır ve bu sıcaklık farklarını kullanarak enerji verimli bir şekilde çalışır. Seralarda kullanılan jeotermal ısı pompaları, düşük karbon salınımı ve uzun vadede enerji tasarrufu nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkar. Jeotermal ısı pompaları, toprak kaynaklı ısı pompalarıyla benzer bir çalışma prensibine sahip olsa da enerji kaynağı olarak yeraltı sıcaklıklarını veya jeotermal suyu kullanır (Öztürk, 2014).

Jeotermal ısı pompaları, yerin derinliklerindeki sabit sıcaklıklardan ısı toplamak için yeraltına borular yerleştirir. Bu boruların içinden dolaşan bir akışkan (genellikle su veya antifriz karışımı), toprak ya da jeotermal kaynaktan ısıyı alır ve buharlaştırıcıda (evaporatör) soğutucu akışkana aktarır. Isı pompası buharlaştırıcıda ısıyı emen soğutucu akışkanı kompresör yardımıyla sıkıştırır. Bu işlem, akışkanın basıncını artırır ve sıcaklığını yükseltir. Sıkışmış ve ısınmış olan akışkan, seranın iç ortamına ısıyı vermek için kondansatöre girer. Bu aşamada akışkan, ısınıp seraya aktarır ve yoğunlaşarak tekrar sıvı hale gelir. Yoğunlaşmış sıvı haldeki soğutucu akışkan, genişleme valfinden geçerek basıncı düşer ve sıcaklığı azalır. Bu noktada akışkan, tekrar yeraltına döner ve çevrim baştan başlar (Anifantis vd., 2016).

Jeotermal ısı pompaları, serayı ısıtmak için yeraltındaki sabit sıcaklıklardan faydalanırken, tersinir çevrim sayesinde yaz aylarında serayı soğutmak için de kullanılabilir. Yazın, seradan aldığı ısıyı yeraltına aktararak seranın iç ortamını serinletir (Hepbaşlı vd., 2004).



Şekil 6. Jeotermal ısı pompası şematik gösterimi

Avantajları:

- Jeotermal ısı pompaları, yeraltı sıcaklıklarının yıl boyunca sabit kalması nedeniyle çok yüksek enerji verimliliği sağlar. Mevsimsel sıcaklık değişimlerinden etkilenmediği için sürekli olarak stabil ve güvenilir bir performans sunar.
- Jeotermal ısı pompaları, enerji tüketimini büyük ölçüde azaltır. İlk yatırım maliyeti fazla olsa da işletme maliyetleri düşüktür ve uzun vadede büyük enerji tasarrufu sağlar.

- Fosil yakıtlara dayalı sistemlere kıyasla, jeotermal ısı pompaları çok daha çevre dostudur. Yenilenebilir kaynak olan yeraltı ısını kullanarak seranın ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılar. Bu da karbon salınımını önemli ölçüde azaltır.
- Jeotermal ısı pompaları, enerji tüketimi açısından oldukça verimli oldukları için işletme maliyetleri düşüktür. Elektrik tüketimleri düşük olduğundan, uzun vadede büyük enerji tasarrufu sağlar.
- Jeotermal sistemler uzun ömürlüdür. Yer altına yerleştirilen borular genellikle 50 yıla kadar dayanıklıdır ve sistemin genel bakımı oldukça azdır. Dış hava koşullarına maruz kalmazlar. Bu sebeple diğer sistemlere göre daha az aşınma ve yıpranma yaşanır.
- Jeotermal ısı pompaları, tersinir çevrim sayesinde soğutma ve ısıtma sağlayabilir. Bu, sistemin tüm yıl boyunca etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar (Self vd., 2013).

Dezavantajları:

- Jeotermal ısı pompalarının en büyük dezavantajlarından biri, kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Toprağa yerleştirilen boruların döşenmesi, sondaj yapılması ve jeotermal enerji kaynaklarına erişim maliyetlidir. Bu nedenle, küçük ölçekli seralar için başlangıç maliyeti yüksek olabilir.
- Jeotermal sistemlerin kurulumu için diğer sistemlere göre geniş bir alana ihtiyaç duyulur. Ayrıca, yeraltı boruları için dikey sondaj yapılması gerekebilir, bu da maliyeti ve kurulum süresini artırır. Yeterli yer ve jeotermal kaynakların olmadığı bölgelerde sistem kurulumu zor olabilir.
- Jeotermal sistemlerin performansı, yer altındaki toprak yapısına bağlıdır. Özellikle kayalık, kuru veya sıcaklığı daha az sabit olan topraklarda bu sistemin verimliliği azalabilir. Jeotermal enerji kaynağı olmayan bölgelerde kullanım sınırlıdır.
- Yüksek ilk yatırım maliyeti nedeniyle, jeotermal ısı pompalarının yatırım geri dönüş süresi uzundur. Ancak büyük ölçekli seralar ve uzun vadeli projeler için bu süre kabul edilebilir olabilir.
- Yer altına yerleştirilen boruların bakımı zor olabilir. Borularda bir sorun olması durumunda onarım işlemi pahalı ve karmaşık olabilir. Ayrıca yer altı sistemlerinde nadir de olsa korozyon riski bulunabilir (Self vd., 2013).

Güneş Destekli Isı Pompaları

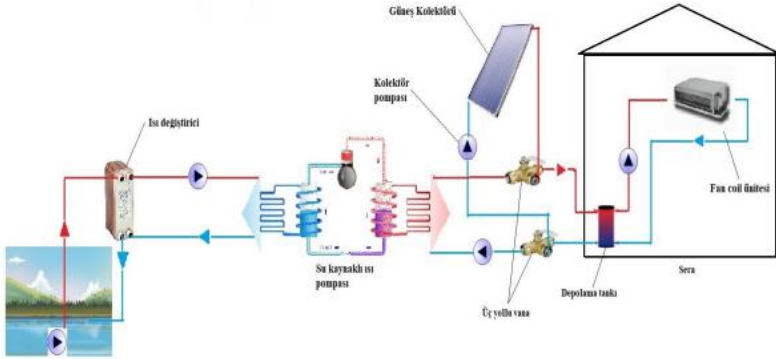
Güneş destekli ısı pompaları, seralarda hem güneş enerjisinden hem de ısı pompası teknolojisinden yararlanarak ısıtma ve soğutma sağlayan hibrit sistemlerdir. Bu tür sistemler, güneş enerjisini kullanarak ısı pompasının çalışma verimliliğini artırır ve enerji tüketimini azaltır. Güneş destekli ısı pompaları, özellikle sürdürülebilir tarım uygulamaları ve enerji maliyetlerini

düşürme hedefi olan seralarda tercih edilir. Güneş destekli ısı pompaları, güneş ile buhar sıkıştırma çevrimi kullanan bir ısı pompasını birleştirir. Bu hibrit sistem, güneş enerjisini ısı pompasının verimliliğini artırmak için kullanır (Sun vd., 2015). Sistem şu şekilde çalışır:

Sistem, genellikle çatıya veya seranın yakınına yerleştirilen güneş panelleri (termal kolektörler veya fotovoltaik paneller) aracılığıyla güneş enerjisini toplar. Fotovoltaik paneller elektrik üretir ve ısı pompasını çalıştırmak için lazım olan elektrik enerjisini sağlar. Termal kolektörler güneş enerjisini doğrudan ısı olarak toplar ve bu ısı, ısı pompasının çalışmasında kullanılır. Güneş enerjisi, ısı pompasının elektrik ihtiyacını karşılar veya soğutucu akışkanın ön ısıtılmasını sağlar. Bunun sonucunda ısı pompası daha az elektrik tüketerek çalışır. Isı pompası, dış ortamdan (hava, toprak, su) ısı toplayarak seranın içini ısıtır veya soğutur. Toplanan ısı, buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktarılır. Isı pompası, buharlaştırıcıda ısıyı emen soğutucu akışkanı kompresör yardımıyla sıkıştırarak sıcaklığını artırır. Bu sıcak akışkan, seraya ısıyı aktardığı kondansatörde yoğunlaşarak seranın içini ısıtır.

Güneş enerjisi, sistemin elektrik ihtiyacını karşıladığından veya soğutucu akışkanın ön ısıtılmasını sağladığından, ısı pompasının enerji tüketimi azalır. Özellikle güneşli günlerde, güneş enerjisinin yardımıyla ısı pompası daha az elektrik tüketir ve sistemin genel verimliliği artar.

Güneş destekli ısı pompaları, yaz aylarında tersinir çevrimle çalışarak serayı soğutabilir. Isı pompası, seradan aldığı ısıyı dışarı (veya toprak gibi bir kaynağa) transfer ederken güneş enerjisini bu işlemde de kullanabilir (Sun vd., 2015).



Şekil 7. Güneş destekli ısı pompası şematik gösterimi

Avantajları:

- Güneş destekli ısı pompaları, güneş enerjisini kullanarak ısı pompasının elektrik ihtiyacını büyük ölçüde azaltır. Özellikle güneşli bölgelerde, sistem enerji verimliliği açısından büyük avantaj sağlar.
- Güneş enerjisi ücretsiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olduğu için güneş destekli ısı pompaları, enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürür.

Güneş enerjisinin bol olduğu günlerde, ısı pompası neredeyse hiç elektrik kullanmadan çalışabilir.

- Fosil yakıtlara dayalı enerji kullanımı çok düşük olduğundan, güneş destekli ısı pompaları çevre dostudur ve sera gazı emisyonlarını azaltır. Yenilenebilir enerji kullanarak seraların karbon ayak izini düşürür.
- Tersinir çevrim sayesinde, güneş destekli ısı pompaları hem kış aylarında seraları ısıtmak hem de yaz aylarında seraları soğutmak için kullanılabilir. Bu da sistemin yıl boyunca verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.
- Güneş destekli ısı pompaları, ilk yatırım maliyeti fazladır ancak enerji maliyetlerindeki düşüş sayesinde uzun vadede maliyetlerini karşılar ve kârlı bir yatırım haline gelir. Güneş enerjisine dayalı sistemler, uzun ömürlü olup düşük işletme maliyetine sahiptir.
- Özellikle güneşli bölgelerde veya mevsimlerde, sistem maksimum performansla çalışır. Güneş enerjisiyle desteklenen ısı pompası, klasik ısı pompaları düşünüldüğünde daha az elektrik kullanır ve daha verimli olur (Li vd., 2014).

Dezavantajları:

- Güneş destekli ısı pompalarının kurulumu, sadece ısı pompası sistemine göre daha pahalıdır. Güneş panellerinin (fotovoltaik veya termal kolektörler) eklenmesi, sistemin ilk yatırım maliyetini artırır. Bu nedenle, başlangıç maliyeti küçük ölçekli seralar için yüksek olabilir.
- Güneş destekli ısı pompaları, hem güneş enerjisi toplama sistemleri (paneller) hem de ısı pompası sisteminin bir arada çalışmasını gerektirdiği için kurulum daha karmaşıktır. Sistem entegrasyonu ve optimizasyonu uzmanlık gerektirir.
- Güneşli günlerde sistem çok verimli çalışırken, bulutlu veya yağışlı havalarda performans azalabilir. Güneş enerjisinin sınırlı olduğu zamanlarda, sistemin enerji verimliliği azalır ve çok daha fazla elektrik tüketimi gerekebilir.
- Güneş enerjisinin gün boyunca sürekli olarak üretilmediği durumlarda (gece ve bulutlu günler), enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulabilir. Batarya veya termal enerji depolama sistemleri kurulmazsa, güneş enerjisi kullanımı sınırlı kalabilir.
- Güneş panelleri, özellikle termal kolektörler, düzenli temizlik ve bakım gerektirir. Panellerin toz, kir veya kar ile kaplanması verimliliklerini azaltabilir. Ayrıca, sistemdeki bütün elemanların düzgün çalışmasını sağlamak için periyodik bakım gerekir.
- İlk yatırım maliyeti fazla olduğu için, güneş destekli ısı pompalarının amortisman süresi diğer sistemlere göre daha uzun olabilir. Ancak enerji tasarrufu sayesinde bu maliyetler uzun vadede karşılanabilir (Yang vd., 2015).

SONUÇ

Seralarda kullanılan ısı pompaları, farklı iklim koşulları ve proje gereksinimlerine göre avantajlar ve dezavantajlar sunar. Hava kaynaklı ısı pompaları, düşük kurulum maliyeti ve tersinir çalışma özelliği sayesinde küçük ve orta büyüklükteki seralar için ideal bir seçenektir. Ancak, soğuk iklimlerde performans kaybı yaşanabilir ve ek ısıtma sistemleri gerekebilir. Toprak kaynaklı ısı pompaları, enerji verimliliğinin yüksek olması ve mevsimsel değişikliklerden etkilenmeyen stabil performansı ile özellikle büyük ya da uzun vadeli projelerde tercih edilir. Ancak yüksek kurulum maliyeti küçük ölçekli seralar için bir dezavantaj olabilir.

Su kaynaklı ısı pompaları, sabit su sıcaklıkları sayesinde yüksek enerji verimliliği sunar, ancak su kaynaklarına yakın olmayı gerektirir ve yüksek ilk yatırım maliyeti vardır. Hibrit ısı pompaları, farklı enerji kaynaklarını birleştirerek hem esneklik hem de enerji tasarrufu sağlar, ancak kurulum maliyeti ve karmaşıklığı nedeniyle büyük projelerde daha uygundur. Jeotermal ısı pompaları, uzun vadede düşük işletme maliyetleri ve çevre dostu yapısıyla sürdürülebilir bir çözümdür, ancak kurulum maliyeti ve yer altı sondajı gibi zorluklar küçük projelerde sınırlayıcı olabilir. Güneş destekli ısı pompaları ise güneş enerjisini kullanarak enerji verimliliğini artırır ve özellikle güneşli bölgelerde avantaj sağlar, ancak güneş enerjisine bağımlılık ve yüksek ilk yatırım maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır.

Genel olarak, proje ölçeği, iklim koşulları ve bütçe gibi faktörlere bağlı olarak doğru ısı pompası sistemi seçilmelidir. Büyük ölçekli ve uzun vadeli projelerde toprak, su, hibrit, jeotermal ve güneş destekli sistemler daha avantajlı olabilirken, düşük maliyetli ve daha kısa vadeli çözümler için hava kaynaklı sistemler öne çıkar.

REFERANSLAR

- Aikins, K. A., Lee, S.-H., & Choi, J. M. (2013). Technology review of two-stage vapor compression heat pump system. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 21(03). <https://doi.org/10.1142/S2010132513500114>
- Anifantis, A. S., Pascuzzi, S., & Scarascia-Mugnozza, G. (2016). Geothermal source heat pump performance for a greenhouse heating system: An experimental study. *Journal of Agricultural Engineering*, 47(3), 164-170. <https://doi.org/10.4081/jae.2016.544>
- Ataman, A. R. (2007). Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları (Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kamu Yönetimi ve Siyaset Bilimi Anabilim Dalı).
- Auce, A., Purvinskis, R., Kreslins, K., & Avots, E. (2021). Efficiency of air-to-air heat pumps in greenhouses. *Proceedings of the International Scientific Conference on Engineering and Technology Research (ETR)*. <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6521>

- Blázquez, C., Nieto, I. M., Carrasco García, J., Carrasco García, P., Farfán Martín, A., & González-Aguilera, D. (2023). Comparative analysis of ground source and air source heat pump systems under different conditions and scenarios. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16020889>
- Byun, J.-S., Jeon, C.-D., Jung, J.-H., & Lee, J. (2006). The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.06.008>
- Chai, L., Ma, C., & Ni, J.-Q. (2012). Performance evaluation of ground source heat pump system for greenhouse heating in northern China. *Biosystems Engineering*, 111(1), 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.002>
- Chen, J., Xu, F., Zhang, L., Yang, J., & Ai, Q. (2011). Design and experiment of surface water-source heat pump system for greenhouse heating based on thermal balance model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(11), 227-231.
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611-3624. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>
- Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34-59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>
- Ertesvåg, I. S. (2011). Uncertainties in heat-pump coefficient of performance (COP) and exergy efficiency based on standardized testing. *Energy and Buildings*, 43(8), 1937-1946. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.039>
- Fujii, H., & Ohyama, K. (2009). Application of ground source heat pumps for air conditioning of greenhouses. *IEA Heat Pump Centre Newsletter*, 27, 39-42.
- Hájovský, R., & Pieš, M. (2008). TRT system for heat pumps. In 2008 19th International Conference on Systems Engineering (pp. 109-114). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSEng.2008.85>
- Hepbasli, A., & Akdemir, O. (2004). Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 737-753. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00185-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00185-7)
- Jeon, J., Lee, D. G., & Kim, H. G. (2015). Study on heating performance of hybrid heat pump system using geothermal source and solar heat for protected horticulture. *Korean Society of Energy Science*, 35(5), 49-56. <https://doi.org/10.7836/KSES.2015.35.5.049>
- Kavanaugh, S. (1989). Design considerations for ground and water source heat pumps in southern climates. *ASHRAE transactions*, 95, 1139-1149.
- Kavanaugh, S. (1991). Ground-coupling with water source heat pumps.
- Klein, K., Huchtemann, K., & Müller, D. (2014). Numerical study on hybrid heat pump systems in existing buildings. *Energy and Buildings*, 69, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.032>
- Kozai, T. (1986). Thermal performance of an oil engine driven heat pump for greenhouse heating. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35(1), 25-37. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(86\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(86)90027-2)
- Kozai, T., Ohyama, K., Tong, Y., Tongbai, P., & Nishioka, N. (2011). Integrative environmental control using heat pumps for reductions in energy consumption

- and CO₂ gas emission, humidity control and air circulation. *Acta Horticulturae*, 893, 445-452. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.893.43>
- Nisbet, S. K., & Chee, K. K. (1977). The application of heat pumps to glasshouses. *Building and Environment*, 12(3), 165-174. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90014-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(77)90014-2)
- Omer, A. M. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344-371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Oguni, K. (2010). Seralar için ısı pompaları araştırması. *Tarımsal Meteoroloji*, 37(4), 317-322. <https://doi.org/10.2480/agrmet.37.317>
- Öztürk, M. (2014). Jeotermal ısıtım seracılık işletmelerinin projelendirilmesi: Manisa ili örneği (Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı).
- Sami, S. M., & Tulej, P. J. (1995). A new design for an air-source heat pump using a ternary mixture for cold climates. *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(6), 521-529. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(95\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0890-4332(95)90062-4)
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70, 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Staffell, I., Brett, D. J. L., Brandon, N., & Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science*, 5(11), 9291-9306. <https://doi.org/10.1039/C2EE22653G>
- Sun, X., Dai, Y., Novakovic, V., Wu, J., & Wang, R. (2015). Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water. *Energy Procedia*, 70, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.140>
- Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N., & Ohyama, K. (2010). Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering*, 106(4), 405-411. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.05.003>
- Ünlü, K. (2005). Hava ve toprak kaynaklı ısı pompalarına etki eden parametrelerin incelenmesi (Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı).

Yeşil Enerji Dönüşümünde Biyogazın Yeri: İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı

M. Raşit ATELGE¹

1- Doç. Dr. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Siirt Üniversitesi, Türkiye.
rasitelge@siirt.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0613-2501

ÖZET

Biyogaz, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak büyük ilgi görmüş ve yakın gelecekte kullanımı önemli ölçüde artacaktır. Tahminlere göre, 2012'de 14,5 GW olan biyogaz kullanımı 2025'de 33,5 GW'a ulaşacaktır. Biyogaz, ısı üretimi için kazanlarda, elektrik üretimi için yakıt hücrelerinde, araç yakıtı üretiminde ve doğal gaz şebekesine enjeksiyon gibi çeşitli alanlarda ham veya geliştirilmiş bir biçimde kullanılabilir. AB'de biyogazdan elektrik üretimi, 2020'de 22 TW h/yıl olarak gerçekleşmiş ve bu rakamın 640 TW h/yıla kadar çıkması beklenmektedir. Biyogaz, sera gazı emisyonlarını %60'a kadar azaltabilir ve araç yakıtı olarak kullanımı 2050'de %27'ye ulaşabilir. Farklı biyogaz kullanımı yöntemleri emisyon oranlarını etkiler; gaz motorları düşük emisyon üretirken, dizel motorlar yüksek emisyon gazları üretir. Biyogaz, fosil yakıtlara göre çok daha çevre dostu olup, enerji sistemlerinde güneş ve rüzgarla hibrit olarak kullanılabilir. En yaygın biyogaz kullanım yöntemi, kazanlar ve içten yanmalı motorlarla ısı ve elektrik üretimidir. Biyogaz verimi %75-85 arası değişen kazanlarla kullanılabilir ve dört zamanlı motorlar, herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duymadan biyogazla çalışabilir. Bununla birlikte, biyogazın verimliliğini artıran yöntemler arasında alevsiz yakma, HCCI ve çift yakıtlı motorlar bulunur. Alevsiz yakma yöntemiyle biyogazdan elde edilen elektrik verimliliği %53'e kadar çıkabilir. Ayrıca, biyogaz ve dizelin çift yakıtlı kullanımı, emisyonları azaltırken termal verimliliği artırır.

Anahtar Kelimeler – Yenilenebilir enerji, Biyogaz, Biyoyakıt teknolojileri, İçten yanmalı motorlar, Çift yakıtlı motorlar

GİRİŞ

Yeşil enerji dönüşümü, günümüzün en önemli çevresel ve ekonomik meselelerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı kaynakları ve bunların çevreye olan olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır (Szpilko & Ejdys, 2022). Bu bağlamda, biyogaz, organik atıkların anaerobik fermentasyonu sonucu elde edilen bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir (Filipović, Lior, & Radovanović, 2022). Biyogaz, hem ısı hem de elektrik üretiminde kullanılabilen çok yönlü bir enerji kaynağıdır ve içten yanmalı motorlar gibi teknolojilerle entegre edildiğinde, enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir.

Son yıllarda biyogazın kullanımı dünya genelinde önemli bir artış göstermiştir. 2025 yılında biyogazın küresel kullanımı 33.5 GW seviyesine ulaşması beklenirken, bu rakam 2012'de yalnızca 14.5 GW olarak kaydedilmiştir (Raboni & Urbini, 2014). Avrupa Birliği'nde, biyogazdan elektrik üretimi 2020 yılında 22 TW saat olarak gerçekleşmiş ve bu rakamın

gelecekte daha da artması öngörülmektedir (O'Connor et al., 2021; Szpilko & Ejdy, 2022). Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı, bu dönüşüm sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. İçten yanmalı motorlar, biyogazın enerjiye dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve düşük emisyon değerleri ile çevre dostu bir alternatif sunmaktadır.

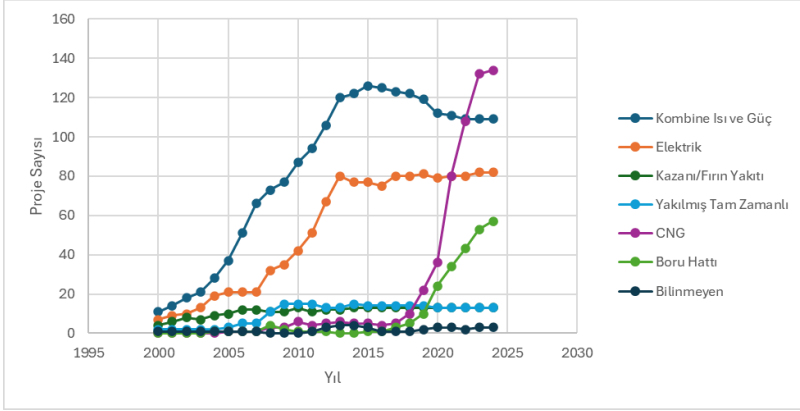
Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı, hem enerji üretiminde verimlilik sağlamak hem de sera gazı emisyonlarını azaltma hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, gaz motorları düşük emisyon gazları üretirken, dizel motorlar yüksek emisyon gazları yaymaktadır. Bu durum, biyogazın fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca, biyogazın diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla hibrit sistemlerde kullanılması, enerji sistemlerinin istikrarını artırma potansiyeline sahiptir.

Bu çalışma, yeşil enerji dönüşümünde biyogazın yerini ve içten yanmalı motorlarda kullanımını incelemeyi amaçlamaktadır. Biyogazın enerji üretimindeki rolü ve içten yanmalı motor teknolojileri ile entegrasyonu üzerine yapılan araştırmalar, sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, biyogazın potansiyeli ve uygulama alanları detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

BİYOGAZ KULLANIMI

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak biyogaz büyük ilgi görmüştür ve yakın gelecekte biyogaz kullanımı önemli ölçüde artacaktır. Tahminlere göre, 2012 yılında sadece 14,5 GW olan biyogaz kullanımı 2022 yılında küresel olarak 29,5 GW olacaktır (Raboni & Urbini, 2014). Biyogaz, ısı üretmek için bir kazanda, ısı ve güç üretmek için birleşik ısı ve güçte (CHP), elektrik üretmek için yakıt hücrelerinde, kimyasalların üretiminde, araç yakıtlarının üretiminde ve doğal gaz şebekesine enjeksiyon gibi farklı uygulamalarla ham veya iyileştirilmiş bir biçimde kullanılabilir (Hakawati, Smyth, Rosa, & Rooney, 2017; Holm-Nielsen, Al Seadi, & Oleskowicz-Popiel, 2009). AB'de biyogazdan elektrik üretimi 2020 yılında 22 TW h/yıl olarak öngörülmektedir (O'Connor et al., 2021). Üstelik bu rakamın 30 kattan fazla artarak 640 TW h/yıla ulaşması beklenmektedir (Brémond, Bertrandias, Steyer, Bernet, & Carrere, 2021). 2017 yılından sonra biyogaz kullanımı sayesinde sera gazı emisyonları %60 oranında azalacaktır (Ullah Khan et al., 2017). Ayrıca, araç yakıtı olarak biyogaz kullanımına ilişkin tahminler, 2017'de %2 olan oranın 2050'de %27'ye çıkabileceğini göstermektedir (Ullah Khan et al., 2017). ABD'de 2024 yılında 411 gübre bazlı biyogaz üretim tesisi bulunmaktaydı ve Şekil 1, 2000-2024 yılları arasında biyogaz kullanımını göstermektedir (EPA, 2024). 2017 yılı itibarıyla ABD'de boru hattı ve CNG biyogaz projelerinin sayısında farklı bir artış eğilimi görülmektedir. Bunun nedeni 2016 yılındaki yasal düzenlemeler

ve biyogazın tarımsal amaçlı yakıt olarak kullanımının yaygınlaşması olabilir.



Şekil 1: 2000'den 2024'e kadar ABD'de biyogaz kullanım eğilimi (EPA, 2024)

Biyogazdan elektrik üretmek için kullanılan farklı yöntemlerin yanma sürecinden kaynaklanan emisyon oranları üzerinde etkisi vardır. Örneğin, gaz motorları düşük emisyon gazları üretirken, ateşleme yağı kullanılan dizel motorların egzoz dumanlarında yüksek emisyon gazları bulunur. Elektrik üretimi 100 kW'ın altındaki motorlarda, 300 kW'ın üzerindeki elektrik üretimine kıyasla daha düşük elektrik verimliliğine ve yüksek oranda egzoz gazı emisyonuna sahiptir (Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016). Literatürde, elektrik üretimi için biyogaz kullanımının fosil yakıtlardan elektrik üretimine kıyasla çok daha çevre dostu olduğu açıkça belirtilmektedir.

Biyogaz, rüzgar ve güneşin yanı sıra enerji sistemlerini stabilize etmek için diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile hibrit olarak da kullanılabilir (Budzianowski, 2016). Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerde uzun süredir pişirme ve aydınlatma amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölümde, biyogazın kullanımı ve ilgili teknolojiler gözden geçirilecektir.

Kazanlar, Gaz Motorları ve Gaz Türbinleri

Kazanlar, biyogazdan ısı üretmenin en yaygın yoludur ve içten yanmalı motorlar, biyogaz enerji santrallerinde biyogazdan enerji üretimi için en ticarileştirilmiş süreçtir. Biyogazdan ısı üretimi için kazan verimleri %75 ile 85 arasındadır (Yang, Ge, Wan, Yu, & Li, 2014))(Krich et al., 2005). Tipik kazanlar, gaz-hava akış hızları ayarlanarak biyogaz kullanımı için modifiye edilebilir. Kazan kullanımının avantajı, H₂S nedeniyle bir temizleme işlemi gerektirmemesi ve kazanların düşük kaliteli biyogazı yakmak için kullanılabilmesidir (Kaparaju & Rintala, 2013). Doğal gaz için geliştirilmiş olan içten yanmalı motorlar, herhangi bir modifikasyon yapılmadan biyogaz için kullanılabilir. Dört zamanlı motorların kapasiteleri birkaç kW ile 10 MW arasındadır ve ömürleri yaklaşık 60.000 saattir; ancak elektrik verimleri %35 ile %40 arasında düşüktür (Atelge, 2021; Deublein &

Steinhauser, 2010). Biyogazdaki CO₂ konsantrasyonunun azaltılmasıyla verimlilikleri ve verimlilik önleme özellikleri artmaktadır (Kaparaju & Rintala, 2013). Aynı anda güç ve ısı üretimi için en yaygın sistem kombine ısı ve güç (CHP) tesisleri olarak bilinir. AB'de biyogaz tesislerinin yarısı dört zamanlı motorlarla çalışan CHP ünitelerine sahiptir ve bu motorların yarısı dizel motorlardır (Deublein & Steinhauser, 2010). Modern bir CHP tesisinin ısı ve güç verimliliği %85-90'dır (Kaparaju & Rintala, 2013); ancak elektrik verimliliği %40'ın altındadır ve 1 m³ biyogaz yakıldığında sadece 2,4 kWh elektrik üretilmektedir (Deublein & Steinhauser, 2010). Ayrıca biyogazdan elektrik üretmek için gaz türbinleri de kullanılmaktadır. Piyasada 500 kW'dan 250 MW'a kadar çeşitli kapasitelerde gaz türbinleri mevcuttur ve tek çevrimli gaz türbini verimleri %20-45 arasındadır ve verimlilik boyutla birlikte artmaktadır (Kaparaju & Rintala, 2013). Bir gaz türbininin ayırt edici özelliği, temizlenmiş biyogaz kullanıldığında 25 ppm'den daha az olan düşük NO_x emisyonlarıdır (Deublein & Steinhauser, 2010).

Biyogaz kullanımı için küçük boyutlu motorların kullanılması, düşük verimliliğe sebep olmaktadır (Jatana, Himabindu, Thakur, & Ravikrishna, 2014). Günümüzde, homojen şarj sıkıştırılmalı ateşleme (HCCI) yöntemi yoğun bir şekilde araştırılmış ve umut verici bir teknik olduğu gösterilmiştir. Saxena ve diğerleri (Saxena & Bedoya, 2013) ve Reitz ve diğerleri (Reitz & Duraisamy, 2015) HCCI teknolojisi hakkında kapsamlı incelemeler yapmış ve bu teknolojiyi kıvılcım ateşlemeli ve dizel motorlarla karşılaştırmıştır. HCCI, düşük NO_x emisyonları üreten düşük sıcaklıkta yanma kullanır. Bir çalışmada HCCI termal verimliliği test edilmiş ve dizel ve biyogaz karışımları kullanıldığında dizel motor performansına yakın olan verimliliğin %50 civarında olduğu tespit edilmiştir (Swami Nathan, Mallikarjuna, & Ramesh, 2010). Aslında, yakıttaki ilave biyogaz, düşük kalorifik değeri nedeniyle termal verimliliği düşürmektedir. Bedoya ve arkadaşlarının (Bedoya, Saxena, Cadavid, Dibble, & Wissink, 2012) deneysel çalışması, HCCI'nin %44 gibi yüksek ısı verimlerine ve 0,11 g/kWh gibi düşük NO_x emisyonlarına ulaşmak için umut verici bir yöntem olduğunu açıkça göstermiştir. Ayrıca, Blizman ve diğerleri (Blizman, Makel, Mack, & Dibble, 2006) NO_x emisyonlarının HCCI yöntemi ile çöp gazları için aynı seviyede olduğunu bildirmiştir. Biyogazı kullanmanın bir diğer yöntemi de alevsiz yakmadır. Bu yöntem biyogaz verimliliğini artırabilmekte ve aynı zamanda partikül ve NO_x emisyonlarını azaltmaktadır. Çalışma, alevsiz yakma kullanarak biyogaz kullanımını araştırmış ve sonuç, elektrik verimliliğinin %53 olduğunu ve CHP verimliliğinin, egzoz gazlarının hacminin yaklaşık %2'si olan düşük NO_x emisyonları ile enerji geri kazanımı için egzoz gazları kullanılarak %82'ye ulaşabileceğini ortaya koymuştur (Hosseini & Wahid, 2013).

Biyogazın kullanımına yönelik yenilikçi yöntemler arasında çift yakıtlı motorlar, stirling motorları ve mikro gaz türbinleri yer almaktadır. Çift yakıtlı motorlar biyogazı çok az miktarda biyodizel, biyoetanol veya

dizel ile birlikte yakarak kullanmaktadır (Kalsi & Subramanian, 2017). Stirling motorları termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür; bu nedenle atık termal enerjiden elektrik üretmek için teorik olarak mükemmeldirler. İlk yatırım maliyeti hala çok yüksektir ve elektrik verimliliği %20 civarındadır (Renzi & Brandoni, 2014). Mikro gaz türbinleri kompakttır, yüksek hızda çalışır, düşük gürültülüdür ve gaz türbinlerinin ve güç aralığının 25 ila 500 kW arasında olduğu yerlerde titreşimsizdir. Biyogazdaki metan içeriği %30'dan yüksekse, biyogaz bir mikro gaz türbini ile kullanılabilir (Kaparaşu & Rintala, 2013). Elektriksel verimlilikleri %45'ten yüksektir (Budzianowski, 2016).

İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı

Sıkıştırma Ateşlemeli (CI) Motorlarda Kullanımı

Literatürde, sıkıştırma ateşlemeli (CI) çift yakıt modundaki motorlarda biyogaz ve dizel 1980'den beri çalışılmaktadır. Mathur ve arkadaşları (Mathur, Babu, & Prasad, 1986) biyogazı CI'da biyoyakıt olarak kullanmış ve Prakash ve arkadaşları (Prakash, Ramesh, & Shaik, 1999) çift yakıt modlu CI'nın ateşleme gecikmesini tahmin etmek için matematiksel bir denklem geliştirmiştir. Mustafi ve diğerleri (Mustafi, Raine, & Verhelst, 2013) farklı CH₄ ve CO₂ oranlarında biyogaz ve dizel içeren çift yakıt modlu CI'yi motorunu incelemiştir. Sonuçlar, biyogaz %70 CH₄ içerdiğinde partikül madde (PM) emisyonlarının %70'inin ve NO_x emisyonlarının %37'sinin dizel yakıtla kıyasla azaldığını ortaya koymuştur (Mustafi et al., 2013). Cacua ve diğerleri (Cacua, Amell, & Cadavid, 2012) CI'da havadaki zenginleştirilmiş oksijenin ve çift yakıt modunun etkisini araştırmıştır. Havadaki artan O₂ konsantrasyonunun, kontrol grubuna göre emisyon ve fren termal verimliliği (BTE) için biyogaz ve dizel çift yakıt modu üzerinde olumlu bir etki yarattığını bildirmişlerdir. Havadaki O₂ konsantrasyonu %27'ye ulaştığında BTE %28 oranında artmıştır (Cacua et al., 2012). Bir başka kapsamlı çalışma, farklı biyogaz besleme oranları ile çift yakıt modunda yanma özellikleri ve emisyonlara odaklanmıştır (Barik & Murugan, 2014). Dizel ve 0,3, 0,6, 0,9 ve 1,2 kg/saat olmak üzere dört farklı biyogaz besleme oranı kullanmışlardır. Sonuçlar, biyogaz akış oranları sırasıyla 0,3, 0,6, 0,9 ve 1,2 kg/saat olduğunda tam yükte çift yakıt modunda enerjinin %14,8, 26,6, 36,9 ve 43,9'unun biyogazdan karşılanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, 1,2 kg/saat biyogaz besleme oranıyla, tam yükte kontrol yakıtına kıyasla egzoz sıcaklığı ve NO_x sırasıyla %14,2 ve %42,8 oranında azalmıştır (Barik & Murugan, 2014). Yakın zamanda, Wang ve arkadaşları (Wang, Qian, Zhou, & Lu, 2016) çift yakıtlı yanmaya dayalı reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme modunu incelemiştir. Raporlarında, optimum koşulda BTE'ye %40 oranında ulaşılabilirdiğini belirtmişlerdir. Son yıllarda yakıt alanında umut verici bir gelişme daha yaşanmıştır. Bu gelişme, sıvı yakıtların nanopartiküller ile karıştırıldığı modifiye yakıt olarak

bilinmektedir. Nanopartiküller, özellikle CI motorlarda yanma katalizörü olarak görev yapmıştır (Mujtaba et al., 2020). Dizel veya biyodizel, metal, metal oksit, nanoakışkan ve karbon nanotüpler olarak sınıflandırılan farklı nanopartiküllerle karıştırılmıştır (Kegl, Kovač Kralj, Kegl, & Kegl, 2021). Bununla birlikte, katkı nanopartikülleri yakıtlara çeşitli avantajlar sağlar, araştırmacılar genellikle dizel ve dizel ve biyodizel yakıtların harmanlanmasına odaklanmıştır. Literatürde, modifiye yakıtlar gibi diğer biyoyakıt kaynakları hakkında doldurulması gereken büyük bir boşluk bulunmaktadır. Modifiye yakıtlar çift yakıt modunda biyogazla birlikte kullanılabilir. Bilindiği kadarıyla, sadece bir grup bu konu üzerinde çalışmaktadır. Feroskhan ve diğerleri (Feroskhan, Ismail, Gosavi, Tankhiwale, & Khan, 2018) biyogaz ve modifiye dizel yakıtlı çift yakıtlı CI motorunda verim artışını araştırmıştır. Katkı malzemesi olarak 15, 25 ve 35 ppm CeO₂ ile dizeli modifiye etmişler ve bu yakıtı çift yakıtlı CI'da farklı biyogaz besleme oranlarıyla kullanmışlardır (Feroskhan et al., 2018). İlk çalışmalarında, 15 ve 25 ppm CeO₂ içeren modifiye dizel ve 4 L/dk biyogaz besleme hızı, hem dizel hem de modifiye dizelden daha yüksek BTE göstermiştir (Feroskhan, Ismail, Kumar, Kumar, & Aftab, 2017). İkinci çalışmalarında, çift yakıt modlu CI'da CeO₂ konsantrasyonunun optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, biyogaz ve 25 ppm CeO₂ içeren modifiye yakıtın tüm emisyonları azalttığını ve BTE'yi artırdığını ortaya koymuştur (Feroskhan et al., 2018). Tablo 1, literatürdeki mevcut çalışmaları ve bu çalışmaların sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 1. Çift yakıt modlu sıkıştırma ateşlemeli motorda biyogaz kullanımı

Yakıt türü	CH ₄ (%)	Sıkıştırma Oranı	NO _x (%)	HC (%)	CO (%)	Duman (%)	BTE (%)	Ref.
Biyogaz- Biyodizel-DEE	90.6	16.5-18.5	↑7.6	↓39.5	↓42.2	↓42.8	↑7	(Barik, Murugan, Sivaram, Baburaj, & Shanmuga Sundaram, 2017)
Biyodizel - Biyogaz Çift Yakıt	73	17.5	↑5.5	↓18.2	↓17.1	↓2.1	↑6.6	(Barik et al., 2017)

Yapay Biyogaz- Biyodizel	30-40- 50	19.5	↓80	↑96	↑92	-	↓32.6	(Kalsi & Subrama nian, 2017)
Dizel, WCOME + Biyogaz	71	17.5	↑6.1- 8.9	↓14.8 -44.4	↑21.4 -29.8	↑2.3-3.4	↓9.7	(Khayum , Anbarasu , & Murugan , 2020)
55 - 85 °C Ön Isıtmalı Biyogaz- Hava Karışımı	70	17.2	↑11.7 3	↑150- 250	↑6- 371	-	↑51.4	(Prabhu, Avinash, Brindhad evi, & Pugazhen dhi, 2021)
Dizel- Saflaştırılmış Biyogaz	70.4- 93.8	17.2	-	-	↓10- 50	-	↓10- 15	(Vijin Prabhu, Manimar an, Jeba, & Babu, 2021)
Biyogaz-10- 20% H ₂	70	18	↑6	↓25	↓30	-	↑32	(Bougues sa, Tarabet, Loubar, Belmrabe t, & Tazerout, 2020)

Buji Ateşlemeli (SI) Motorlarda Kullanımı

Biyogaz, benzinle karıştırıldıktan sonra silindire birlikte beslenebildiği için buji ateşlemeli (SI) motorlarda kolaylıkla kullanılabilirken, sıkıştırma ile ateşleme için hava karıştırmalı çift yakıt modunun kullanılması gerekmektedir. Bir çalışmada, biyogazın sıkıştırma oranı 10 olan kıvılcım ateşlemeli bir motorda kullanıldığında BSFC'nin %66 oranında arttığı, BTE ile CO ve NO_x emisyonlarının ise benzinle beslemeye kıyasla sırasıyla %12, %40 ve %81,5 oranında azaldığı bildirilmiştir (Hotta, Sahoo, & Mohanty, 2019b). Başka bir çalışmada SI'nin 6 ila 9 aralığındaki sıkıştırma oranları incelenmiştir (Sadiq Y & Iyer, 2020). Sonuçlar, sıkıştırma oranı 8 olduğunda

biyogazla beslenen test motorundan elde edilen gücün %13,4 oranında arttığını ve BSFC'nin %18,18 oranında azaldığını ortaya koymuştur (Sadiq Y & Iyer, 2020). Etanol ve biyogaz kullanıldığında HC, CO ve NO_x emisyonları azalırken BTE artmıştır (da Costa et al., 2020). Tablo 2, biyogazın buji ateşlemeli motorda yakıt olarak kullanıldığı son çalışmaların bulgularını göstermektedir.

Tablo 2. Buji ateşlemeli motorda biyogaz kullanımı

Yakıt türü	CH ₄ (%)	Sıkıştırma Oranı	NO _x (%)	HC (%)	CO (%)	BTE (%)	Ref.
Benzin + Biyogaz	55.6	10	↓81.5	↑6.8	↓40	↓12	(Hotta, Sahoo, & Mohanty, 2019a)
Yapay Biyogaz	60	12	↓71.7 4	-	-	-	(Kim, Kawahar a, Tsuboi, & Tomita, 2016)
Biyogaz Ethanol	64.96	13:6	↓24	↓60	↓50	↑20	(da Costa et al., 2020)
Sentetik gaz - Biyogaz	4-65	12.9	↓50- 70	-	-	↑37.5 -39	(Kan, Zhou, Yang, Zhai, & Wang, 2018)
Biyogaz	55.6	10-12	↑10.1 7	↑15.6	↑0.01 - 0.258	↑26.6 9- 30.32	(Hotta, Sahoo, Mohanty, & Kulkarni, 2020)
Biyogaz	55.6	10-12	↓88	↓40	↑50	↓13	(Hotta et al., 2019b)
Biyogaz +LPG	55.6	8	↓50.0 9	↓23	↓15	↓16.0 4	(Simsek & Uslu, 2020)

SONUÇ

Bu araştırma, biyogazın sürdürülebilir enerji dönüşümündeki kritik rolünü ve içten yanmalı motorlarda kullanımının potansiyelini detaylı bir şekilde ele almıştır. Biyogazın dünya genelindeki kullanımı hızla artmakta olup, 2025 yılına kadar 33,5 GW'a ulaşması öngörülmektedir. Bu büyüme, biyogazın çeşitli uygulamalardaki potansiyelini ve etkisini açıkça göstermektedir.

İçten yanmalı motorlarda biyogazın kullanılması, emisyonların azaltılması ve enerji verimliliği sağlama konularında oldukça olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Özellikle çift yakıtlı motorlar, homojen şarj sıkıştırılmalı ateşleme (HCCI) ve alevsiz yakma gibi yenilikçi teknolojiler, biyogazın daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasına imkan tanımakta ve emisyonları kayda değer bir biçimde düşürmektedir. Örneğin, alevsiz yakma yöntemiyle biyogazdan elde edilen elektrik verimliliği %53 seviyesine kadar çıkabilmektedir.

Biyogazın diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte hibrit sistemlerde kullanılması, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini ve istikrarını artırarak gelecekteki enerji karışımında önemli bir rol üstlenebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı, yeşil enerji dönüşümüne katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Emisyonları azaltma, enerji verimliliğini artırma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma gibi avantajları, biyogazı sürdürülebilir enerji çözümlerinin vazgeçilmez bir unsuru haline getirmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmaların, biyogaz teknolojilerini daha da geliştirerek enerji sektöründeki rolünü güçlendirmesi büyük önem taşımaktadır.

REFERANSLAR

- Atelge, M. R. (2021). The Potential of Biogas Production as A Biofuel from Cattle Manure in Turkey and Projected Impact on The Reduction of Carbon Emissions for 2030 and 2053. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(1), 56-64.
- Barik, D., & Murugan, S. (2014). Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas–diesel in dual fuel mode. *Energy*, 72, 760-771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.106>
- Barik, D., Murugan, S., Sivaram, N. M., Baburaj, E., & Shanmuga Sundaram, P. (2017). Experimental investigation on the behavior of a direct injection diesel engine fueled with Karanja methyl ester-biogas dual fuel at different injection timings. *Energy*, 118, 127-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.025>
- Bedoya, I. D., Saxena, S., Cadavid, F. J., Dibble, R. W., & Wissink, M. (2012). Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power

- generation with high indicated efficiency and ultra-low NO_x emissions. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 154-162. doi: 10.1016/j.enconman.2011.08.016
- Blizman, B. J., Makel, D. B., Mack, J. H., & Dibble, R. W. (2006, 2006). *Landfill Gas Fueled HCCI Demonstration System*. Paper presented at the In Proceedings of the ASME 2006 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference Sacramento, CA, USA, 5–8 November 2006; ASME: New York, NY, USA.
- Bouguessa, R., Tarabet, L., Loubar, K., Belmrabet, T., & Tazerout, M. (2020). Experimental investigation on biogas enrichment with hydrogen for improving the combustion in diesel engine operating under dual fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 9052-9063. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.003>
- Brémond, U., Bertrandias, A., Steyer, J.-P., Bernet, N., & Carrere, H. (2021). A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125065>
- Budzianowski, W. M. (2016). A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1148-1171. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.054
- Cacua, K., Amell, A., & Cadavid, F. (2012). Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine. *Biomass and Bioenergy*, 45, 159-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.003>
- da Costa, R. B. R., Valle, R. M., Hernández, J. J., Malaquias, A. C. T., Coronado, C. J. R., & Pujatti, F. J. P. (2020). Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation: Combustion, performance and pollutant emission analysis. *Applied Energy*, 261, 114438. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114438>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2010). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction, Second Edition*: Wiley-VCH.
- EPA. (2024). AgSTAR Data and Trends. Retrieved 08th July 2024, 2024, from <https://www.epa.gov/agstar/agstar-data-and-trends#adfacts>
- Feroskhan, M., Ismail, S., Gosavi, S., Tankhiwale, P., & Khan, Y. (2018). Optimization of performance and emissions in a biogas–diesel dual fuel engine with cerium oxide nanoparticle addition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(5), 1178-1193. doi: 10.1177/0954407018764165
- Feroskhan, M., Ismail, S., Kumar, A., Kumar, V., & Aftab, S. K. (2017). Investigation of the effects of biogas flow rate and cerium oxide addition on the performance of a dual fuel CI engine. *Biofuels*, 8(2), 197-205. doi: 10.1080/17597269.2016.1215072
- Filipović, S., Lior, N., & Radovanović, M. (2022). The green deal–just transition and sustainable development goals Nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112759.

- Hakawati, R., Smyth, B. M., Rosa, F. D., & Rooney, D. (2017). What is the most energy efficient route for biogas utilization : Heat , electricity or transport ? *Applied Energy*, 206, 1076-1087. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.068
- Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., & Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1291-1300. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.013
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2013). Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace. *Energy Conversion and Management*, 74, 426-432. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.026
- Hotta, S. K., Sahoo, N., & Mohanty, K. (2019a). Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas. *Renewable Energy*, 134, 1307-1319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.049>
- Hotta, S. K., Sahoo, N., & Mohanty, K. (2019b). Ignition advancement study for optimized characteristics of a raw biogas operated spark ignition engine. *International Journal of Green Energy*, 16(1), 101-113. doi: 10.1080/15435075.2018.1544901
- Hotta, S. K., Sahoo, N., Mohanty, K., & Kulkarni, V. (2020). Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine. *Renewable Energy*, 150, 854-867. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.145>
- Jatana, G. S., Himabindu, M., Thakur, H. S., & Ravikrishna, R. V. (2014). Strategies for high efficiency and stability in biogas-fuelled small engines. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 189-195. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.12.008
- Kalsi, S. S., & Subramanian, K. A. (2017). Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine. *Renewable Energy*, 106, 78-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.006>
- Kan, X., Zhou, D., Yang, W., Zhai, X., & Wang, C.-H. (2018). An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine. *Applied Energy*, 212, 210-222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>
- Kaparaaju, P., & Rintala, J. (2013). Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells *The Biogas Handbook Science, Production and Applications* (pp. 404-427). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Kegl, T., Kovač Kralj, A., Kegl, B., & Kegl, M. (2021). Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 83, 100897. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100897>
- Khayum, N., Anbarasu, S., & Murugan, S. (2020). Combined effect of fuel injecting timing and nozzle opening pressure of a biogas-biodiesel fuelled diesel engine. *Fuel*, 262, 116505. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116505>

- Kim, Y., Kawahara, N., Tsuboi, K., & Tomita, E. (2016). Combustion characteristics and NOX emissions of biogas fuels with various CO2 contents in a micro co-generation spark-ignition engine. *Applied Energy*, 182, 539-547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.152>
- Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J., Benemann, J., Rutledge, B., & Salour, D. (2005). Biomethane from dairy waste: a sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California *Western United Dairymen*. USDA Rural Development: Washington, DC, USA.
- Mathur, H. B., Babu, M. K. G., & Prasad, Y. N. (1986). *A Thermodynamic Simulation Model for a Dual Fuel Open Combustion Chamber Compression Ignition Engine*. Paper presented at the SAE International, Warrendale, Pennsylvania, USA.
- Mujtaba, M. A., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Gul, M., Soudagar, M. E. M., Ong, H. C., . . . Yusoff, M. (2020). Comparative study of nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for performance and emission improvements. *Fuel*, 279, 118434. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118434>
- Mustafi, N. N., Raine, R. R., & Verhelst, S. (2013). Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels. *Fuel*, 109, 669-678. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.007>
- O'Connor, S., Ehimen, E., Pillai, S. C., Black, A., Tormey, D., & Bartlett, J. (2021). Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110580. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110580>
- Prabhu, A. V., Avinash, A., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Performance and emission evaluation of dual fuel CI engine using preheated biogas-air mixture. *Science of The Total Environment*, 754, 142389. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142389>
- Prakash, G., Ramesh, A., & Shaik, A. B. (1999). An Approach for Estimation of Ignition Delay in a Dual Fuel Engine. *SAE Transactions*, 108, 399-405.
- Raboni, M., & Urbini, G. (2014). Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 9(2), 445-458. doi: 10.4136/ambi-agua.1324
- Reitz, R. D., & Duraisamy, G. (2015). Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 12-71. doi: 10.1016/j.pecs.2014.05.003
- Renzi, M., & Brandoni, C. (2014). Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion. *Applied Thermal Engineering*, 67(1-2), 341-351. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.045
- Sadiq Y, R., & Iyer, R. C. (2020). Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine. *Renewable Energy*, 146, 997-1009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.140>
- Saxena, S., & Bedoya, I. D. (2013). Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 457-488. doi: 10.1016/j.pecs.2013.05.002

- Simsek, S., & Uslu, S. (2020). Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine. *Fuel*, 279, 118528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118528>
- Swami Nathan, S., Mallikarjuna, J. M., & Ramesh, A. (2010). An experimental study of the biogas–diesel HCCI mode of engine operation. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1347-1353. doi: 10.1016/j.enconman.2009.09.008
- Szpilko, D., & Ejdys, J. (2022). European Green Deal–research directions. a systematic literature review. *Ekonomia i Środowisko*(2).
- Ullah Khan, I., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M., & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150(May), 277-294. doi: 10.1016/j.enconman.2017.08.035
- Vijin Prabhu, A., Manimaran, R., Jeba, P., & Babu, R. (2021). Effect of methane enrichment on the performance of a dual fuel CI engine. *International Journal of Ambient Energy*, 42(3), 325-330. doi: 10.1080/01430750.2018.1550017
- Wang, X., Qian, Y., Zhou, Q., & Lu, X. (2016). Modulated diesel fuel injection strategy for efficient-clean utilization of low-grade biogas. *Applied Thermal Engineering*, 107, 844-852. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.057>
- Yang, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., & Li, Y. (2014). Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1133-1152. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.008

Bütüncül Havza Yönetiminde Karşılaşılan Zorluklar

Zekiye ÇETİNKAYA¹
Şehnaz ŞENER²
Erhan ŞENER³

- 1- Peyzaj Mimarı, Süleyman Demirel Üniversitesi; Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Bilimleri ABD. zekiyeacetinkaya97@gmail.com, ORCID No: 0009-0006-7714-0089
- 2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü. sehnazsener@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3191-2291.
- 3- Doç. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi. erhansener@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6263-8366.

ÖZET

Bütüncül havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini sağlamak amacıyla bir havza ölçeğinde uygulanan kapsamlı bir yaklaşımdır. Bu yönetim biçimi, bir su havzasının tüm bileşenlerini (toprak, su, bitki örtüsü, insan faaliyetleri vb.) entegre bir şekilde değerlendirerek, uzun vadeli su kaynaklarının korunması ve etkin kullanımını hedeflemektedir. Bu çalışma, bütüncül havza yönetiminin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan sorunları anlamak ve ortaya koymak amacıyla yapılmıştır. Çalışmanın temeli, konuyla ilgili mevcut bilgileri derinlemesine anlamak için kapsamlı bir literatür taraması yapmaktadır. Bu süreçte bilimsel makaleler, raporlar ve resmi dokümanlar incelenmiş; ulusal ve uluslararası düzeyde başarılı veya başarısız uygulama örnekleri analiz edilmiştir. Literatürdeki teorik bilgilerin pratikte nasıl uygulandığı ve bu uygulamaların sonuçları ele alınmıştır. Ek olarak, çalışma kapsamında 2023 yılında Burdur ve Antalya illeri sınırlarında gerçekleştirilen "Burdur Gölü, Yarıklı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Göl, Yazır Gölü ve Avlan Gölü Sulak Alan Revize Yönetim Planı Projesi" deneyimleri de değerlendirilmiştir. Bu saha çalışmalarından elde edilen veriler hem nicel hem de nitel yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir.

Toplanan veriler doğrultusunda, bütüncül havza yönetimi sürecinde karşılaşılan zorluklar belirlenmiş ve temel temalarına göre kategorize edilmiştir. Bu zorluklar, teknik, yönetsel, sosyal, çevresel ve finansal boyutlarda ortaya çıkmaktadır. Teknik zorluklar su kaynaklarının karmaşıklığından, yönetsel zorluklar kurumlar arası iş birliği eksikliklerinden, sosyal zorluklar yerel halkın katılımındaki yetersizliklerden, çevresel zorluklar ise ekosistem sağlığının korunmasındaki güçlüklerden kaynaklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Bütüncül havza, göl havzası, göl yönetimi, Göller Bölgesi

GİRİŞ

Bütüncül havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir ve etkin bir şekilde kullanılması yaklaşımını benimseyen bir yönetim modelidir (TÜBİTAK, 2022). Bu model, su kaynaklarının korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için havza bazında planlama ve uygulamaların bütüncül bir perspektifle ele alınmasını öngörmektedir. Ancak bu süreçte çeşitli zorluklar ve engellerle karşılaşmaktadır. Bu zorluklar; teknik, yönetsel, sosyal, çevresel ve finansal boyutlarda ortaya çıkabilmektedir ve entegre bir yönetim anlayışının tam anlamıyla hayata geçirilmesini güçleştirmektedir.

Bütüncül havza yönetimi; büyük alanlarda farklı meslek disiplinlerinin bir araya gelerek kurguladığı kapsamlı ve çok katmanlı bir

süreçtir. Bu yönetim modeli, su kaynaklarının korunması, iyileştirilmesi ve etkin kullanımı için havza bazında planlama ve uygulama yapılmasını öngörülmektedir. Havza yönetimi, hidroloji, ekoloji, tarım, kent planlama, ekonomi, sosyoloji ve hukuk gibi çeşitli disiplinlerin bilgi ve perspektiflerini bir araya getirerek su kaynaklarının bütüncül olarak değerlendirilmesini ve yönetilmesini sağlamaktadır. Bu süreçte, havza yönetimi stratejileri su kaynaklarının karmaşıklığını ve dinamiklerini anlamak için bilimsel verilere dayanmaktadır. Hidrolojik döngüyü, su kalitesini, ekosistem sağlığını, insan etkileşimlerini ve çevresel faktörleri kapsayan analizler yapılmaktadır. Bu analizler, havzanın mevcut durumunu değerlendirir ve gelecekteki değişimleri öngörmeye çalışmaktadır. Aynı zamanda, havza yönetimi süreci katılımcı bir yaklaşımı benimsemektedir. Yerel halk, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları, özel sektör ve diğer paydaşlar sürece aktif olarak dahil edilmektedir. Toplumsal kabul ve destek sağlanması, havza yönetim stratejilerinin uygulanabilirliğini artırmaktadır ve sürdürülebilirliğini güçlendirir.

Havza yönetimi ayrıca, çeşitli sektörler ve kurumlar arasında iş birliği ve koordinasyonu teşvik etmektedir. Su kaynaklarının etkin kullanımı için politika oluşturma süreçlerinde şeffaflık, adalet ve verimlilik ilkeleri ön planda tutulmaktadır. Bu sayede, çıkar çatışmaları minimize edilir ve uzun vadeli planlama sağlanabilmektedir. Sonuç olarak, bütüncül havza yönetimi su kaynaklarının sürdürülebilirliği için önemli bir yaklaşımdır. Bu yönetim modeli, su kaynaklarının karmaşıklığını anlamak, çeşitli paydaşları sürece dahil etmek ve uzun vadeli stratejiler geliştirmek için güçlü bir çerçeve sunmaktadır. Ancak, başarılı bir havza yönetimi için sürekli güncellenen veriye dayalı kararlar almak, teknik ve idari kapasiteleri güçlendirmek ve toplumsal katılımı sağlamak gereklidir. Bu doğrultuda da artan parametre ve süreçlere bağlı olarak karşılaşılan zorlukların boyutu ve aktörlerin çeşitliliği de oldukça fazladır. Su kaynaklarının karmaşıklığı ve yönetim süreçlerindeki artan parametreler, havza yönetimi için çeşitli teknik, idari, sosyal ve çevresel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu durum, bütünleşik havza yönetiminin etkin bir şekilde uygulanmasını engelleyerek su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini tehdit etmektedir.

BULGULAR

Su kaynakları, havza içinde su kalitesinin korunması veya iyileştirilmesi yoluyla yönetilirken, erozyon kontrolü, kirlilik azaltma ve habitat restorasyonu gibi yöntemler de uygulanmaktadır. Toprak yönetimi, tarım uygulamaları ve ormancılık faaliyetleri aracılığıyla toprak erozyonunu önlemeyi ve verimliliği artırmayı hedeflerken, bitki örtüsü yönetimi doğal ve insan yapımı bitki örtüsünün su döngüsü ve erozyon üzerindeki etkilerini değerlendirir. Ayrıca, iklim değişikliği uyarlaması stratejileri, su stoğu yönetimi, kuraklık önlemleri ve su kaynaklarının değişen iklim koşullarına

uyumu gibi unsurları içermektedir (Smith, 2020). Bütüncül havza yönetiminin sağladığı avantajlar arasında sürdürülebilir su kaynakları yönetimi, doğal ekosistemlerin desteklenmesi ve çevresel/ekonomik faydalar bulunmaktadır. Su kaynaklarının uzun vadeli olarak korunması ve doğal ekosistemlerin iyileştirilmesi, yönetim stratejilerinin temel hedeflerinden biridir. Ayrıca, su kalitesinin artırılması, tarım verimliliğinin artırılması ve su krizlerinin önlenmesi gibi çevresel ve ekonomik faydalar da bütüncül havza yönetimi uygulamalarının sonuçları arasında yer almaktadır (Brown ve Green, 2018).

Bütünleşik havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını ve yönetimini sağlamayı amaçlayan bir strateji olmasına rağmen, bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Teknik açıdan bakıldığında, havza yönetimi genellikle karmaşık bir yapıya sahiptir ve birçok farklı paydaş ve etken içermektedir. Su kaynaklarının yönetimi, çeşitli alanlarda uzmanlaşmış bilgi ve beceriler gerektirmektedir ve bu bilgilerin entegrasyonu ve koordinasyonu zaman zaman zor olabilir. (Johnson, 2019). Yönetim süreçlerinde; aktörlerin artması da bazı temel sorunları beraberinde getirmektedir. Malezya Hükümeti tarafından hazırlanan; “Best Practice Integrated Basin Management Principles” a göre başarılı bir “Bütüncül Havza Yönetimi” için sekiz temel kritik unsur bulunmaktadır (Şekil 1). Bunlar sırasıyla;

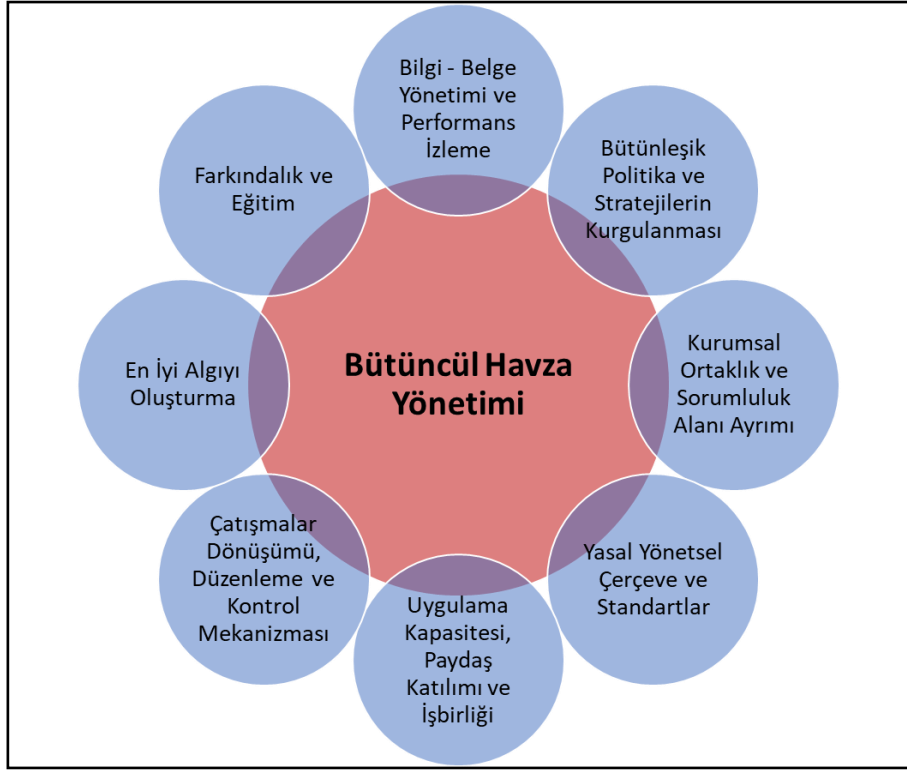
- Bilgi- Belge Yönetimi ve Performans İzleme,
- Bütünleşik Politika ve Stratejilerin Kurgulanması,
- Kurumsal Ortaklık ve Sorumluluk Alanı Ayrımı,
- Yasal Yönetmelik Çerçeve ve Standartlar,
- Uygulama Kapasitesi, Paydaş Katılımı ve İş birliği,
- Çatışmalar Dönüşümü, Düzenleme ve Kontrol Mekanizması,
- En İyi Algıyı Oluşturma ve
- Farkındalık ve Eğitim’dir.

Her kriterin başarı parametreleri farklı aktör ve faaliyetlere bağlıdır. Başarılı çalışmaların ortaya konması amaçlanarak değerlendirildiğinde her bir kriter için farklı aktör ve faaliyetler ile kompleks durumlar gelişmektedir.

Bilgi- Belge Yönetimi ve Performans İzleme

Smith (2021)’ e göre; büyük ölçekli havzalarda, bilgi ve belge yönetimi karmaşıktır ve farklı paydaşlar arasında bilgi paylaşımı ve veri standardizasyonu sağlamak zor olmaktadır. Farklı kuruluşlar ve yönetim birimleri arasında bilgi akışını koordine etmek ve doğru veriye erişimi sağlamak, zaman zaman bürokratik engellerle karşılaşmaktadır. Ayrıca, havza yönetiminin çeşitli alanlarında performans izleme ve değerlendirme süreçlerinin standartlaştırılması ve sürekli olarak güncellenmesi gerekmektedir. Bu süreçlerin eksik veya yetersiz olması, havza yönetim

stratejilerinin etkinliğini değerlendirmeyi ve geliştirmeyi zorlaştırmaktadır (Johnson ve Brown, 2020).



Şekil 1. Kritik Derecede Önemli Bütünleşik Havza Yönetimi Kriterleri (Klang River Basin Environmental Improvement and Flood Mitigation Projesinden Alıntılanmıştır)

Bütünleşik Politika ve Stratejilerin Kurgulanması

Bütünleşik havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlamak için bütünleşik politika ve stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu süreç, farklı sektörlerin ve paydaşların çıkarlarını dengelemeyi ve havza yönetimi için ortak bir vizyon oluşturmayı içermektedir. Örneğin, bir havza içerisinde tarım, endüstri, yerleşim alanları ve doğal yaşam alanları gibi çeşitli kullanım alanları bulunabilir. Bu alanların her biri farklı su ihtiyaçlarına sahiptir ve bu ihtiyaçların dengelenmesi için bütünleşik politika ve stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir (Jones ve White, 2021). Politika ve stratejilerin kurgulanması, yönetim yapısının güçlendirilmesini ve karar alma süreçlerinin şeffaf ve katılımcı olmasını gerektirmektedir. Örneğin, bir havza yönetim planı

oluşturulurken, çeşitli paydaşların katılımıyla su kaynaklarının kullanımıyla ilgili hedefler belirlenmeli ve bu hedeflere nasıl ulaşılabileceğine dair politika belgeleri hazırlanmalıdır. Bu süreçte, yerel yönetimler, sivil toplum örgütleri, iş dünyası temsilcileri ve akademisyenler gibi çeşitli grupların fikir ve önerileri önemlidir (Miller vd., 2020).

Politika ve stratejilerin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için havza yönetimindeki çeşitli paydaşların görüş ve önerilerinin dikkate alınması önem taşımaktadır. Ayrıca, politika alanlarının entegrasyonu ve yönetim düzeyleri arasında uyum sağlanması da kritik önem taşımaktadır. Örneğin, bir havza yönetim planının hayata geçirilmesi sırasında, tarım politikalarıyla çevre koruma politikalarının nasıl entegre edileceği ve bu politikaların uygulanabilirliği üzerinde tartışmalar yürütülmelidir (Smith, 2021). Bu süreçte karşılaşılabilecek zorluklar arasında, farklı sektörlerin ve paydaşların çıkarlarının uyumlaştırılması önemli bir yer tutmaktadır. Örneğin, tarım, endüstri, yerleşim alanları ve doğal yaşam alanları gibi çeşitli kullanım alanları arasında su kaynaklarının adil ve sürdürülebilir bir şekilde paylaşılması zorluğu bulunmaktadır. Bu alanlarda farklı kullanım ihtiyaçları ve öncelikleri olduğundan, ortak bir vizyon oluşturmak ve herkesin ihtiyaçlarını dengelemek karmaşık bir süreç gerektirmektedir.

Ayrıca, politika ve stratejilerin geliştirilmesi ve uygulanması sürecinde yönetim yapısının güçlendirilmesi ve karar alma süreçlerinin katılımcı ve şeffaf olması gerekmektedir. Farklı paydaşların çeşitli beklenti ve taleplerini yönetmek, politika belgelerinin hazırlanması sırasında zaman zaman zorluklar yaratabilmektedir. Herkesin görüşlerinin eşit şekilde dikkate alınması ve uzlaşma sağlanması, politika ve stratejilerin etkinliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Entegrasyon ve uyum sağlama sürecinde ise, farklı politika alanlarının ve yönetim düzeylerinin nasıl koordine edileceği önemli bir zorluktur. Örneğin, tarım politikalarının çevre koruma politikalarıyla nasıl entegre edileceği ve bu entegrasyonun sahada nasıl uygulanacağı üzerindeki teknik ve yönetsel zorluklar dikkate alınmalıdır. Bu süreçte ortaya çıkabilecek bürokratik engeller ve politika uygulamalarının hızlandırılması gerekliliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Sonuç olarak, bütüncül havza yönetimi için politika ve stratejilerin başarılı bir şekilde geliştirilmesi ve uygulanması, çeşitli sektörlerin ve paydaşların iş birliği yapma kapasitesini artırmayı ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini sağlamayı gerektirmektedir. Bu süreçte karşılaşılan zorlukların aşılması için sürekli iletişim, katılımcı yönetim ve teknik kapasitelerin güçlendirilmesi önemlidir.

Kurumsal Ortaklık ve Sorumluluk Alanı Ayrımı

Bütünleşik havza yönetimi bağlamında, kurumsal ortaklık ve sorumluluk alanı ayrımı oldukça önemlidir. Bu süreçte, farklı kuruluşlar ve paydaşlar arasında iş birliği sağlamaktadır. Örneğin, bir havza yönetim planı

oluşturulurken, su kaynaklarının korunması ve yönetimi konusunda hangi kuruluşların hangi sorumlulukları üstleneceği net bir şekilde belirlenmelidir. Kurumsal ortaklık, bu sürecin başarılı olabilmesi için kritik önem taşımaktadır çünkü farklı kuruluşlar arasında işbirliği ve kaynakların etkin kullanımı sağlamaktadır (Garcia ve Smith, 2022). Ancak, kurumsal ortaklık ve sorumluluk alanı ayrımı sürecinde çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Örneğin, farklı kuruluşların farklı öncelikleri ve işleyiş biçimleri olabilmektedir, bu da iş birliğini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, kurumsal sorumluluk alanlarının net bir şekilde tanımlanmaması veya çakışması, karar alma süreçlerini karmaşık hale getirebilir ve uygulamada tutarsızlıklara yol açma olasılığını artırmaktadır. Bu zorlukların aşılabilmesi için açık iletişim, iş birliği ve yönetim yapılarının güçlendirilmesi önem arz etmektedir (Brown, 2021).

Yasal Yönetsel Çerçeve ve Standartlar

Bütünleşik havza yönetimi, su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için gerekli yasal ve yönetsel çerçeveleri içermektedir. Bu çerçeveler, su kaynaklarının korunması, kullanımı ve dağıtımıyla ilgili standartları belirlemektedir. Örneğin, bir havza yönetim planı oluşturulurken, ulusal çevre koruma yasaları ve su kaynaklarının kullanımına ilişkin yerel düzenlemeler dikkate alınmalıdır. Bu noktada, farklı yasal çerçevelerin bir araya getirilmesi ve uyum sağlanması gerekmektedir ki bu da zaman zaman zorluklar doğurabilmektedir (Eroğlu ve Yılmaz, 2023).

Bütünleşik havza yönetiminde yasal ve yönetsel çerçevelerin belirlenmesi ve uygulanması sürecinde karşılaşılan zorluklar arasında, farklı düzeylerdeki yönetim birimleri arasında uyum sağlanması, politika ve yasaların değişkenliği, ve uygulamada tutarlılığın sağlanması yer almaktadır. Ayrıca, mevzuatın güncel tutulması ve uygulama süreçlerinin şeffaf bir şekilde yürütülmesi de önem arz etmektedir (Aydın ve Demir, 2022).

Uygulama Kapasitesi, Paydaş Katılımı ve İşbirliği

Bütünleşik havza yönetimi, güçlü bir uygulama kapasitesi, etkili paydaş katılımı ve işbirliği gerektirmektedir. Uygulama kapasitesi, su yönetimi için gerekli teknik, mali ve kurumsal kaynakların sağlanmasını ve etkin kullanılmasını içermektedir. Örneğin, bir havza yönetim planı oluşturulurken, yerel yönetimlerin teknik uzmanlık ve finansal kaynaklara erişimini artırmak için kapasitelerinin güçlendirilmesi önemlidir (Davis & Thompson, 2023). Paydaş katılımı, farklı paydaşların (yerel yönetimler, sivil toplum örgütleri, özel sektör, akademik kuruluşlar vb.) sürece aktif katılımını ifade etmektedir. Ancak, farklı çıkarlar ve öncelikler arasında denge sağlamak ve tüm paydaşların katılımını sağlamak zor olabilir. Bu

durum, iş birliği ve koordinasyon eksikliklerine yol açabilmektedir (Roberts ve Clark, 2022).

İş birliği, farklı paydaşlar arasında ortak amaçlara yönelik çalışmaları içerir ve su yönetimi alanında etkili sonuçlar elde etmek için kritik önem taşımaktadır. Ancak, iş birliği süreçlerinde iletişim eksiklikleri, güven eksikliği ve kaynakların paylaşımı konusundaki zorluklar karşılaşılabilecek diğer engeller arasında yer alabilmektedir (Wilson ve Garcia, 2021).

Çatışmalar Dönüşümü, Düzenleme ve Kontrol Mekanizması

Bütünleşik havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için çeşitli çatışmaların dönüştürülmesini, düzenlenmesini ve kontrol edilmesini gerektirmektedir. Su yönetimi sürecinde, farklı paydaşlar arasında su kaynaklarının kullanımı, dağılımı ve korunmasıyla ilgili çeşitli anlaşmazlıklar ortaya çıkabilmektedir. Örneğin, bir havza yönetim planı oluşturulurken, tarım, sanayi ve yerel halk gibi farklı gruplar arasında su kaynaklarına erişim ve kullanımı konusunda çatışmalar yaşanabilmektedir. Bu tür çatışmaların etkili bir şekilde yönetilmesi, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için kritik önem taşımaktadır (Jones ve Roberts, 2023). Ancak, çatışmaların dönüşümü ve yönetimi süreçlerinde karşılaşılan zorluklar bulunmaktadır. Örneğin, farklı paydaşların çıkarları arasında denge sağlanması zor olabilmekte ve bu durum uzlaşma süreçlerini karmaşık hale getirebilmektedir. Ayrıca, su kaynaklarının kullanımıyla ilgili olarak yeterli düzenleyici mekanizmaların oluşturulması ve uygulanması gerekmektedir. Bu süreçlerde yasal çerçevenin net olmaması veya eksik uygulanması da çatışma yönetimi süreçlerini zorlaştırabilmektedir (Smith ve Brown, 2022).

En İyi Algıyı Oluşturma

Çok sayıda paydaşın (yerel halk, çiftçiler, sanayi, yerel yönetimler vb.) katılımını gerektirmesi, her bir paydaşın farklı çıkarlarının ve önceliklerinin olması ortak bir algı oluşturmayı güçleştirmektedir. Ayrıca, havza yönetimi kararları için gerekli olan doğru ve güvenilir veriye erişimde zorlukların yaşanması ihtimali çok yüksektir. Bilgi eksikliği veya eksik veri, doğru kararlar alınmasını engelleyebilmektedir. Farklı politik ve hukuki çerçeveler altında faaliyet gösteren bölgelerde ortak bir anlayış oluşturmak da işi zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, bütünleşik havza yönetimi için yeterli finansman sağlamak da oldukça önemlidir. Finansal kaynakların yetersizliği, uzun vadeli projelerin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

Farkındalık ve Eğitim

Bütünleşik havza yönetimi bağlamında, "Farkındalık ve Eğitim" önemli bir bileşendir ve çeşitli zorluklar içerebilir. Yerel toplulukların su

kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi konusunda bilinçlenmesi ve eğitilmesi gerekmektedir. Ancak bu süreç, dil ve kültürel farklılıklar, eğitim düzeyi ve bilgiye erişim gibi faktörler nedeniyle zorluklarla karşılaşabilir. Ayrıca, farklı sosyo-ekonomik gruplar arasında su kaynaklarının önemi ve korunması gerekliliği konusunda ortak bir anlayış oluşturmak zaman alabilir. Bu süreçte etkili iletişim stratejileri ve yerel katılımı teşvik eden eğitim programları önemlidir (Gürel ve Akbulut, 2021). Bütünleşik havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için karmaşık ve çok katmanlı bir süreçtir. Bu süreç, bilgi-belge yönetimi ve performans izleme gibi teknik gereklilikleri içerirken, aynı zamanda politika ve strateji oluşturma, kurumsal ortaklık ve sorumluluk alanı ayrımı, yasal yönetim çerçeveleri ve paydaş katılımı gibi yönetim ve iş birliği boyutlarını da kapsamaktadır. Havza yönetiminde karşılaşılan bu çeşitli zorluklar, farklı düzeylerdeki yönetim birimleri arasındaki uyum eksikliklerinden, çatışma yönetimi gerekliliklerine ve kaynakların yeterli ve adil bir şekilde dağıtılmasına kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu bağlamda, en iyi algıyı oluşturma çabaları da önemlidir; ancak çok sayıda paydaşın farklı önceliklere sahip olması ve bilgi eksikliği gibi faktörler, ortak bir anlayışı oluşturmaya güçleştirebilir. Farkındalık ve eğitim ise bu süreçte kritik bir rol oynamaktadır; yerel toplulukların eğitilmesi ve bilinçlendirilmesi, sürdürülebilir su yönetimi hedeflerine ulaşılmasında temel bir adımdır. Bu noktada, etkili iletişim stratejileri ve katılımcı eğitim programları, toplulukların su kaynaklarının önemi konusunda ortak bir vizyon geliştirmelerini sağlayabilir.

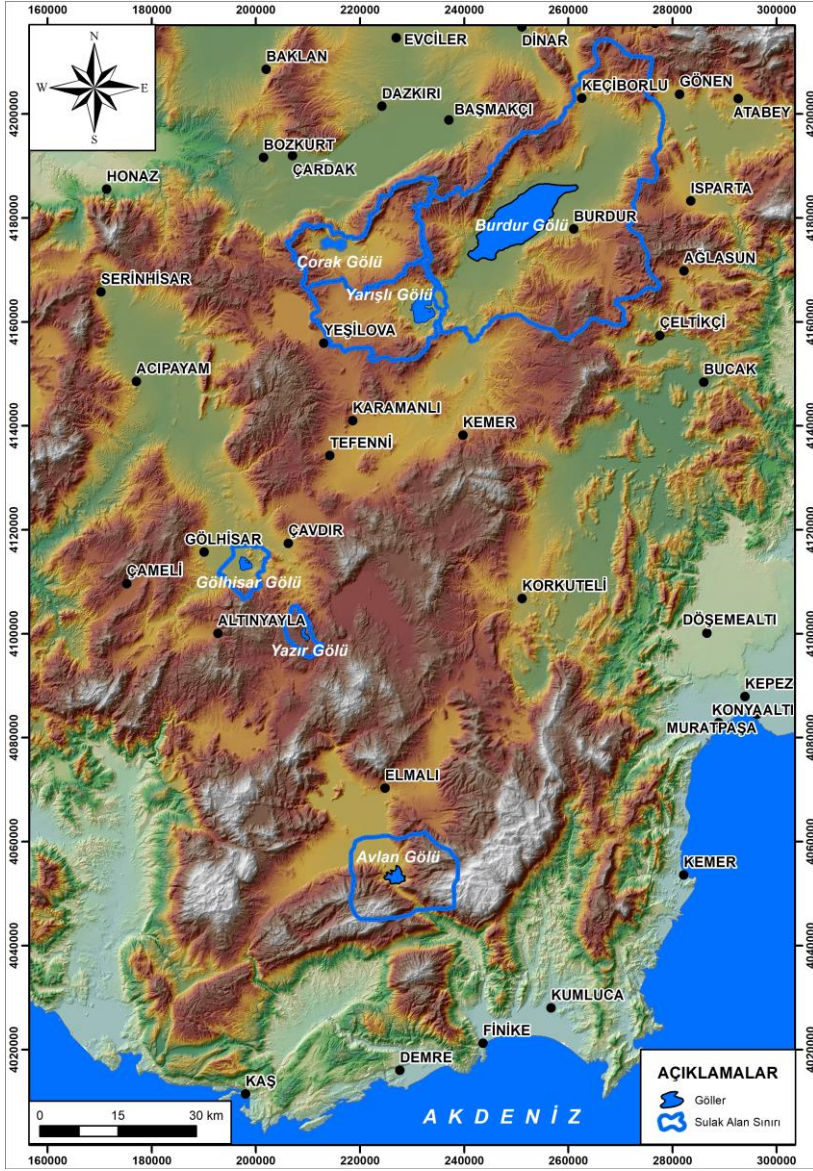
Sonuç olarak, bütünleşik havza yönetimi sürecinde başarı, teknik becerilerin yanı sıra iş birliği ve paydaş katılımının güçlendirilmesiyle mümkün olacaktır, bu da uzun vadeli sürdürülebilirlik ve ekosistem sağlığı için kritik önem taşımaktadır.

Burdur Gölü, Yarıslı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Göl, Yazır Gölü ve Avlan Gölü Sulak Alan Revize Yönetim Planı Projesi Kapsamında Karşılaşılan Zorluklar

17.05.1994 tarih ve 21937 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Ramsar Sözleşmesi (Özellikle Sukuşları Yaşama Ortamı Olarak Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alanların Korunması Sözleşmesi) uyarınca ülkemiz, sınırları dahilinde bulunan bütün sulak alanlarının doğal yapısını ve ekolojik dengesini korumayı, geliştirmeyi ve uygun bir şekilde yönetmeyi taahhüt etmiş bulunmaktadır.

Sunulan çalışmada örnek vaka olarak incelenen projenin temel hedefi; sulak alanın korunması ve kullanılmasının uzun vadeli olması için sulak alana zarar vermeksizin yararlanılması maksadı ile Ramsar Sulak Alan Yönetim Planı Rehberini kullanarak, katılımcı bir şekilde Burdur Gölü,

Yarışlı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Göl, Yazır Gölü ve Avlan Gölü Sulak Alanında “Sulak Alan Revize Yönetim Planı” yapmaktır (Şekil 2).



Şekil 2. Burdur Gölü, Yarışlı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Göl, Yazır Gölü ve Avlan Gölü'nün yer bulduru haritası

Bu planın hazırlık aşaması üç adımda gerçekleştirilmiştir. İlk aşama literatür çalışmalarının gerçekleştiği ön rapor ve ön hazırlık aşamasıdır. İkinci aşama ise; verilerin değerlendirildiği analiz ve sentez aşamasıdır. Son aşama; planın nihai kararlara başlandığı sonuç raporu aşamasıdır. Her bir

aşamada görev alan bir uzman olarak gözlemlenen deneyimler farklı ölçeklere, farklı aktörlere ve farklı değişkenlere bağımlı kompleks bir süreçtir. Ön raporun hazırlanması ve ön hazırlık çalışmaları aşamasında karşılaşılan en büyük problem; veri teminidir. Bütünleşik Havza Yönetimi çalışmaları kapsamında; uzun yıllara dayalı ve büyük alanları içerisinde bulunduran sağlıklı veriler ile etkin planlamanın yapılması mümkündür; fakat dijital veri temini ve depolaması günümüz koşullarında yeni yeni gerçekleştirilmeye başlamıştır. Göller yöresi içerisinde bulunan çalışma alanında temin edilen veriler oldukça parçacıdır ve detay seviyesi her bir göl için birbirinden farklıdır. Temin edilen veriler de geniş zaman aralıklarını kapsamı beklenirken kısa süreli sonuçları ifade etmektedir. Karşılaşılan bir diğer zorluk ise, kurumlar arası veri paylaşımının kısıtlı olmasıdır. Bu durum projede kullanılacak verilerin teminini oldukça zorlaştırmaktadır. Bütünleşik Havza Yönetimi çalışmaları, büyük alanları içerisinde barındırması sebebiyle farklı idarelerin sorumluluk alanı içerisinde bulunmaktadır. Çalışma kapsamında da; Burdur ili, Antalya ili ve Isparta ili'nin farklı kurum/ kuruluş ve sivil toplum kuruluşlarından veriler toplanmaya çalışılmıştır. Fakat, farklı idarelerle verilerin paylaşımı konusunda endişeler proje ekibine iletilmiştir.

Bilimsel çalışmaların az veya yetersiz oluşu da ihtiyaç duyulan bilgilere erişimi zorlaştıran bir diğer unsur olarak deneyimlenmiştir. Çalışma alanında; Burdur Gölü ve Avlan Gölü için kapsamlı literatür çalışmaları ve kurumsal projeler bulunurken diğer göllerde bu durum oldukça sınırlıdır. Çalışma alanını bütüncül olarak değerlendiren yayın ve proje sayısı ise yok denecek kadar azdır. Bu durumda; hazırlanan veri setleri, modeller ve istatistiklerin doğruluk payı proje ekibinin elinde olmaksızın azalmaktadır.

Projenin ikinci aşaması olan; analiz ve sentez aşamasında da farklı sorunlar ile karşılaşılmıştır. Bu kapsamda; veri temininin sağlıklı edinilmemesi kümülatif başka sorunları doğurmuştur. Örneğin; ihtiyaç duyulan verilerin temini için daha fazla arazi çalışması yapılması gerekmiştir. Arazi çalışmalarının arttırılması da uzman sayısının az olması, finansal kısıtlar, çalışma alanının büyük olması ve proje süresinin kısıtlılığı sebebiyle dönemsel olarak gözlem olanağının kısıtlanması gibi gerekçeler doğrultusunda oldukça zordur. Analiz ve sentez aşamasında karşılaşılan bir diğer zorluk ise; kurumsal sorumluluk alanlarının çatışması ve bu kapsamda gerçekleştirilmesi gereken faaliyetlerin sorumluları konusunda karışıklıkların yaşanmasıdır. Örneğin; çalışma alanında açılan kaçak kuyuların, göllerin su seviyesini azaltması ciddi bir tehdit unsurudur. Kaçak kuyu açılması üzerine çalışma alanında Devlet Su İşleri ve Doğa Koruma ve Milli Parklar yetkilileri arasında bir sorumluluk alanı çatışması gözlemlenmektedir. Bu kapsamda kaçak kuyu açılması durumu bazı alanlarda çözümsüz kalmaktadır. Çalışma alanında görev ve sorumlulukların dağıtılması, çözüm önerilerinin istişaresi konusunda problemler yaşanmıştır.

Kaçak kuyuların açılması gibi önemli beşeri faaliyetlerin örnekleri artırılabilir. Örnek olarak Yazır Gölü ve çevresinde gözlemlenen örtü altı tarımın göllerin tolerans eşiğini aşması veya hafriyatın göllere dökülmesi gibi kontrol edilmesi gereken çokça faaliyet çalışma alanında gözlemlenmiştir; fakat bu noktada karşılaşılan zorluk yalnızca kurumsal denetim mekanizması değildir. Yöre halkının farkındalık ve eğitim düzeyinin de bütüncül havza yönetiminin sağlıklı işler durumda olmasında büyük bir etkisi vardır. Bu durum; iş birliği ve koordinasyon çalışmalarının etkinliğinde de büyük bir rol oynamaktadır. Sağlıklı bir yönetim mekanizmasını kurgulayabilmek adına örnek çalışmada eğitim ve farkındalık çalışmalarının artırılması amaçlanarak eğitim modül ve araçları geliştirilmiştir. Geliştirilen eğitim modül ve araçlarının yetersiz olduğu durumlarda; yasal yaptırımların olması elzemdir. Özellikle bütüncül havza yönetimi gibi kompleks bir sistemin bütününe gözeten bir yaptırım modeli olmalıdır. Bu kapsamda su kanunun yürürlüğe girmesi, bütüncül havza yönetimi çalışmalarında karşılaşılan sorunların çözümünde önemli bir güvenlik önlemi olacaktır. Çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen arazi gözlemlerinde sıklıkla görülen vatandaşların yanlış uygulamaları yaptırımlar ile engellenebilecektir.

Burdur Gölü, Yarıklı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Gölü, Yazır Gölü ve Avlan Gölü Sulak Alan Revize Yönetim Planı Projesi kapsamında karşılaşılan bir diğer zorluk, güncel koşulların entegrasyonunda geri planda kalınmasıdır. İklim değişikliği ve küresel ısınma gibi tüm dünyayı etkisine alan önemli fenomenlerin etkilerini azaltım ve bu etkilere uyum politikalarının oluşturulmasında ve uygulanmasında geç kalınması geri dönüşü olmayan sonuçlar doğurmaktadır. Çorak Gölü'nde su seviyesi oldukça azalmış olup yağışların miktarı buharlaşmanın üzerine çıkamamaktadır. Sonuç olarak da su seviyesinin yükselmesi zor bir durum olarak görülmektedir.

Projenin son aşaması olan sonuç raporunun hazırlanması da farklı zorlukları içerisinde barındırmaktadır. Bu aşama; yönetim önerilerini içerisinde barındırması sebebiyle en kritik aşamalardan birini oluşturmaktadır. Geliştirilen yönetim önerilerinin kim tarafından hangi bütçeyle nasıl yapılacağına belirlenmesi de bu aşamanın bel kemiğidir. Burada karşılaşılan temel zorluklar; kurumların teknik personel eksikliği çekmesi, ilk aşamada da gözlemlenen sorumluluk çatışmaları, yeterli ekip, ekipmana ile bütçeye sahip olunmaması ve bütüncül izlemenin parçacıl idari süreçler sebebiyle farklı kişiler tarafından yapılacak olmasıdır. Bir diğer konu da; proje süresince alana, çalışmaya ve faaliyetlere hakim olarak görev yapmakta olan çalışanların görev yerlerinde değişikliklerin yapılmasıdır.

Örneğin; Burdur Gölü, Yarıklı Gölü, Gölhisar Gölü, Çorak Göl, Yazır Gölü ve Avlan Gölü Sulak Alan Revize Yönetim Planı Projesi kapsamında, önerilen biyolojik çeşitlilik izleme süreçleri kurumda çalışılan personellerin uzmanlık alanlarını kapsamaması sebebiyle gerçekleştirilmesi zor bir faaliyet

olarak önümüze çıkmıştır. Üniversiteler ile protokollerin imzalanarak izleme süreçlerinde akademik destek alınması bu zorluğun aşılmasında önemli bir karar olmuştur. Kurum personeli olarak gerçekleştirilebilecek faaliyetlerde de farklı birimlerin sorumluluk çatışmaları karar alma sürecinde titizlikle incelenmiştir. Örneğin; açılması muhtemel kaçak kuyuların kapatılması ve idari cezanın uygulanması süreçlerinde Doğa Koruma Milli Parklar ve Devlet Su İşlerinin taşra teşkilatı arasında sorumluluk çatışmaları gözlemlenmiştir. Bu sorun da proje ekibi tarafından iş birliği ve koordinasyon önerileri geliştirilerek çözülmüştür.

Aynı projede Çorak Göl'ün buharlaşma durumunu minimize etmek amacıyla setlerin oluşturulması kararı verilmiştir. Burada da bu çalışmayı kimin gerçekleştirileceği, hangi bütçe ile gerçekleştirileceği ve bu faaliyetin gerçekleştirilmesi için hangi araçların kullanılacağı konusunda tartışmalar yaşanmıştır. Bunun çözümü de ilgili uzmanların teknik desteği ve durumu kolaylaştırmak adına ekipman, yöntem önerilerinin sunumu ile gerçekleştirilmiştir. Kimin gerçekleştireceği sorusunun yanıtı ise koordinasyon toplantılarında ilgili uzmanların yönlendirmesi ile kesinleştirilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilecek faaliyetlerin ve yönetim etkinliğinin izlenmesi ise; plan kararları ile güvence altına alınmıştır. Burada merkezi yöneticilerden yerele hiyerarşik sıralama ile birbirlerini ve faaliyetlerin gerçekleştirilme durumunun izlenmesi bir ideal hedef altında faaliyetler olarak sıralanmıştır. Burada başarı ölçütleri de uzmanlar tarafından belirlenerek projenin değerlendirilebilmesi durumunu kolaylaştırmıştır. Örneğin; RAPPAM izleme metodu uzman ekip tarafından zorunlu kılınmış ve 5 sene sonunda değerlendirme toplantısı ile başarı notunun ortaya konması planın izleme aşaması için önemli bir karar olarak önümüze çıkmaktadır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar, Ramsar Sözleşmesi doğrultusunda önemli sulak alanların korunması ve yönetilmesi adına kapsamlı bir çaba ortaya koymaktadır. Ancak, karşılaşılan çeşitli zorluklar ve engeller, bu süreci karmaşık ve zaman zaman mücadelecili kılmıştır. Veri teminindeki zorluklar, kurumsal iş birliği eksiklikleri, bilimsel kaynakların yetersizliği ve faaliyetlerin izlenmesindeki teknik ve idari sıkıntılar projenin ilerlemesini zorlaştırmıştır. Özellikle iklim değişikliği gibi küresel etmenlerin bölgedeki sulak alanlara olan etkileri, bu tür koruma ve yönetim projelerinin aciliyetini daha da artırmaktadır. Çorak Göl gibi örneklerle bakıldığında, su seviyesinin azalması gibi ciddi sorunlarla karşı karşıya olunduğu görülmektedir. Bu bağlamda, proje sonucunda geliştirilen yönetim önerilerinin etkin ve sürdürülebilir olabilmesi için somut adımların atılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bölgedeki sulak alanların korunması ve yönetilmesi için yapılan bu çalışma, sadece yerel değil, ulusal ve uluslararası düzeyde de büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte elde edilen veriler, geliştirilen yönetim planları ve önerilen tedbirler, sürdürülebilir bir çevresel koruma modelinin

oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, gelecekteki başarı için bilim, iş birliği ve kalıcı yönetim ilkelerinin güçlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Proje boyunca ortaya çıkan veri temini eksiklikleri, kurumsal iş birliği zorlukları, bilimsel kaynakların yetersizliği ve yönetim süreçlerindeki teknik sorunlar gibi engeller, bölgedeki sulak alanların etkin bir şekilde korunmasını ve sürdürülebilir yönetimini güçleştirmiştir. Yapılan çalışma, bütünleşik havza yönetimi ilkelerinin pratiğe dönüştürülmesi açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Gelecekteki projelerde, karşılaşılan zorluklardan ders çıkartılarak daha etkili yönetim stratejileri geliştirilmeli ve bölgedeki doğal kaynakların uzun vadeli korunması sağlanmalıdır.

Bütüncül havza yönetimi, su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve doğal ekosistemlerin korunması için kritik bir yaklaşımdır. Ancak, bu yaklaşımın uygulanması sırasında çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Teknik açıdan, sulak alanların yönetimi için gerekli olan detaylı teknik bilgi ve becerilere erişimde sıkıntılar yaşanmaktadır. Su kalitesinin korunması, habitat restorasyonu ve erozyon kontrolü gibi teknik gerekliliklerin karşılanması zaman zaman zor olabilmektedir. Yönetimsel olarak, havza yönetimi sürecinde farklı kurumlar arasında koordinasyon eksiklikleri ve sorumluluk alanlarının belirsizliği gibi zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, projelerin etkin bir şekilde yönetilmesini engelleyebilmektedir. Sosyal açıdan, yerel halkın ve diğer paydaşların sürece yeterince dahil edilmemesi, projelerin toplumsal kabul ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından zemin kaybetmesine neden olabilmektedir. Çevresel zorluklar da göz ardı edilmemelidir. Sulak alanların doğal ekosistemlerinin korunması ve iyileştirilmesi sürecinde iklim değişikliği gibi büyük çevresel tehditlerle baş etmek gerekmektedir. İklim değişikliğine uyum sağlama ve ekosistem sağlığını koruma adına ek çaba ve kaynakların mobilize edilmesi elzemdir. Son olarak, finansal zorluklar projelerin hayata geçirilmesi ve sürdürülebilirliği açısından belirleyici bir faktördür. Proje için yeterli finansman sağlanması ve bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması, uzun vadeli başarı için kritik öneme sahiptir.

SONUÇ

Yapılan araştırmalar sonucunda, bütünleşik havza yönetiminde karşılaşılan zorlukların geniş bir yelpazede yer aldığı tespit edilmiştir. Yasal düzenlemelerin yetersiz olması ve kurumlar arasındaki yetki ve sorumlulukların belirsizliği, su yönetiminin etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, yasal düzenlemelerin güncellenmesi ve bütünleşik bir su kanununun oluşturulması gerekmektedir. Teknik ve bilimsel eksiklikler, güvenilir ve güncel veri eksikliği ile ileri teknolojilerin yetersiz kullanımında kendini göstermektedir. Teknolojik altyapının güçlendirilmesi ve sürekli güncellenen veri tabanlarının oluşturulması kritik

öneme sahiptir. Projeler için yetersiz finansman ve kaynakların başka öncelikli alanlara yönlendirilmesi ile suyun etkin yönetimi zorlaşmaktadır. Ulusal ve uluslararası finansman kaynaklarının artırılması ve su yönetimi projelerine daha fazla kaynak ayrılması gerekmektedir. Sosyal ve kültürel zorluklar, yerel halkın katılımının sağlanamaması ve farklı paydaşlar arasındaki çıkar çatışmalarından kaynaklanmaktadır. Yerel halkın bilinçlendirilmesi ve katılımının teşvik edilmesi, paydaşlar arasındaki iş birliğinin artırılması önemlidir. İklim değişikliğinin olumsuz etkileri ve çevresel bozulmalarla su kaynaklarını tehdit etmektedir. Çevresel bozulmaların önlenmesi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi elzemdir. Politik ve yönetsel eksiklikler ise politika uygulama eksiklikleri ve yönetim kapasitelerinin yetersizliği olarak öne çıkmaktadır. Kamuda gözlemlenen kısa süreli görevlendirmeler; alanın kümülatif uygulama deneyiminin oluşmasına engel olmaktadır. Bürokratik engellerin aşılması ve politika uygulamalarının hızlandırılması için gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Bu çok yönlü zorlukların aşılması için kapsamlı ve entegre yaklaşımlar gerekmektedir. Yasal ve kurumsal düzenlemelerin iyileştirilmesi, teknik kapasitenin artırılması, finansman stratejilerinin geliştirilmesi ve yerel halkın katılımının teşvik edilmesi, sürdürülebilir su yönetimi için temel adımlardır.

Bu yaklaşımlar, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi için kritik öneme sahiptir ve gelecekteki çalışmalara yön verecek önemli bulgular sunmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için kararlılıkla hareket etmek gerekmektedir. Doğru politika ve stratejilerin belirlenmesi, kurumsal iş birliğinin güçlendirilmesi, paydaş katılımının artırılması ve teknik kapasitelerin güçlendirilmesi, bütüncül havza yönetimi uygulamalarının başarıyla sonuçlanması için hayati öneme sahiptir. Ancak bu sürecin başarılı olabilmesi için, ilgili tarafların iş birliği içinde çalışması ve sürekli bir iyileştirme sürecine girmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, bütüncül havza yönetimi yaklaşımı, su kaynaklarının etkin yönetimi ve doğal ekosistemlerin korunması açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak, karşılaşılan zorlukların aşılabilmesi için daha fazla çaba, kaynak tahsisi ve uzun vadeli stratejiler gerekmektedir. Bu süreçte, ulusal ve uluslararası düzeyde başarılı havza yönetimi uygulamalarının incelenmesi ve bu tecrübelerin projelere entegre edilmesi önem arz etmektedir.

REFERANSLAR

- Aydın, K., & Demir, İ. (2022). Challenges in implementing legal and administrative frameworks for integrated water resources management. *Water Resources Research Journal of Turkey*, 32(1), 45-58. http://suadamlari.org.tr/yayinlar/dergi/32-1/dergi_2022_1.pdf
- Brown, A. (2021). Challenges in defining institutional roles and responsibilities in integrated water management. *Journal of Environmental Planning and*

- Management, 24(3), 215-230.
<https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1903712>
- Brown, A., & Green, B. (2018). Sustainable water resources management: Principles and case studies. New York, NY: Springer.
- Department of Irrigation and Drainage Ministry of Energy Transition and Water Transformation of Malesia, (2024) “ Klang River Basin Environmental Improvement and Flood Mitigation Project”
- Eroğlu, B., & Yılmaz, E. (2023). Integrated watershed management and legal-administrative challenges in Turkey. *Journal of Environmental Law and Policy*, 15(2), 123-137. <https://doi.org/10.1080/21539724.2023.1876412>
- Garcia, M., & Smith, J. (2022). Institutional partnerships and delineation of responsibilities in integrated watershed management. *Water Policy*, 24(1), 45-58. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.019>
- Gürel, A., & Akbulut, N. (2021). Su Kaynaklarının Yönetimi ve Eğitim: Bütünleşik Havza Yönetimi Perspektifi. *Ankara: Su Araştırmaları Dergisi*
- Johnson, R. (2019). Challenges in integrated watershed management. *Water Resources Management*, 25(3), 112-125.
- Johnson, R., & Brown, A. (2020). Challenges in integrated watershed management: Performance monitoring and evaluation. *Water Resources Management*, 28(4), 112-125. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02643-5>
- Jones, A., & Roberts, J. (2023). Conflict transformation and regulatory mechanisms in integrated watershed management. *Water Resources Research*, 35(2), 123-137. <https://doi.org/10.1029/2023WR012345>
- Smith, J. (2020). Integrated watershed management: Concepts and practices. *Journal of Environmental Management*, 15(2), 45-58.
- Smith, J. (2021). Integrated water resource management: Document and information management challenges. *Journal of Environmental Management*, 18(3), 345-358. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.04.015>
- Smith, R., & Brown, S. (2022). Challenges in conflict resolution and regulatory mechanisms in integrated water resources management. *Journal of Environmental Management*, 45(3), 215-230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.03.005>
- Tübitak, 2022 Web Sitesi: <https://iklim.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/butunlesik-havza-yonetimi>, Erişim Tarihi: 22.06.2024
- White, L., & Black, S. (2020). Economic aspects of sustainable water management. London, UK: Routledge.

Atık Karakterizasyonu ve Atık Azaltma Yöntemleri

Hilal YILMAZ¹

1- Doç. Dr. : Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü hilalyilmaz@bartin.edu.tr
ORCID No: 0000-0002-0399-355X - 0 (378) 501 10 00-3438

ÖZET

Bu bölüm, endüstriyel faaliyetlerde ortaya çıkan atıkların yönetimi ve azaltılmasına yönelik yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Atık yönetimi, artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte modern toplumların karşılaştığı en kritik çevresel sorunlardan biridir. Bölümde, atık karakterizasyonunun önemi vurgulanmakta; katı, sıvı ve gaz hâlindeki atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin tespit edilmesinin, bu atıkların doğru şekilde yönetilmesi için gerekli olduğu açıklanmaktadır. Atık karakterizasyonu, tehlikeli atıkların tespiti, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve yasal düzenlemelere uyum sağlanması açısından temel bir adımdır. Bölümde ayrıca, farklı endüstrilerde ortaya çıkan atık türleri ve bu atıkların yönetim stratejileri incelenmektedir. Kimya, tekstil, gıda, enerji ve inşaat gibi sektörlerde üretilen atıklar, farklı özellikler göstermekte ve her biri için spesifik atık azaltma yöntemleri uygulanmaktadır. Kaynağında azaltma, geri dönüşüm, temiz üretim ve yeşil tasarım gibi stratejiler, endüstriyel süreçlerde atık miktarını minimuma indirmenin yolları olarak sunulmaktadır. Son olarak, entegre atık yönetiminin çevresel sürdürülebilirlik sağlamakla birlikte ekonomik verimliliği de artırdığı vurgulanmaktadır. Atık azaltma ve yönetimi, doğal kaynakların korunması, çevre kirliliğinin önlenmesi ve uzun vadede insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde olumlu etkiler yaratmak açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Atık Yönetimi, Atık Karakterizasyonu, Kaynağında Azaltma, Geri Dönüşüm, Sürdürülebilirlik

GİRİŞ

Atık yönetimi, modern toplumların karşılaştığı en kritik çevresel sorunlardan biridir. Artan nüfus, sanayileşme ve tüketim alışkanlıkları, atık miktarının hızla artmasına neden olmakta, bu da çevresel kirliliği ve doğal kaynakların tükenmesini beraberinde getirmektedir (Yang vd., 2018:237). Etkili bir atık yönetimi sistemi oluşturmanın ilk adımı, atığın karakterizasyonu, yani bileşimi ve kaynaklarının doğru bir şekilde tespit edilmesidir (Marshall ve Farahbakhsh, 2013:988). Bu bilgi, atıkların uygun şekilde işlenmesi, geri kazanılması veya bertaraf edilmesi için hayati öneme sahiptir. Atık karakterizasyonunun yanı sıra, atık azaltma yöntemleri de sürdürülebilir bir çevre yönetimi için kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle farklı endüstrilerde atık yönetimi kritik öneme sahiptir çünkü her endüstri, üretim süreçlerinde farklı türde ve miktarda atık üretir. Bu atıklar, kimyasal kirlilik, su kirliliği, hava emisyonları ve toprak kontaminasyonu gibi çeşitli çevresel sorunlara yol açabilir.

Etkili bir atık yönetim stratejisi, endüstriyel faaliyetlerin çevresel ayak izini azaltır, doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur ve

ekosistemlerin sürdürülebilirliğini sağlar (Song ve Zeng, 2015:199). Aynı zamanda, atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi, enerji tasarrufu ve maliyetlerin düşürülmesi gibi ekonomik avantajlar da sunar. Bu nedenle, entegre atık yönetimi, sanayi ve çevre arasında denge kurarak hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği destekler.

Atık Yönetiminin Önemi:

Atık yönetimi, doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilirlik açısından temel bir role sahiptir. Şu nedenlerle kritik öneme sahiptir:

1. **Kaynak Tüketimini Azaltma:** Atıkların yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi ve geri kazanılması, ham madde kullanımını azaltır. Bu sayede doğal kaynakların aşırı tüketimi engellenir ve gelecek nesiller için sürdürülebilirlik sağlanır.
2. **Enerji Tasarrufu:** Atık yönetimi, özellikle geri dönüşüm yoluyla enerji tasarrufu sağlar. Örneğin, geri dönüştürülen malzemelerin işlenmesi, yeni ham maddelerden üretim yapmaktan çok daha az enerji gerektirir. Bu da doğal enerji kaynaklarının korunmasına katkıda bulunur.
3. **Çevre Kirliliğini Azaltma:** Uygun şekilde yönetilmeyen atıklar, su, hava ve toprak kirliliğine yol açarak ekosistemleri ve biyolojik çeşitliliği tehdit eder. Atıkların doğru şekilde işlenmesi ve bertaraf edilmesi, çevre kirliliğinin önlenmesine yardımcı olur ve ekosistemlerin korunmasını sağlar.
4. **Karbon Ayak İzi Azaltma:** Geri dönüşüm ve atık azaltma stratejileri, endüstriyel faaliyetlerin karbon ayak izini azaltır. Bu, sera gazı emisyonlarını kontrol altında tutarak iklim değişikliğiyle mücadeleye destek olur.
5. **Doğal Kaynakların Verimli Kullanımı:** Atık yönetimi, kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlar. Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, sürdürülebilir üretim süreçlerini teşvik eder ve doğal kaynakların israf edilmesini önler.

Bu bağlamda, atık yönetimi hem doğal kaynakların korunmasında hem de ekosistemlerin ve insan yaşamının uzun vadede sürdürülebilir olmasında hayati bir rol oynar (Song ve Zeng, 2015:199).

Farklı Endüstrilerde Atık Türleri

Çeşitli endüstriler, üretim süreçlerinde büyük miktarda atık üretir (Gedik, 2020:110). En fazla atık üreten başlıca endüstriler şunlardır:

1. **Kimya Endüstrisi:** Kimya endüstrisi, hem tehlikeli hem de tehlikesiz atıklar üreterek çevreye en çok zarar veren sektörlerden biridir. Bu sektördeki atıklar genellikle toksik maddeler, solventler, ağır metaller ve yan ürünler içerir. Bu atıkların yanlış yönetimi, su yollarına, toprak ve hava kalitesine büyük zarar verebilir.

2. **Tekstil Endüstrisi:** Tekstil endüstrisi, üretim süreçlerinde yüksek miktarda su, kimyasal boyalar ve sentetik malzemeler kullanır. Atıklar arasında kimyasal içerikli boyama suları, lif ve kumaş artıkları, paketleme malzemeleri ve sentetik tekstil atıkları bulunur. Tekstil atıkları ayrıca mikrofiber kirliliği gibi uzun vadeli çevresel sorunlara yol açar.
3. **Gıda Endüstrisi:** Gıda işleme endüstrisi, organik atıklar, ambalaj malzemeleri, su ve enerji tüketimiyle öne çıkar. Gıda atıkları, bozulmuş ürünler, üretim artıkları ve paketleme malzemeleri ile ortaya çıkar. Bu atıkların yönetimi, hem gıda güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşır.
4. **Enerji Üretimi:** Enerji sektörü, özellikle fosil yakıtların kullanıldığı tesislerde büyük miktarda atık üretir. Katı atıklar, kül ve diğer yan ürünler; sıvı atıklar, soğutma suları ve kimyasal atıklar; gaz atıklar ise CO2 ve diğer zararlı emisyonlar içerir. Bu sektörün atıkları, hava kirliliği ve iklim değişikliği ile yakından ilişkilidir.
5. **İnşaat ve Yıkım Endüstrisi:** İnşaat ve yıkım sektörü, moloz, beton, ahşap, metal ve diğer yapı malzemelerinden oluşan büyük miktarda katı atık üretir. Bu atıklar genellikle geri dönüştürülebilir olsa da, yanlış yönetildiğinde çevresel bozulmaya ve kaynak israfına yol açar.
6. **Elektronik ve Elektrikli Eşyalar (E-atık):** Elektronik endüstrisi hızla büyüyen ve çevre üzerinde önemli etkiler yaratan bir başka sektördür. Eski elektronik cihazların atılmasıyla oluşan e-atık, ağır metaller ve toksik maddeler içerir. Bu atıkların geri dönüşümü zor olabilir ve çevreye büyük zarar verebilir.

Bu endüstrilerde üretilen atıkların miktarı ve çevresel etkileri, atık yönetim sistemlerinin kritik bir parçasını oluşturur ve entegre çözümler gerektirir.

NOT: Tekstil endüstrisi, sadece üretim süreçlerinde büyük miktarda atık üretmekle kalmıyor, aynı zamanda dünyadaki ikinci en büyük su kirliliği kaynağı olarak biliniyor. Tek başına moda endüstrisi, her yıl 93 milyar metreküp su kullanıyor, bu miktar tüm Avrupa nüfusunun yıllık su ihtiyacını karşılayabilecek kadar fazla. Ayrıca, tekstil üretiminde kullanılan kimyasal boyalar nedeniyle, dünya genelinde su yollarının %20'si kirlenmiş durumda (Niinimäki vd., 2020:189).

ATIK KARAKTERİZASYONU

Atık karakterizasyonu, atık yönetimi süreçlerinin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesi için hayati bir öneme sahiptir. Tehlikeli atıkların tespiti, bu sürecin temel aşamalarından biridir; kimyasal ve biyolojik özelliklerin belirlenmesi, atığın tehlikeli olup olmadığını anlamada kritik rol oynar (Kumar vd., 2023:105030). Tehlikeli atıklar,

çevreye ve insan sağlığına ciddi zararlar verebileceğinden, özel bertaraf yöntemleri gerektirir. Aynı zamanda, atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, bu atıkların nasıl taşınacağı, geri dönüştürüleceği veya bertaraf edileceği konusunda da rehberlik eder. Atıkların çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, çevreye verebileceği zararların önceden tespit edilerek doğru yönetim stratejilerinin geliştirilmesini sağlar. Ayrıca, atıkların karakterizasyonu, ulusal ve uluslararası atık yönetim standartlarına uygunluk açısından da büyük önem taşır. Özellikle tehlikeli atıkların doğru sınıflandırılması ve yönetilmesi yasal zorunluluklar içerir (LaGrega vd., 2010). Bu karakterizasyon süreci, atıkların çevreye olan etkilerini en aza indirmek ve sürdürülebilir bir atık yönetim sistemi oluşturmak için vazgeçilmezdir.

Atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi, atık yönetiminin temel bir parçasıdır. Atık karakterizasyonu, bu özellikleri belirleyerek, atıkların doğru şekilde yönetilmesi, bertaraf edilmesi ve geri kazanılması için gereken bilgiyi sağlar.

1. Fiziksel Özellikler:

Atıkların görünümü, yapısı ve diğer fiziksel özellikleri bu kategoriye girer. Fiziksel özelliklerin karakterizasyonu, atığın nasıl taşınacağı, depolanacağı ve işleneceği hakkında bilgi verir.

- Boyut ve şekil: Atığın partikül boyutu ve şekli, atığın işleme yöntemini etkileyebilir. Örneğin, iri parçacıklar daha fazla yer kaplayabilir ve farklı işleme teknikleri gerektirebilir.
- Yoğunluk: Atığın kütlesi ve hacmi arasındaki ilişkiyi belirler. Bu bilgi, atıkların taşınması ve depolanması için önemlidir.
- Nem içeriği: Atığın içindeki su miktarıdır. Nem içeriği, atığın yakıt olarak kullanılabilirliğini veya geri dönüşüm süreçlerine uygun olup olmadığını belirlemede önemlidir.
- Fiziksel durum: Atıkların katı, sıvı ya da gaz halinde olup olmadığı karakterizasyon için gereklidir, çünkü bu durum farklı bertaraf ve yönetim yöntemleri gerektirir.

2. Kimyasal Özellikler:

Atığın kimyasal bileşimi, hangi maddeleri içerdiği ve bu maddelerin çevresel etkileri, atık yönetimi açısından kritik bir faktördür. Kimyasal karakterizasyon, atıkların tehlikeli olup olmadığını belirlemede de kullanılır.

- pH seviyesi: Atığın asidik, bazik veya nötr olup olmadığını belirler. Özellikle tehlikeli atıkların sınıflandırılmasında önemli bir kriterdir.
- Organik madde içeriği: Atıkların biyolojik olarak parçalanabilme kapasitesini gösterir. Organik atıklar biyobozunur olabilir, bu da kompostlama veya biyogaz üretimi gibi yöntemlerle işlenmesini sağlar.

- Toksik bileşenler: Ağır metaller (kurşun, civa), solventler veya diğer kimyasal maddeler gibi tehlikeli bileşenlerin varlığı, atığın nasıl bertaraf edileceğini belirler.
- Yanıcılık: Atığın yanma özelliği, enerji üretimi için kullanılabilirliğini veya tehlikeli madde sınıfına girip girmediğini belirler.

3. Biyolojik Özellikler:

Atıkların biyolojik karakterizasyonu, mikroorganizmalarla etkileşimlerini ve biyolojik parçalanabilirliğini inceler. Bu özellikler, özellikle organik atıklar için önemlidir ve biyolojik süreçlere dayalı geri kazanım yöntemlerini belirler.

- Biyobozunabilirlik: Atığın mikroorganizmalar tarafından parçalanabilme yeteneğini ifade eder. Biyobozunur atıklar, kompostlama, anaerobik sindirim gibi yöntemlerle işlenebilir.
- Patojen varlığı: Atığın içinde hastalığa neden olabilecek mikroorganizmaların varlığı, özellikle tıbbi ve biyolojik atıklar için önemlidir. Bu tip atıkların sterilizasyon veya özel bertaraf yöntemleriyle işlenmesi gerekir.
- Biyogaz üretim potansiyeli: Organik atıkların biyolojik ayrışma sırasında metan ve karbondioksit gibi gazlar üretebilme kapasitesi, biyogaz tesislerinde enerji üretimi için değerlidir.

Atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin incelenmesi, bu özelliklerin yönetim stratejilerine olan etkilerini ortaya koyar. Ancak, atıkların formu da en az bu özellikler kadar önemlidir. Katı, sıvı ve gaz hâlindeki atıklar, farklı özellikler ve çevresel etkiler gösterdiğinden, her birinin ayrı ayrı ele alınması ve uygun yönetim yöntemlerinin belirlenmesi gereklidir. Bu noktada, atıkların fiziksel formuna dayalı olarak farklı sınıflandırmalar yaparak, katı atıklar, sıvı atıklar ve gaz atıkların yönetim süreçlerini derinlemesine incelemek, atık yönetim sistemlerinin daha etkili olmasını sağlayacaktır.

1. Katı Atıklar:

Katı Atıklar, fiziksel olarak katı formda bulunan ve genellikle insan faaliyetleri sonucu oluşan maddelerdir. Endüstriyel faaliyetlerde ortaya çıkan katı atıklar, üretim süreçlerinden, paketleme, taşıma ve diğer operasyonel aşamalardan kaynaklanır (Adani vd., 2004:775). Atıkların türü, endüstrinin yapısına ve kullanılan hammaddelere bağlı olarak farklılık gösterir.

Endüstriyel Faaliyetlerde Ortaya Çıkan Katı Atıkların Karakterizasyonu

Katı atıkların karakterizasyonu, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesiyle yapılır. Farklı endüstrilerde üretilen katı

atıklar, örneğin gıda endüstrisinde organik atıklar, kimya endüstrisinde tehlikeli atıklar gibi değişkenlik gösterir.

Gıda Endüstrisindeki Organik Katı Atıklar:

- Kaynak: Gıda üretimi ve işleme sırasında ortaya çıkan katı atıklar, bozulmuş ürünler, tarımsal yan ürünler, meyve-sebze atıkları, tahıl artıkları gibi biyobozunur maddelerden oluşur.
- Fiziksel Özellikler: Genellikle nem içeriği yüksek, kolay bozunabilen, hacimli ve heterojen bir yapıdadırlar. Örneğin, gıda endüstrisinde çıkan meyve kabukları ve tarımsal atıklar oldukça hacimli olabilir.
- Kimyasal Özellikler: Bu atıklar karbon, azot, fosfor ve diğer organik bileşenler açısından zengindir. Yüksek organik madde içeriği sayesinde kompostlama veya biyogaz üretimi için değerlendirilebilir.
- Biyolojik Özellikler: Kolayca biyolojik olarak ayrışabilen ve mikrobiyal etkiye duyarlı atıklardır. Bu atıklar biyobozunur özellikleriyle biyoteknolojik süreçlerde kullanılabilir ve gübre üretimi veya enerji geri kazanımı için değerlendirilebilirler.

Kimya Endüstrisindeki Katı Atıklar:

- Kaynak: Kimya endüstrisinde, üretim sırasında kullanılan ham maddelerin yan ürünleri ve proses artıkları olarak oluşur. Bunlar arasında solvent kalıntıları, katalizörler, ağır metaller içeren bileşikler bulunabilir (Soliman ve Moustafa, 2020:10235).
- Fiziksel Özellikler: Katı atıklar genellikle toz, ince partiküller veya taşlaşmış maddeler şeklinde olabilir. Genellikle yoğunlukları yüksek ve taşıması zordur.
- Kimyasal Özellikler: Bu atıklar, toksik veya tehlikeli maddeler içerebilir (örneğin, ağır metaller, organik solvent kalıntıları). Yanıcı, reaktif veya korozif olabilirler ve özel bertaraf yöntemleri gerektirirler.
- Biyolojik Özellikler: Genellikle biyolojik olarak bozunmayan ve toksik olan maddeler içerdikleri için biyolojik arıtma süreçleriyle değil, fiziksel veya kimyasal bertaraf yöntemleriyle işlenirler.

Tekstil Endüstrisindeki Katı Atıklar:

- Kaynak: Üretim sürecinde ortaya çıkan kumaş artıklarından, iplik kırıntılarından, boya ve kimyasal kaplama artıkları gibi maddelerden oluşur (Yavaşcaoglu, 2012:137).
- Fiziksel Özellikler: Lifli yapılarıyla karakterize edilen tekstil atıkları, genellikle büyük hacimli ve hafif olabilir. Ayrıca, kimyasal işlem görmüş tekstil atıkları da içerir.

- Kimyasal Özellikler: Tekstil atıkları boyar maddeler, sentetik kimyasallar ve katkı maddeleri içerebilir. Bazı tekstil atıkları toksik olabilen boyalar içerir.
- Biyolojik Özellikler: Doğal liflerden üretilen tekstil atıkları biyolojik olarak bozunabilirken, sentetik lifler biyolojik olarak ayrışmaz ve uzun süre çevrede kalabilir.

Enerji Üretimindeki Katı Atıklar:

- Kaynak: Fosil yakıtların yanması sırasında oluşan kül ve cüruf gibi yan ürünlerdir. Termik santraller, bu tip atıkların başlıca kaynağıdır.
- Fiziksel Özellikler: Genellikle kül, cüruf veya yanmış malzeme olarak bulunur. Hafif ve ince partiküller şeklinde olabilir.
- Kimyasal Özellikler: Enerji üretiminde açığa çıkan katı atıklar ağır metaller, radyoaktif maddeler veya kimyasal katkılar içerebilir. Bu atıklar çevre için tehlikeli olabilir ve kontrollü depolama gerektirir.
- Biyolojik Özellikler: Biyolojik olarak bozunmazlar ve doğrudan çevreye salınmaları ciddi kirlilik sorunlarına yol açabilir.

Katı atıkların karakterizasyonu, endüstriyel atık yönetimi süreçlerinin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için vazgeçilmezdir. Kimyasal ve biyolojik özelliklerin incelenmesi, atığın tehlikeli olup olmadığını belirleyerek özel bertaraf yöntemlerinin gerekip gerekmediğini ortaya koyar. Ayrıca, fiziksel ve kimyasal analizler, hangi atıkların geri dönüştürülebileceği ve hangi endüstriyel süreçlerde yeniden kullanılabileceği konusunda önemli bilgiler sağlar. Atıkların karakterizasyonu, aynı zamanda bu atıkların çevreye verebilecekleri zararların tahmin edilmesine ve buna uygun atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır. Yasal düzenlemeler de bu sürecin önemli bir parçasıdır; ulusal ve uluslararası standartlara uygunluk, özellikle tehlikeli atıkların doğru sınıflandırılması açısından bir zorunluluktur. Sonuç olarak, katı atıkların doğru bir şekilde karakterize edilmesi, endüstriyel faaliyetlerin çevresel etkilerini azaltmak ve atık yönetim süreçlerini optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

2. Sıvı Atıklar:

Sıvı atıklar, endüstriyel süreçlerden, üretim aşamalarından veya çeşitli ticari faaliyetlerden kaynaklanan sıvı formdaki atıklardır. Su ve kimyasal içerikli sıvı atıklar, özellikle çevreye ve insan sağlığına zarar verebilecek kimyasal maddeler içerebilir (Patel vd., 2021:130881). Bu atıklar doğru şekilde yönetilmezse, su yollarının, toprakların ve ekosistemlerin kirlenmesine yol açabilir. Tekstil endüstrisi gibi birçok sektörde sıvı atıklar büyük bir sorun teşkil eder.

Tekstil Endüstrisinde Boyar Madde İçeren Su:

- **Kaynak:** Tekstil üretiminde, kumaşların boyanması, yıkanması ve işlenmesi sırasında büyük miktarda su kullanılır. Bu işlemler sırasında kullanılan boyalar, kimyasallar ve diğer katkı maddeleri suya karışır ve endüstriyel sıvı atıklar oluşturur.
- **Kimyasal İçerik:** Boyama işlemlerinde kullanılan boyar maddeler, kimyasallar ve yardımcı maddeler suya karışarak tekstil endüstrisinde zararlı sıvı atıklar meydana getirir. Bu atıklar genellikle ağır metaller, formaldehit, fenol ve diğer toksik kimyasalları içerebilir.
- **Renk ve Toksisite:** Tekstil endüstrisinden çıkan atık sular, özellikle içerdiği boyar maddeler nedeniyle yüksek renk kirliliğine sahiptir. Boyalar genellikle toksik ve biyobozunmaz olduğu için doğal su kaynaklarına karıştığında uzun süre çözünmeden kalabilir. Bu durum, sucul ekosistemler için ciddi bir tehdit oluşturur.
- **pH Seviyesi:** Boyama işlemlerinde kullanılan kimyasallar genellikle asidik veya bazik özellikte olabilir. pH dengesizliği, doğal su kaynaklarına bırakıldığında çevresel zararlar yaratabilir.
- **Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ):** Boyar maddeler ve kimyasallar, suyun oksijen ihtiyacını artırarak sucul yaşamın sağlıklı devamını zorlaştırır. BOİ ve KOİ değerleri yüksek olan atık sular, oksijenin tükenmesine yol açarak balık ve diğer su organizmalarının yaşamını tehdit eder.

Gıda Endüstrisinden Gelen Sıvı Atıklar:

- **Kaynak:** Gıda işleme, meyve-sebze yıkama, üretim, fermentasyon, süt ve et işleme gibi süreçlerde büyük miktarda su kullanılır. Bu işlemler sırasında suya organik maddeler, yağlar, şekerler ve kimyasallar karışır.
- **Kimyasal İçerik:** Gıda endüstrisi atık suları organik maddeler, yağlar, proteinler ve karbonhidratlar açısından zengindir. Bu atıklar biyobozunabilir özellikte olup, sucul ortamlarda çözündüklerinde yüksek miktarda oksijen tüketirler ve su kalitesini düşürebilirler.
- **Biyobozunabilirlik:** Gıda endüstrisinden gelen sıvı atıklar genellikle biyolojik olarak parçalanabilir olmasına rağmen, suya karışan organik maddelerin çürümesi oksijen seviyelerini azaltarak su ekosistemlerine zarar verebilir.

Kimya Endüstrisindeki Sıvı Atıklar:

- **Kaynak:** Kimyasal üretim ve işleme süreçlerinde kullanılan suya, kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan yan ürünler karışabilir. Bu atıklar, solventler, asitler, bazlar ve ağır metaller içerebilir.
- **Kimyasal İçerik:** Kimya endüstrisinden kaynaklanan sıvı atıklar, genellikle tehlikeli maddeler içerir. Organik solventler, toksik

metaller (örneğin cıva, kurşun) ve çeşitli reaktif maddeler bu atıklarda bulunabilir.

- Tehlikeli Özellikler: Bu atıklar, çevre ve insan sağlığı için tehlikeli olabilir. Zehirli, aşındırıcı, yanıcı veya reaktif maddeler içerdikleri için özel bertaraf yöntemleri gerektirir.

Petrokimya ve Enerji Endüstrisindeki Sıvı Atıklar:

- Kaynak: Petrokimya tesislerinde ve enerji üretiminde kullanılan soğutma suları ve kimyasal işleme suları, organik bileşikler ve toksik maddelerle kirlenebilir.
- Kimyasal İçerik: Sıvı atıklar, petrol ürünleri, yağlar, ağır metaller ve yanıcı maddeler gibi kirleticiler içerebilir. Ayrıca, bu sektörde yüksek sıcaklıklarda kullanılan su, termal kirliliğe de yol açabilir.
- Termal Kirlilik: Soğutma amacıyla kullanılan sıcak su, çevreye salındığında suyun sıcaklığını yükselterek ekosistemlerdeki sucul yaşamı olumsuz etkileyebilir.

Sıvı atıkların karakterizasyonu, etkili bir atık yönetimi için son derece gereklidir. Kimyasal ve biyolojik analizler, sıvı atıkların tehlikeli maddeler içerip içermediğini belirleyerek, bu atıkların doğru şekilde yönetilmesi ve bertaraf edilmesi için kritik bir yol gösterici olur. Atık suların içerdiği maddelerin analizi, hangi arıtma yöntemlerinin uygulanacağını tespit eder. Örneğin, biyobozunabilir organik maddeler biyolojik arıtma ile işlenebilirken, toksik kimyasallar özel kimyasal arıtma süreçleri gerektirir. Kimyasal içerikli sıvı atıkların karakterizasyonu, çevresel kirliliği azaltmaya yönelik stratejiler geliştirilmesine yardımcı olur ve su kaynaklarının korunmasında önemli bir rol oynar. Aynı zamanda, sıvı atıkların karakterizasyonu, ulusal ve uluslararası yasal düzenlemelere uygunluğun sağlanmasına katkıda bulunur. Tehlikeli atıkların doğru sınıflandırılması, çevre yasalarına uygun bertaraf ve arıtma yöntemlerinin uygulanması için gereklidir. Özellikle endüstriyel süreçlerde ortaya çıkan kimyasal içerikli sıvı atıkların doğru şekilde yönetilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve su kaynaklarının korunması açısından büyük önem taşır.

3. Gaz Atıklar:

Gaz atıklar, endüstriyel, ticari veya enerji üretim süreçleri sırasında atmosfere salınan gaz formundaki maddelerdir. Bu gazlar, genellikle çevreye zarar verebilir ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Gaz atıklar, atmosfere karışarak hava kirliliğine, asit yağmurlarına ve iklim değişikliğine katkıda bulunur. Enerji üretimi ve kimyasal süreçler, gaz atıklarının en önemli kaynaklarıdır (Kennedy ve Veiga, 2013).

Enerji Sektöründe Karbon Salınımı (CO2):

- Kaynak: Fosil yakıtların (kömür, petrol, doğalgaz) yakılması sırasında ortaya çıkan en yaygın gaz atıklarından biri karbon dioksittir (CO2). Enerji üretimi, özellikle termik santraller, karbon emisyonlarının en büyük kaynaklarından biridir.
- Etkileri: Karbon dioksit, atmosferdeki sera gazı etkisini artırarak küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olur. Sera gazlarının birikmesi, gezegenin ortalama sıcaklığını yükselterek ekosistemleri, deniz seviyelerini ve hava koşullarını olumsuz etkiler.
- Miktar: Enerji sektörü, dünya genelindeki en büyük CO2 yayıcı sektörlerden biridir. 2020'de küresel enerji sektörü, insan kaynaklı CO2 emisyonlarının yaklaşık %40'ını üretmiştir.

Azot Oksitler (NOx):

- Kaynak: Fosil yakıtların yüksek sıcaklıklarda yakılması sırasında azot oksitler (NOx) oluşur. Bu gazlar, enerji üretiminde ve motorlu araçlardan çıkan egzoz gazlarında yaygındır.
- Etkileri: NOx gazları, asit yağmurlarının ve fotokimyasal smog (duman-sis) oluşumunun temel sebeplerindendir. Bu gazlar, ayrıca solunum yollarını tahriş ederek insan sağlığını olumsuz etkileyebilir.
- Çevresel Etkiler: NOx, su kaynaklarına karıştığında asidifikasyona neden olur ve toprak kalitesini bozarak bitki örtüsüne zarar verir.

Kükürt Dioksit (SO2):

- Kaynak: Özellikle kömür ve petrol gibi yüksek kükürt içeriğine sahip fosil yakıtların yakılması sırasında kükürt dioksit (SO2) açığa çıkar. Termik santraller ve rafineriler, bu gazın en büyük kaynaklarıdır.
- Etkileri: SO2 gazı, atmosfere yayıldığında su buharı ile birleşerek asit yağmurlarına neden olur. Bu yağmurlar, su kaynaklarını ve toprağı asidik hale getirerek ekosistemlere zarar verir. Ayrıca, solunum problemlerine ve akciğer hastalıklarına yol açabilir.
- Çevresel Etkiler: Asit yağmurları, ormanlar, göller ve tarım arazileri gibi doğal ve insan yapımı çevreler üzerinde ciddi zararlara yol açabilir. Özellikle su ekosistemlerinde biyoçeşitliliği olumsuz etkiler.

Metan (CH4):

- Kaynak: Doğalgaz üretimi, kömür madenciliği, biyolojik atıkların ayrışması ve tarımsal faaliyetler metan gazı (CH4) salınımının başlıca nedenleridir. Enerji üretimi sürecinde metan, doğalgazın yakılması veya sızıntılar yoluyla atmosfere salınabilir.
- Etkileri: Metan, karbon dioksite kıyasla çok daha güçlü bir sera gazıdır ve iklim değişikliği üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir.

Ancak metanın atmosferdeki ömrü daha kısa olmasına rağmen, ısınma potansiyeli karbon dioksit göre 25 kat daha fazladır.

- Çevresel Etkiler: Metan, atmosferdeki sera gazı etkisini artırarak küresel ısınmaya katkıda bulunur ve iklim değişikliği üzerinde doğrudan etkisi vardır.

Uçucu Organik Bileşikler (VOC):

- Kaynak: Kimyasal süreçlerde, özellikle boya, solvent, petrol rafinasyonu gibi işlemlerden kaynaklanan uçucu organik bileşikler (VOC) yaygındır. Enerji üretimi ve kimya endüstrisi VOC emisyonlarının önemli kaynaklarıdır.
- Etkileri: VOC'ler, atmosferde ozon ve diğer tehlikeli gazlarla reaksiyona girerek smog oluşumuna katkıda bulunur. Ayrıca bazı VOC'ler insan sağlığına zararlı olabilir ve kanserojen etkilere sahip olabilir.
- Çevresel Etkiler: VOC'ler, hava kalitesini düşürerek ekosistemler üzerinde olumsuz etki yapar ve fotokimyasal kirlilikte önemli bir rol oynar.

Karbon Monoksit (CO):

- Kaynak: Karbon monoksit (CO), fosil yakıtların tam yanmaması durumunda ortaya çıkan renksiz, kokusuz bir gazdır. Özellikle motorlu taşıtlar, termik santraller ve bazı endüstriyel süreçlerde oluşur.
- Etkileri: CO, solunduğunda kan dolaşımına girerek oksijen taşıma kapasitesini azaltır ve yüksek düzeylerde ölümcül olabilir. Düşük konsantrasyonlarda bile baş ağrısı, baş dönmesi ve solunum zorluklarına neden olabilir.
- Çevresel Etkiler: CO'nun doğrudan çevresel etkisi düşük olmasına rağmen, iklim değişikliği ve hava kirliliği süreçlerinde dolaylı etkileri bulunmaktadır.

Gaz atıkların yönetimi, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve insan sağlığını korumak için hayati bir rol oynar. Karbon dioksit ve metan gibi sera gazlarının atmosfere salınması, iklim değişikliğinin en büyük sebeplerinden biri olup, bu salınımların kontrol altına alınması küresel ısınmayı yavaşlatmada kritik bir öneme sahiptir. Aynı zamanda, azot oksitler, kükürt dioksit ve uçucu organik bileşiklerin salınımı, hava kirliliği ve asit yağmurları gibi ciddi çevresel sorunlara yol açar (Mikhaylov vd., 2020:2897). Bu emisyonların azaltılması, hem hava kalitesini iyileştirmekte hem de çevre üzerindeki zararlı etkileri en aza indirmektedir. Ayrıca, gaz atıklar insan sağlığı üzerinde de doğrudan bir etkiye sahiptir; özellikle solunum yolu hastalıkları, akciğer kanseri ve kalp problemleri gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Dolayısıyla, gaz atıkların yönetimi, iklim

değişikliğini yavaşlatma, hava kalitesini artırma ve halk sağlığını koruma açısından büyük bir öneme sahiptir.

ATIK AZALTMANIN ÖNEMİ

Atık azaltma, üretilen atık miktarını en aza indirmek için yapılan tüm faaliyetleri kapsar. Bu, üretim süreçlerinde, hammadde kullanımı sırasında ya da tüketici alışkanlıklarında atığın oluşumunu kaynağında önlemeyi hedefler. Entegre atık yönetim sistemlerinde, atık azaltma en üst basamaktadır, çünkü atığı baştan önlemek geri dönüşüm ve bertaraf gibi işlemlerden daha maliyet-etkin ve çevreye duyarlıdır (Kabirifar vd., 2020:121265).

Atık azaltmanın entegre atık yönetimindeki rolü, süreçlerin verimli hale getirilmesi ve çevresel etkilerin minimize edilmesi için kritik bir strateji sunar. Entegre atık yönetimi, atığın önlenmesi, yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve en son aşamada bertarafını içeren bir sistemdir. Atık azaltma, bu sistemin başlangıç noktası olarak, sonraki aşamalara olan ihtiyacı azaltır ve sürdürülebilir üretim ve tüketim döngülerine katkı sağlar.

Ekonomik Faydalar:

- **Maliyet Azalması:** Kaynağında atık azaltma, hammaddelerin daha verimli kullanılmasını sağlar, böylece hammadde ve enerji maliyetleri azalır. Üretim sürecinde oluşan atık miktarını azaltmak, bertaraf maliyetlerini de düşürür.
- **Verimlilik Artışı:** Proseslerin optimize edilmesi ve atıkların minimize edilmesi, üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesine yardımcı olur. Bu, zaman ve enerji tasarrufu sağlar.
- **Yasal Yükümlülüklerden Kaçınma:** Atık azaltma, çevre mevzuatına uyum sağlayarak işletmelerin cezalardan ve düzenlemelere uyumsuzluktan kaynaklanan ek maliyetlerden kaçınmasına yardımcı olur.

Çevresel Faydalar:

- **Doğal Kaynakların Korunması:** Atık azaltma, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını teşvik eder. Hammaddelerin verimli kullanılması, fosil yakıtlar, su ve mineraller gibi kaynakların tükenmesini önler.
- **Kirliliğin Azaltılması:** Atıkların oluşumunu en aza indirmek, hava, su ve toprak kirliliğinin azalmasına yol açar. Özellikle tehlikeli atıkların azaltılması, çevreye olan zararları ciddi şekilde düşürür.
- **Enerji Tasarrufu:** Atık miktarının azalması, enerji kullanımının da azalmasını sağlar. Özellikle geri dönüşüm veya bertaraf süreçlerinde enerji yoğun işlemlerden kaçınılmış olur.

Bu ekonomik ve çevresel faydalar, atıkların kaynağında azaltılmasının hem işletmelere hem de toplumun genel refahına olan katkısını vurgular.

Atık azaltmanın modern endüstrilerdeki önemi nedir?

- **Kaynak Verimliliği:** Modern endüstrilerde, hammaddelerin etkin kullanımı rekabet avantajı sağlar. Atık azaltma, kaynakların daha verimli kullanılmasını teşvik ederek, maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olur. Bu, özellikle doğal kaynakların sınırlı olduğu sektörlerde hayati önemdedir.
- **Çevresel Sorumluluk:** Şirketler, artan çevre bilinci ve çevresel düzenlemelerle uyum sağlamak zorundadır. Atık azaltma, sürdürülebilir üretim süreçleri oluşturarak, endüstrilerin çevreye olan olumsuz etkilerini en aza indirir ve çevre dostu ürün ve hizmetlerin gelişmesini sağlar.
- **Maliyet Azaltma:** Atık bertarafı, lojistik ve enerji kullanımı gibi operasyonel maliyetlerin azalması, atık azaltmanın doğrudan ekonomik faydalarıdır. Azalan atık hacmi, atık yönetimi süreçlerinin daha verimli olmasına da katkı sağlar.
- **Yasal Düzenlemeler ve İtibar Yönetimi:** Hükümetler, endüstrilere atık yönetimi konusunda katı düzenlemeler getirmektedir. Atık azaltma stratejileri, şirketlerin bu düzenlemelere uyum sağlamasına ve cezai yaptırımlardan kaçınmasına olanak tanır. Ayrıca, çevre dostu uygulamalar, şirketlerin sosyal sorumluluk algısını ve itibarını artırır.

Döngüsel ekonomilerde atık azaltmanın rolü nedir?

- **Kapalı Döngü Oluşturma:** Döngüsel ekonomi, lineer üretim ve tüketim modellerini terk ederek, atığın kaynak olarak yeniden kullanıldığı bir sistem oluşturur. Atık azaltma, döngüsel ekonominin temel taşıdır, çünkü ürünlerin ömrünü uzatarak ve atıkları en aza indirerek kapalı döngü oluşturulmasına katkı sağlar.
- **Kaynakların Yeniden Kullanımı:** Döngüsel ekonomilerde, atıklar yeniden kullanılabilir hammaddelere dönüştürülür. Atık azaltma sayesinde, hammadde ihtiyacı azalır ve bu da doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur.
- **Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim:** Döngüsel ekonomi modelinde, üretim süreçleri sürdürülebilir hale getirilir. Atıkların kaynağında azaltılması, ürünlerin yeniden tasarımı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım döngüleri ile üretim süreçleri optimize edilir ve çevresel etkiler minimize edilir.
- **İnovasyon ve İş Fırsatları:** Atık azaltma ve döngüsel ekonomi, yeni iş fırsatları yaratır. Geri dönüşüm teknolojileri, yeniden kullanım

sistemleri ve atık azaltmaya yönelik yenilikçi çözümler, yeni sektörlerin doğmasına yol açar.

Kaynağında azaltma ve geri dönüşüm arasındaki fark nedir?

Kaynağında Azaltma (Source Reduction): Kaynağında azaltma, atıkların oluşumunu daha en baştan, üretim veya tüketim sürecinin başlangıcında önlemeye yönelik bir stratejidir (Paulraj vd., 2021). Bu yaklaşım, ürünlerin tasarımından itibaren daha az hammadde kullanmayı, daha dayanıklı veya yeniden kullanılabilir ürünler geliştirmeyi ve atık oluşturma potansiyelini minimize etmeyi amaçlar.

Özellikleri:

- Ürünlerin tasarım aşamasında atık oluşumunu önleme.
- Daha az hammadde kullanımı.
- Tüketici ve endüstriyel süreçlerde atık oluşumunu kaynağında en aza indirir.
- Atığın oluşmadan önce engellenmesi, çevre üzerindeki etkileri minimuma indirir.

Geri Dönüşüm (Recycling): Geri dönüşüm, atık haline gelmiş ürünlerin yeniden işlenerek hammaddelere dönüştürülmesi ve bu hammaddelerin yeni ürünlerin üretiminde kullanılması sürecidir. Geri dönüşüm, kaynakları yeniden kullanarak doğal kaynakların tüketimini azaltır; ancak kaynağında azaltma ile kıyaslandığında, geri dönüşüm genellikle enerji ve kaynak kullanımı gerektirir.

Özellikleri:

- Kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin yeniden işlenmesi.
- Atıkların hammaddeye dönüştürülmesi.
- Kaynakların geri kazanımı, ancak enerji ve su tüketimi gerektirebilir.
- Atıklar ortaya çıktıktan sonra devreye girer.

Fark: Kaynağında azaltma, atığın hiç oluşmamasını sağlamaya yönelik bir yaklaşımdır; bu nedenle atık yönetiminin en öncelikli aşamasıdır. Geri dönüşüm ise atık oluşuktan sonra devreye giren bir süreçtir. Kaynağında azaltma, genellikle daha çevre dostu ve maliyet etkin bir yöntem olarak kabul edilir, çünkü atığın baştan oluşmasını engeller. Geri dönüşüm, kaynağında azaltmanın mümkün olmadığı durumlarda devreye girer ve atıkları yeniden değerlendirir.

Atık yönetim hiyerarşisi nedir?

Atık yönetim hiyerarşisi, atıkların yönetiminde en iyi çevresel uygulamaları sıralayan bir rehberdir (Zhang vd., 2022:149892). Bu hiyerarşi, atıkları yönetirken çevreye en az zararı vermeyi hedefler ve şu sıralamayla ifade edilir:

1. Önleme (Prevention):

En üst basamakta yer alır ve atığın oluşumunu baştan engelleme hedeflenir. Bu, ürünlerin tasarımında veya üretiminde daha az hammadde kullanarak, daha dayanıklı ürünler geliştirerek ya da süreçleri optimize ederek gerçekleştirilir.

Kaynağında azaltma bu aşamada gerçekleşir ve atık yönetiminde en etkili ve çevre dostu yöntemidir.

2. Yeniden Kullanım (Reuse):

Ürünlerin kullanım ömrünü uzatmak için onları tekrar kullanmak anlamına gelir. Bu, bir ürünün aynı amaçla tekrar kullanılması olabilir veya farklı bir kullanım için modifiye edilmesi.

Örneğin, cam şişelerin temizlenip tekrar doldurulması veya ikinci el ürünlerin kullanılması yeniden kullanıma örnek olarak verilebilir.

3. Geri Dönüşüm (Recycling):

Atık ürünlerin işlenerek yeni ürünlerin hammaddesi haline getirilmesi sürecidir. Geri dönüşüm, kaynakların tekrar kullanılmasına olanak sağlar, ancak enerji ve işlem maliyeti gerektirir. Örneğin, kağıt, plastik, cam gibi malzemelerin geri dönüştürülmesi.

Bu hiyerarşi, atık yönetiminde önceliklerin belirlenmesi açısından kritiktir. İlk hedef, atık oluşumunu önlemek, ardından yeniden kullanım ile atık oluşumunu azaltmak, ve en son olarak geri dönüşümle atıkları yeniden değerlendirmektir.

ATIK AZALTMA YÖNTEMLERİ VE STRATEJİLERİ

Kaynağında Azaltma Teknikleri

1. Hammaddelerin etkin kullanımı

Hammaddelerin etkin kullanımı, ürün ve süreçlerde daha az hammadde kullanarak, aynı miktarda veya daha fazla üretim sağlamak anlamına gelir (Domaracka vd., 2022:6554). Bu yaklaşım, üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak atık miktarını azaltır ve maliyetleri düşürür. Aşağıdaki teknikler bu amaca hizmet eder:

- **Malzeme Optimizasyonu:** Üretimde kullanılan malzemelerin miktarını azaltmak, daha az atık üretir. Örneğin, paketleme süreçlerinde daha az malzeme kullanmak, hem üretim hem de nakliye sırasında kaynak tasarrufu sağlar.
- **Daha Hafif Malzemeler Kullanma:** Ürünlerde daha hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanılması, hem hammadde tüketimini hem de taşıma maliyetlerini azaltır. Örneğin, otomotiv endüstrisinde, çelik yerine daha hafif alaşımlar kullanmak bu tür bir uygulamadır.
- **Standartlaşma ve Modüler Tasarım:** Parçaların ve bileşenlerin standartlaştırılması, aynı hammaddeden farklı ürünler üretmeye olanak tanır. Bu sayede üretimde fazla hammadde kullanılmasının önüne geçilir.

2. Enerji verimliliği sağlayan proses tasarımları

Enerji verimliliği sağlayan proses tasarımları, hem enerji tüketimini azaltmayı hem de atık oluşumunu minimize etmeyi hedefler. Bu teknikler çevreye olan etkilerin yanı sıra maliyetlerin de azaltılmasına katkı sağlar (Simkoff vd., 2020:423). Bazı teknikler şunlardır:

- Atık Isının Geri Kazanımı: Üretim süreçlerinde açığa çıkan atık ısının yeniden kullanılması, enerji verimliliğini artırır. Örneğin, fabrikalarda oluşan atık ısıyı yeniden kullanarak tesisin başka bir bölümünü ısıtmak veya buhar üretiminde kullanmak.
- Verimli Ekipman Kullanımı: Eski ve enerji tüketimi yüksek makineler yerine enerji verimli yeni teknolojilerin kullanılması, enerji sarfiyatını önemli ölçüde azaltır. Bu sayede hem enerji maliyetleri azalır hem de atık enerji üretimi önlenir.
- Proses Otomasyonu: Üretim süreçlerinin otomatikleştirilmesi, enerji kullanımının optimize edilmesine yardımcı olur. Otomatik süreçler, enerji kullanımını düzenli olarak izleyerek ve optimize ederek gereksiz enerji tüketimini engeller.

3. Atık oluşumunun en aza indirgenmesi için kullanılan süreç iyileştirme yöntemleri

Üretim süreçlerinde atık oluşumunu azaltmak, süreç iyileştirme teknikleri ile sağlanabilir. Bu teknikler, hem malzeme hem de enerji kullanımını optimize eder ve atık miktarını minimize eder.

- Lean Manufacturing (Yalın Üretim): Yalın üretim, gereksiz süreç adımlarını ve israfi ortadan kaldırmayı hedefleyen bir yaklaşımdır (Leksic vd., 2020). Fazla üretim, gereksiz taşıma, bekleme süreleri gibi israflar minimize edilir. Yalın üretim sayesinde süreçler hızlandırılır ve atık oluşumu en aza indirilir.
- Six Sigma: Six Sigma, üretim süreçlerindeki hataları ve sapmaları azaltmayı amaçlayan bir süreç iyileştirme metodudur (Hassan, 2013:28). Kalite kontrol ve sürekli iyileştirme üzerine kurulu olan bu yöntem, hataları azaltarak atık miktarını düşürür (Tablo 1).
- Kaizen: Kaizen, sürekli iyileştirme anlamına gelir ve süreçlerde küçük ama sürekli iyileştirmeler yapmayı teşvik eder. Bu, özellikle üretim hatlarındaki hataları önleyerek atıkların kaynağında azaltılmasını sağlar (Goyal vd., 2019:102).
- Malzeme Akışının Optimizasyonu: Üretimde kullanılan hammaddelerin doğru zamanda ve doğru miktarda kullanılmasını sağlamak için malzeme akışı optimize edilmelidir. Malzemelerin doğru planlanması, atık malzeme oluşumunu önler ve süreç verimliliğini artırır.
- Kapalı Döngü Üretim: Kapalı döngü üretim sistemlerinde, üretim sürecinde oluşan atıklar başka süreçlerde hammadde olarak yeniden

kullanılır. Bu, atığın minimuma indirilmesini ve aynı zamanda kaynakların verimli kullanılmasını sağlar (van der Velden vd., 2022:2252).

Bu teknikler, endüstriyel süreçlerde atık miktarını kaynağında en aza indirmek için kullanılan etkili yöntemlerdir. Hem enerji hem de malzeme verimliliği sağlayarak, çevresel etkileri ve üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltır.

Tablo 1: Six Sigma metodolojisi

Aşama	Açıklama	Anahtar Araçlar ve Teknikler	Amaç
Tanımla (Define)	Problemi, müşteri gereksinimlerini, proje kapsamını ve hedeflerini tanımlayın.	SIPOC Diyagramı, Müşteri Sesi (VOC), Proje Tanımı	Proje hedeflerini netleştirmek ve problemi tanımlamak.
Ölç (Measure)	Mevcut süreçleri ölçün, ilgili verileri toplayın ve bir başlangıç noktası oluşturun.	Süreç Haritalama, Veri Toplama Planı, Kontrol Çizelgeleri, Yetenek Analizi	Mevcut süreç performansını (başlangıç durumu) belirlemek için veri toplamak.
Analiz Et (Analyze)	Verileri analiz edin, hataların kök nedenlerini ve iyileştirme alanlarını belirleyin.	Sebeup-Sonuç Diyagramı (Balık Kılçığı), 5 Neden, Pareto Diyagramı, Hipotez Testi	Sorunların kök nedenlerini belirlemek ve iyileştirme için önceliklendirmek.
İyileştir (Improve)	Kök nedenleri ele almak ve süreçleri iyileştirmek için çözümler geliştirin ve uygulayın.	Beyin Fırtınası, FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi), Deney Tasarımı	Hataları ortadan kaldırmak ve sonuçları optimize etmek için süreç iyileştirmeleri uygulamak.
Kontrol Et (Control)	İyileştirilmiş süreci izleyin ve performansın zamanla sürdürüldüğünden emin olun.	Kontrol Çizelgeleri, Süreç Dokümantasyonu, Standart İşletim Prosedürleri (SOP'lar)	İyileştirmelerin sürdürülebilir olmasını sağlamak ve performansı izlemek.

Temiz Üretim ve Yeşil Tasarım

Temiz üretim, ürünlerin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerini minimize etmek için kullanılan bir stratejidir (Tucker, 2017:95). Bu yaklaşım, üretim sırasında ortaya çıkan atık, kirlilik ve enerji tüketimini en aza indirmeyi hedefler. Yeşil tasarım ise ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevreye olan etkilerini azaltacak şekilde tasarlanmasını içerir.

- Çevresel Etkileri Azaltma: Ürünler tasarlanırken hammaddeden üretim aşamalarına, kullanım süresine ve ürünün yaşam döngüsü

sonuna kadar çevre üzerindeki etkiler dikkate alınır. Amaç, ürünlerin yaşam döngüsünde karbon ayak izini ve enerji tüketimini azaltmaktır.

- **Kaynak Verimliliği:** Süreçlerin enerji ve su verimliliği yüksek olacak şekilde tasarlanması ve hammaddelerin optimum şekilde kullanılması, atık miktarını azaltır.
- **Düşük Enerji ve Su Tüketimi:** Üretim süreçlerinde kullanılan enerji ve su miktarının minimum seviyede tutulması hedeflenir. Bunun için enerji verimli makineler, geri dönüşüm teknolojileri ve su tasarrufu sağlayan sistemler kullanılabilir.

Temiz üretim ve yeşil tasarım süreçlerinde kullanılan hammaddelerin çevreye zarar vermeyecek şekilde seçilmesi büyük bir öneme sahiptir. Toksik ve zararlı maddelerin kullanımından kaçınmak, çevre dostu ve sürdürülebilir hammaddelerle ikame edilmesiyle sağlanır.

- **Çevre Dostu Hammaddeler:** Biyobozunur malzemeler, geri dönüştürülebilir plastikler ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen hammaddeler tercih edilir. Örneğin, ahşap gibi doğal malzemelerin kullanımı, plastik gibi petrol türevi hammaddelere göre çevre üzerinde daha az olumsuz etki yaratır.
- **Toksik Maddelerin İkamesi:** Üretim süreçlerinde kullanılan zararlı kimyasalların yerine daha az toksik veya zararsız maddeler kullanılır. Örneğin, solvent bazlı boyaların yerine su bazlı boyalar kullanılabilir.

Bu iki temel yaklaşım, temiz üretimin ve yeşil tasarımın çevre üzerindeki etkileri azaltmasına ve sürdürülebilirliğin sağlanmasına yardımcı olur.

Endüstriyel Uygulamalar

Atık azaltma, birçok endüstride uygulanabilecek stratejilerle mümkündür. Her endüstrinin atık türü ve süreçleri farklı olduğundan, uygulanan yöntemler de çeşitlilik gösterir. İşte farklı endüstrilerde kullanılan atık azaltma yöntemlerinden bazıları:

1. Gıda Endüstrisi

Gıda üretiminde hammadde ve enerji kullanımı yüksektir, bu da atıkların önemli bir sorun olmasına yol açar. Atık azaltma yöntemleri şunlardır:

- **Hammaddelerin Maksimum Kullanımı:** Gıda atıklarını en aza indirmek için meyve ve sebzelerin tamamı (kabuk, çekirdek vb.) değerlendirilebilir. Örneğin, meyve kabukları biyoyakıt veya hayvan yemi olarak kullanılabilir (Adejumo ve Adebisi, 2020:5772).
- **Yan Ürünlerin Değerlendirilmesi:** Süt üretimi sırasında oluşan peynir altı suyu gibi yan ürünler, gıda takviyesi veya protein kaynağı olarak kullanılarak atıklar azaltılabilir.

- Geri Dönüşüm ve Kompostlama: Gıda atıkları kompost olarak kullanılabilir veya biyogaz üretiminde değerlendirilir.

2. Kimya Endüstrisi

Kimya endüstrisinde kullanılan zararlı kimyasallar ve atıkların çevreye zarar verme potansiyeli yüksektir. Bu nedenle atık azaltma büyük önem taşır:

- Yeşil Kimya Uygulamaları: Toksik kimyasalların yerine çevre dostu kimyasallar kullanılır. Ayrıca kimyasal reaksiyonlar sırasında ortaya çıkan atıklar minimize edilir.
- Kapalı Devre Üretim: Üretim süreçlerinde kullanılan su, enerji ve kimyasallar geri kazanılır ve yeniden kullanılır. Böylece, atık ve tüketim azaltılır.
- Atık Su Yönetimi: Kimya endüstrisinde oluşan atık sular arıtılarak tekrar üretim süreçlerinde kullanılabilir.

3. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv endüstrisinde kullanılan malzemelerin büyük kısmı geri dönüştürülebilir (Miller vd., 2014:5883). Atık azaltma stratejileri arasında şunlar yer alır:

- Malzeme Verimliliği: Otomotiv üretiminde kullanılan malzemelerin daha verimli kullanılması, malzeme kaybını azaltır. Ayrıca araçlarda daha hafif malzemeler kullanarak yakıt tüketimi de düşürülür.
- Geri Dönüştürülmüş Malzeme Kullanımı: Geri dönüştürülmüş plastikler, metaller ve camlar araç üretiminde kullanılabilir. Bu sayede doğal kaynak tüketimi azaltılır.
- Modüler Üretim: Araç parçalarının modüler tasarlanması, üretim sırasında atık malzeme miktarını azaltır ve parçaların daha verimli kullanılmasını sağlar.

4. Tekstil Endüstrisi

Tekstil sektörü, su tüketimi ve kimyasal kullanımı açısından yoğun bir endüstridir. Bu nedenle atık azaltma yöntemleri büyük önem taşır:

- Su Tasarrufu ve Geri Kullanımı: Tekstil boyama işlemleri büyük miktarda su kullanır. Atık sular arıtılarak tekrar kullanılır ve su tüketimi minimize edilir.
- Sürdürülebilir Malzeme Kullanımı: Organik pamuk, geri dönüştürülmüş polyester ve doğal boyalar gibi sürdürülebilir hammaddeler kullanılarak atıkların azaltılması sağlanır.
- Atık Kumaşların Değerlendirilmesi: Üretim sürecinde kesilen kumaş parçaları, yeniden işlenip farklı ürünlerde kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir.

5. İnşaat Endüstrisi

İnşaat sektörü, büyük hacimlerde atık üretir. Ancak, atık azaltma stratejileri ile bu atıklar minimuma indirilebilir:

- **Malzeme Geri Dönüşümü:** Yıkım süreçlerinde çıkan beton, çelik, cam gibi malzemeler geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilir. Bu, doğal kaynak tüketimini azaltır.
- **Modüler İnşaat:** Modüler inşaat yöntemleri, yapıların önceden fabrikalarda üretilip sahada birleştirilmesi sayesinde inşaat atıklarını azaltır ve enerji verimliliğini artırır.
- **Enerji Verimli Tasarım:** İnşaat sırasında enerji verimliliği sağlayan malzemeler ve teknikler kullanılarak, hem enerji tüketimi hem de atık miktarı minimize edilebilir.

6. Elektronik Endüstrisi

Elektronik atıklar (e-atıklar), ciddi çevresel problemlere neden olabilir (Liu vd., 2023:100028). Bu sektörde uygulanan atık azaltma stratejileri şunlardır:

- **E-atıkların Geri Dönüşümü:** Kullanım ömrünü tamamlayan elektronik cihazlar parçalarına ayrılarak geri dönüştürülür ve değerli metaller tekrar kullanıma kazandırılır.
- **Dayanıklı Ürün Tasarımı:** Daha uzun ömürlü, tamir edilebilir ve yükseltilebilir elektronik cihazların tasarlanması, atık oluşumunu kaynağında azaltır.
- **İnovatif Paketleme:** Elektronik cihazların daha az ambalaj malzemesiyle ve çevre dostu materyallerle paketlenmesi, ambalaj atıklarını azaltır.

7. Kağıt ve Ambalaj Endüstrisi

Kağıt ve ambalaj endüstrisinde büyük miktarda atık ortaya çıkar. Ancak çeşitli atık azaltma yöntemleri kullanılabilir:

- **Geri Dönüştürülmüş Kağıt Kullanımı:** Geri dönüştürülmüş kağıt ürünlerinin üretimi, hem enerji tüketimini azaltır hem de atık kağıtların yeniden kullanıma kazandırılmasını sağlar.
- **Ambalaj İnovasyonları:** Plastik yerine biyolojik olarak parçalanabilir ambalajlar kullanılması, atık miktarını azaltır ve çevresel etkileri minimuma indirir.
- **Yeniden Kullanılabilir Ambalajlar:** Özellikle perakende sektöründe, yeniden kullanılabilir ambalajların teşvik edilmesi atık oluşumunu büyük ölçüde azaltır.

Bu endüstrilerde uygulanan yöntemler, kaynak kullanımını optimize ederek, atık oluşumunu kaynağında azaltmaya ve çevresel etkileri minimuma indirmeye yardımcı olur.

SONUÇ

Atık yönetimi, günümüz dünyasında çevresel sürdürülebilirliği sağlamak, doğal kaynakların tükenmesini önlemek ve insan sağlığını korumak açısından temel bir öneme sahiptir. Endüstriyel faaliyetler, gıda üretiminden kimyasal işleme ve enerji üretimine kadar pek çok sektörde büyük miktarda katı, sıvı ve gaz atıkların oluşmasına neden olur. Bu atıkların doğru bir şekilde yönetilmesi, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve doğal kaynakların daha verimli kullanılması için hayati önemdedir. Atık karakterizasyonu, atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini tespit ederek bu atıkların geri dönüşümü, yeniden kullanımı ve uygun bertaraf yöntemlerinin seçilmesinde kritik rol oynar.

Atık azaltma stratejileri, endüstriyel üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve çevre üzerindeki etkilerin azaltılmasına katkı sağlar. Kaynağında azaltma, temiz üretim ve yeşil tasarım gibi yaklaşımlar, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunarak üretim maliyetlerini düşürürken çevresel kirliliği önlemektedir. Özellikle kapalı döngü üretim sistemleri ve döngüsel ekonomi modelleri, atıkların tekrar hammadde olarak kullanılmasıyla doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, entegre atık yönetim stratejileri, çevresel sürdürülebilirliği sağlamanın yanı sıra ekonomik verimliliği artıran önemli bir unsurdur. Gelecekteki endüstriyel faaliyetlerin, bu yaklaşımları benimseyerek doğal kaynakları koruma ve çevresel zararları minimize etme konusunda daha sorumlu bir duruş sergilemeleri gerekmektedir. Atık yönetimi, yalnızca çevre için değil, insan sağlığı ve ekonomik kalkınma için de vazgeçilmez bir süreçtir.

REFERANSLAR

- Yang, H., Ma, M., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2018). Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. *J Epidemiol Community Health*, 72(3), 237-243.
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste management*, 33(4), 988-1003.
- Song, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production*, 104, 199-210.
- Gedik, Y. (2020). Döngüsel ekonomiyi anlamak: Teorik bir çerçeve. *Turkish Business Journal*, 1(2), 110-137.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189-200.

- Kumar, A., Thakur, A. K., Gaurav, G. K., Klemeš, J. J., Sandhwar, V. K., Pant, K. K., & Kumar, R. (2023). A critical review on sustainable hazardous waste management strategies: a step towards a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(48), 105030-105055.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (2010). *Hazardous waste management*. Waveland Press.
- Yavaşcaoglu, A. (2012). Tekstil kati atıkları, kati atık oluşumunun azaltılması ve geri kazanımı. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 1(2), 137-148.
- Adejumo, I. O., & Adebiyi, O. A. (2020). Agricultural solid wastes: causes, effects, and effective management. *Strategies of sustainable solid waste management*, 8(10), 5772.
- Soliman, N. K., & Moustafa, A. F. (2020). Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10235-10253.
- Adani, F., Tambone, F., & Gotti, A. (2004). Biostabilization of municipal solid waste. *Waste management*, 24(8), 775-783.
- Patel, A., Arkatkar, A., Singh, S., Rabbani, A., Medina, J. D. S., Ong, E. S., ... & Mungray, A. K. (2021). Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources. *Chemosphere*, 282, 130881.
- Kennes, C., & Veiga, M. C. (Eds.). (2013). *Bioreactors for waste gas treatment* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897.
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of cleaner production*, 263, 121265.
- Paulraj, M. S., Nuzhat, S., & Hussain, C. M. (2021). *Source reduction and waste minimization*. Elsevier.
- Liu, K., Tan, Q., Yu, J., & Wang, M. (2023). A global perspective on e-waste recycling. *Circular Economy*, 2(1), 100028.
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of the Total Environment*, 803, 149892.
- Domaracka, L., Matuskova, S., Tausova, M., Senova, A., & Kowal, B. (2022). Efficient use of critical raw materials for optimal resource management in EU countries. *Sustainability*, 14(11), 6554.
- Simkoff, J. M., Lejarza, F., Kelley, M. T., Tsay, C., & Baldea, M. (2020). Process control and energy efficiency. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 11(1), 423-445.
- Leksic, I., Stefanic, N., & Veza, I. (2020). The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction. *Advances in production engineering & management*, 15(1).

- Hassan, M. K. (2013). Applying lean six sigma for waste reduction in a manufacturing environment. *American Journal of Industrial Engineering*, 1(2), 28-35.
- Goyal, A., Agrawal, R., Chokhani, R. K., & Saha, C. (2019). Waste reduction through Kaizen approach: A case study of a company in India. *Waste Management & Research*, 37(1), 102-107.
- van der Velden, R., da Fonseca-Zang, W., Zang, J., Clyde-Smith, D., Leandro, W. M., Parikh, P., ... & Campos, L. C. (2022). Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil. *Environmental Technology*, 43(15), 2252-2269.
- Tucker, N. (2017). Clean production. In *Green Composites* (pp. 95-121). Woodhead Publishing.
- Miller, L., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Tseng, S., & Tam, E. (2014). Challenges and alternatives to plastics recycling in the automotive sector. *Materials*, 7(8), 5883-5902.

Mühendislikte Ar-Ge

Hasan Ali ÇELİK¹

1- Doç. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. hasancelik@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5083-6100

ÖZET

Mühendislikte araştırma ve geliştirme (AR-GE), yeni bilgi ve teknolojilerin keşfi ve uygulanması sürecidir. AR-GE, mühendislerin hayatı kolaylaştıran yenilikler üretmesini sağlar. Özellikle sanayide kullanılan makinelerin, sistemlerin ve süreçlerin iyileştirilmesine odaklanır. AR-GE faaliyetleri, bireylerin ve firmaların rekabet gücünü artıran yeni ürünler, hizmetler ve yöntemler geliştirmelerini mümkün kılar. Ayrıca, AR-GE merkezleri, yenilikçi projelerin yürütüldüğü ve teknolojik gelişmelerin desteklendiği yerlerdir. Mühendislikte AR-GE, hayal gücünün gerçeğe dönüştüğü, sistematik ve yaratıcı çalışmalarla yenilikçi çözümler üretilen bir alandır. Özellikle yerli ve milli AR-GE projeleri, bir ülkenin bağımsızlığını ve teknolojik gücünü artırmada kritik rol oynar.

Anahtar Kelimeler – AR-GE, Mühendislik, AR-GE Yoğunluğu, GSMH, TZE

GİRİŞ

AR-GE ifadesi çok yaygın kullanılmakla beraber, esas olan yeni bir şey yapma, buluş yapma, icat yapmak var olan bir şeyin ilerisini ve iyisini yapmak gibi bir anlayışı beslediği, desteklediği açıktır.

İhtiyaç duyulan birçok alet, araç gereç makine ve teçhizatı,azardan alma, ithal etme anlayışı ve alışkanlığı oldukça yaygın bir durumken, artık günümüzde bu anlayış ve algı değişmektedir. “İthal etmek daha ucuz, yapmaya değmez” anlayışı ile vazgeçtiğimiz bazı projeler, bu gün, keşke dediğimiz, eyvah! Dediğimiz bir sonuca bizi götürmüştür.

Günümüzde ilkokuldan başlayan ve her kademedede devam eden ve üniversitede daha da somutlaşan bir AR-GE, İnovasyon ekosistemi vardır. Fikrin hayata geçirilmesi için atılan adımlar, bireysel olduğu gibi, birçok kurumsal yapıyı da doğurmuştur. Bu kurumsal yapılar ülkemizin ve insanlığın geleceği için önemli faaliyetlerin yürütüldüğü projelerin hayata geçirildiği, mühendislerimizin araştırmacılarımızın bilgi, emek ve hedeflerinin yoğurulduğu yerlerdir. Bunlardan bazıları fikir, bazıları bilgi, bazıları proje, prototip, bazıları kredi-destek, bazıları test-belgelendirme, bazıları da ticarileşme ve markalaşma amaçlı faaliyetleri içermektedir.

Bilinmelidir ki bütün gelişmelerin kaynağı, sorunlar, çözümler, talepler, merak, hayal ve hedeflerin bileşenleridir. İnanmak ve olmayacak bir şeyi bile olacak gibi düşünmek ve emek vermek, sonuç almanın en etkili yoludur. “Taşı sıkırsa suyu çıkar” veya “Tekeden süt sağlamak, çıkarmak” bu konuda öğüt verici, cesaret verici, azmi kuvvetlendirici etkili

deyimlerdendir. Mühendis, AR-GE elemanı, araştırmacı; doğru fikir, doğru proje, doğru hedef kuvvetli bir azim ve cesaret ve gayretle muvaffak olması mümkündür.

AR-GE personeli olacak kişi, evreni, yeryüzünü incelediğinde kendisine muazzam bir gözlem ve örnek oluşturur. Tabiat, düşünen, fikir edinmek isteyen kişiye çok cömert sunumlar yapar. Kuşlar ve uçan bütün canlıların, uçak, helikopter, füze vb. buluşlara örnek olmaları gibi. Karınca muazzam bir iş makinesi örneğidir ki kendi ağırlığının 20 katından fazlasını taşıyan bir grup çalışmasına örneğidir.

Henüz yapılmamış birçok makine, araç gereç örneği tabiatla bize örneklik etmektedir. Rengârenk bitkiler, çiçekler, böcekler, taşlar, topraklar, sular, gazlar... Bizlerin keşif ve buluşlarıyla insanlığa neleri sunmadılar ki...

Bütün elementler, madenler, malzeme bilimi için ne büyük hazine. Toprak, taş içinde kurşun demir, bakır, çinko, kalsit, kuvars, antimon, altın, zirkonya, bor vb. insanın bilimde keşfettiği değerli hazinelerdir. Bu nedenle, araştırma ve geliştirme sonsuz bir okyanus yahut, henüz gizemi aydınlatılmamış bir uzay alemi, evren sonsuzludur. İnsan daha yeni başladı, yolun başında dersek yanlış söylemiş olmayız. Bugün kullandığımız teknolojik aletleri fax, radyo, tv, telefon vb. yakın zamana ait buluş ve teknolojilerdir. Yüz yıl öncesinde bunlar konuşulamayan, hayal edilemeyen kavramlardı.

İşte, bilim, AR-GE, mühendislik faaliyeti, hayatımıza bunları kattı. Görünüyor ki daha yapacak çok iş var. Hayallerinize ulaşmayı isteyen, hedefine kavuşmayı isteyen, düşünce dünyasında yüzmeli, farkı görmeli, fark oluşturmali, mümkündür diyebilmelidir.

AR-GE esnasında hayalin hedefe, hedefin gerçeğe döndüğü bir yolculuğun bir faaliyetin adıdır. Bir rüyanın gerçek oluşunun serüvenidir. Merakın, ilhamla buluştuğu bir keşfin mutlu sonudur. Yapılan her faaliyetten keyif alınan meşguliyettir. Zaman sınırı olmayan, hayal sınırı olmayan, acabası olmayan sonucunda hazzı başka bir şeyle kıyaslanmayan bir mutluluktur AR-GE.

Şimdi, bundan sonra senin zamanın. Boş bakma, boşa bakma, ar-ge sensin, mühendis sensin, sen geleceksin...

Bütün dünyada hayatı kolaylaştıran, farklı, yeni, birçok ürün üretimi çalışması sürmektedir. Her gelişmiş ülke mutlak bir sanayi üretimine sahip olmakla birlikte, bunun önemli bir bölümünün orta ve yüksek teknoloji olmasını hedefler ve gerçekleştirmeye çalışır. Gerçekleştirdiği ölçüde de o

fırmanın, o ülkenin büyümesi, gelişmesi mümkün hale gelir. Öyle ki gerek orta gerek yüksek teknoloji ürünleri yüksek hatta çok yüksek katma değerli ürünlere dönüşürler.

Bu ürünlerin imalatında kullanılan, maddi değerden çok daha fazlası, hatta tamamına yakını, bilim, bilgi ve teknolojiye dönüşmüş fikri derinlikten ibarettir. Bütün istatistikler, veriler, kalkınmanın temel kaldıracı olarak bilim ve teknolojiyi görürler. Emek yoğun değil, bilgi yoğun gelecek projeksiyonu ihtiva eden projeler ile sonuç alınacağına inanırlar. Kullandığımız teknolojik aletler ve araç gereçlere baktığımızda bunu net olarak görmemiz mümkündür.

Büyük teknoloji şirketlerinin neredeyse tamamı ürünlerinin belli bir pazarlama zamanından sonra bir kısım özellik veya yerlerinde değişiklik yapmak, inovasyon-yenilik getirmek suretiyle bir adım sonrası üretilip tüketiciye sunulur.

Bu sunulan üründe genellikle bir öncekinden daha yüksek fiyata sahip olur. Bu katma değeri artıran bir faaliyet biçimidir. O sebeple sürekli yenilik, sürekli değişim, sürekli gelişim ve arayış hayatımızın normal bir davranış biçimi olmuştur. Her üründen sonra teknoloji firmaları, belki 2 veya 3 adım sonrayı planlayan, projelendiren bir çalışma içerisinde dirler.

Ülkemizde Bilgi Teknolojileri Kurumu (BTK), yaptığı araştırmalarda, satılan cep telefonlarının %88'i akıllı (pahalı) cep telefonu olduğunu açıklamıştır. Ayrıca, telefon değiştirme, yenileme süresine bakıldığında ise, dünyada en hızlı, kısa sürede (1 yıldan az) telefon değiştiren bir toplum olduğumuz görülmektedir. Teknoloji üretmekte çok hızlı değilsek de, teknolojik ürün tüketmekte çok hızlı olduğumuzu görmekteyiz. Daha ihtiyaç odaklı, gerekli-yeterli dengeyi korumamız ve tasarruf odaklı, mutlu toplum hissiyatını yaygınlaştırmamız gerekmektedir.

MÜHENDİSLİKTE AR-GE

Mühendis

İhtiyaçları karşılamak üzere, fen-teknik bilimlerden yararlanmak suretiyle sorun çözen, ihtiyaç duyulan ürün ve sistemleri üreten, kuran işletendir.

Yol, köprü, bina, peyzaj, çevre, şehircilik planlama, yer altı, yer üstü, uzay ve havacılık, tarım, orman, beslenme, gıda, fizik, kimya, biyoloji matematik, otomotiv, iş makineleri, bilgisayar, veri toplama ve hazırlama, veri işleme ve güvenliği, siber güvenlik vb. yeni güncel ihtiyaç duyulan her alanda, ilgili ve gerekli bilgileri almış, eğitim görmüş; düşünen, odaklanan,

planlayan, eğitim görmüş, düşünen, odaklanan, planlayan üretim aşamasına kadar ve hatta üretim aşaması da dâhil faaliyetleri yürüten, bu konuda eğitim öğretim görmüş kişidir.

Mühendis, sorun görme, sorun çözme, iyileştirme, ihtiyaç gidermede fikri faaliyeti olan, plan program, proje insanıdır. Mühendis, hayatı kolaylaştırandır. Mühendis, medeniyet kuran, inşa eden, değişime-gelişime yol açandır. Hedefi olan, hedefe odaklı, düşünen insandır. Dünyayı geliştirmek, ihtiyaçları belirlemek ve bu ihtiyaçları gidermek mühendisin davranış biçimidir. Mezun olmak, diploma almak için çabalayan değil, öğrenmek, geleceği inşa etmek, dünyadaki gelişmeleri takip edip, bir ileri adıma geçendir. Sürekli kendini geliştiren kendine, ailesine, ülkesine, insanlığa fayda katmaktır mühendisin amacı.

İyi bir mühendis çözüm odaklı, hedefi ve amacı olan, sorumluluk sahibi, farklı pencerelerden bakabilen, farklı düşünen, en olumsuz bile mümkün kılabilen, kendisini geliştirmeye çalışan, eleştiriye ve farklı görüşlere açık, hayal kuran, merak eden, yeni bilgilere ulaşmayı seven, kendisine, ailesine, ülkesine ve dünyaya fayda vermek üzere konsantre, yabancı dil bilen, yabancı yayınları da takip eden, gerekli dersleri eğitim ve öğretimi başarmış diploma sahibi yetkin kişidir.

Mühendislik

Makine-motor, yol, köprü, yapı, gemi, uçak, enerji, elektrik, elektronik, bilgisayar, ziraat, orman, gıda, tarım, endüstrinin veya hayatın herhangi bir alanında eğitim öğretim almış ve gerekli başarıyı sağlamış kişilerin faaliyette bulundukları alan, mühendislik alanıdır. Şöyle de söylenebilir: Tasarımdan uygulamaya kadar uzanan, sistem kuran, işleten bilimsel ve teknolojik bir faaliyettir.

Mühendislik bir düzen içinde inceleme, fark etme, keşfetme, planlama, projelendirme, uygulama ve sürdürme faaliyetidir. Bir hesaba dayanan düşünce sistematığıdır. Mühendislerin tüm adımlarının bir mantığı, anlaşılabilir bir formülü ve fayda doğuran sonucu vardır. Faaliyetleri temel bilim esaslıdır ve somut çıktıları vardır.

Günümüzde, gelişen bilim ve teknolojik şartlara bağlı olarak çok çeşitli mühendislik alanları olmuş ve olmaktadır. Geçmişte var olan mühendislik alanları belki iç içe olanlar, zamanla ayrışıp ayrı mühendislik alanlarına dönüşmüştür. Endüstri, makine, motor, mekatronik, elektrik, bilgisayar vb. ile maden, jeoloji, jeofizik vd. Zaman geçtikçe, ihtiyaç duyulması halinde bazı alanlar değişecek, bazen de olmayan alanlar, bölümler ortaya çıkacak, belki de bazılarına ihtiyaç duyulmamaya başlanacaktır.

BİLİM

Evrenin, evrendeki olayların ve olguların bir bölümünü ele alıp, birtakım yöntem ve deney yollarını kullanarak gerçeğe ve gerçekliğe dayanarak bazı yasalara, kurallara dayanan bilgi yolu. Her zaman düzenli ve tutarlı bilgi. Yöntemle elde edilen ve uygulamayla doğrulanan, her zaman ve her yerde geçerli olan bilgidir. Sistematik, tutarlı bilgi olgu ve olayların kesin ve her yerde ve her şartta aynılığıdır.

İnsan bilimle geleceğe ilerler. Geçmişin sırlarını çözer. Derin bir gözlem, inceleme, ispatlama faaliyetidir. Temeli düşünmektir. Soru sormak ve cevap aramaktır. Ne, neden, nasıl, niçin, ne zaman, kim tarafından veya ne tarafından gibi soruların cevaplarını arayan bilim, hayatın, evrenin yaşamın sırlarını çözmeye davranışdır.

Bilim, insanla başlamış, merakla beslenmiş ve sonu olmayan, sürekli yenilenen, gelişen bir anlayış ve arayıştır. Duyu organlarımızın yetmediği alanlarda da, ihtimalleri ortaya koyar. Evrenin sonsuzluğunda evrendekileri ve hatta var oluşu ve “Sonu” yok oluşu değerlendiren bir durumdur. İnsan kendince bir düşünce sistematiği, bir formül, denklem ifadesiyle arar, arar, arar... Aslında bilim sormak, sormak, sormakla başlar. Sonraki aşama ise bu soruların cevaplarını aramakla devam eder. Elde edilen olgu ve bulguların düzenli bir şekilde ortaya koyan, uzun uzadıya, bazen okyanus derinliğinde, bazen kendi içinde hem sorular sorar hem de kendisini arar.

TEKNOLOJİ

Bir sanayi alanında, gücü ve bilgiyi biriktirme, denetleme, işleme, iletme gibi amaçlarla oluşturulan makinelerin, araç gereçlerin, aygıtların, yöntemlerinin toplamıdır.

İnsanoğlunun ihtiyaçlarına uygun alet ve araçların yapılması, ya da geliştirilmesi için gerekli bilgi ve yetenektir. Ayrıca bir üretim dalıyla ilgili metot ve sistem ile araç gereçlerdir.

Esasında teknik bilgiler paketidir. Üretimde kullanılan yön ve yöntemlerdir. Hayatı kolaylaştıran uygulamalardır. Bilim temelli, yenilik, icat, araç gereç makine, cihaz üretmedir.

İnsan, etrafını keşfetmek dâhil olmak üzere, yaşamı için tüm kolaylaştırıcı, ihtiyaç giderici ne varsa düşünerek, tartışarak, araştırıp inceleyerek çözüm yolunda ilerlemek ister. Olmayanı yapmak, içinde olanı geliştirmek için bilim temelli düşünce şarttır. Dünya artık uzak ayrı yerler değil, bir bütün ve hatta beraber yaşanan bir alan olmuştur. İhtiyaçlar

sürekli artmakta ve gelişmektedir. Neredeyse insan sadece yaşamak için var. Çalışmak ve üretmek için değil de. Gelecek projeksiyonunda zaten sanayinin dijitalleşmesi, makinelerin birbirine yapay zekâ ile irtibatlandığı, insan emeğinin en aza indirildiği bir sistem tesisini hayata geçirmektedir teknoloji. Evrenimizi gökdelenleri, 200 katlı yapıları sestten hızlı uçan uçakları, taşıma kapasiteleri milyon tonları bulan gemileri, uzaya giden, farklı gezegenlere ulaşıp keşif yapabilecek araçları vb. bulan, üreten, özetle hayatımızı saran bir faaliyettir. Teknolojinin ustaları olarak insanlar, âlemin inşasında, durmaksızın faaliyetlerini sürdürmektedir. Teknolojinin kısa anlatımı, mümkün olmayanı mümkün kılan bir durumdur.

Teknoloji, hayal etmek, merak etmek, hedeflemekle çözme, başarma arzusuna bağlı bir ortaya koyma faaliyetidir. Yeter diyen, tamam diyen kişiler gelişemez ve teknolojik bir üretim gerçekleştiremezler.

Rekabetçi bir dünyadayız. Kim en iyisini, daha iyisini, daha uygun şartlarla, fiyatlarla, etkin ve sürdürülebilir bir biçimde yaparsa başarılı olur. Hayal gücü olmayan, fikri enginliği olmayan teknolojik ilerleyişe sahip olamaz.

Hepsinden önemlisi düşünmek, fikretmektir. Bir durum, olay, olgu ve gözlemi incelemek ve açıklamaya çalışmak doğru yol almak için doğru adımdır. Bulunduğumuz ortamlarda bir konuya sessizce odaklanmak, bir müddet odaklandığımız konuyu düşünmek, buluş için çok faydalı olabilir.

Az konuşup, çok düşünmek, düşündüklerimizi hayata dair çözüm konusu yapmak değerlidir.

Tabiatta bulunan tüm canlılar, varlıklar esasında çok değerli gözlem konularıdır. Yaratan olabilirlikleri işaret etmiş, yararlanabileceğimizi göstermiştir. Her şeyin araştırılması, geliştirilmesi önemlidir ve de gereklidir.

AR-GE bilinmeze yolculuk. 1'e 2, 1'e 10, 1'e 100, 1'e 1.000 hatta 10.000, 100.000... kazanmaktır. Sonuç olarak insanlığa değer katmak, faydalı olmaktır. Birçok kimsenin aradığı fakat bulamadığı bir ihtiyacı sorun çözme, siz bulmuşsanız elbette ihtiyaç oranıyla orantılı olarak kazanç, başarı elde edilmiş olacaktır. Bir salgın hastalığa karşı elde edilebilecek bir aşı veya hastalığın tedavisi için bulunan bir ilaç olağan üstü değer taşır. Yüzbinlerce insanın hayatını kaybettiği ve milyonlarca insanın hastalandığı bir derde çare olan ilacı bulan, çok değerli bir AR-GE faaliyetinin mimarıdır. Her şey onun hakkıdır denilmelidir. Günümüzde elimizdeki akıllı telefonlar hayatımızın kolay yaşanabilmesi, bilgi ve iletişim ağı olduğu kadar, bireysel özgürlük alanıdır aynı zamanda. Burada önemli olan "milli-yerli" olmayı

sağlamak, hayatımızda bütün verilerin başkaları tarafından takip edilip adeta yönetilmenize sebep olacak durumlardan korunmaktır. Bu da ancak kendi vatanseverliğinizle sağlanır. Ülkemizin bizlere sağladığı tüm imkânlar, kurumlar, öğretmenler, akademisyenler, atölye, laboratuvar ve test merkezleri bizim de ülkemize borçlu olduğumuzun göstergesidir.

Dünyanın hiçbir ülkesindeki insanlardan geri kalmamızı gerektiren bir durumumuz yok. Belki birçok avantajlara da sahibiz. Ancak hedef koymak, düşünmek, odaklanmak, hayallerimizi beslemek ve geliştirmek için zaman mefhumu olmaksızın çalışmamıza bağlıdır. İnsan aklını, zekâsını en etkili bir şekilde kullanmasıyla yapamayacağı hiçbir şey olmadığını görecektir. Düşünmek ve konuya odaklanmak en büyük buluş, çözüm, ar-ge yolculuğudur. 5N 1K'yı unutmamalıyız. Çünkü çözümün anahtarı sormaktan geçer.

OECD mevzuatında AR-GE

“Bilgi dağılımını artırmak amacıyla sistematik olarak sürdürülen, yaratıcı çalışma ve bu bilginin yeni uygulamalar yaratmak için kullanılması” olarak tanımlanmıştır.

Teknoloji geliştirme bölgeleri kanununa göre AR-GE

“Kültür, insan ve toplumun bilgisinden oluşan, bilgi dağılımının artırılması ve bunun yazılım dâhil, yeni süreç, sistem ve uygulamalar tasarlamak üzere kullanılması için sistematik bir temelde yürütülen yaratıcı çalışmalardır.”

Yeni bilgiler edinmek veya mevcut bilgilerle yeni ve ihtiyaç gideren, fayda doğuran her türlü malzeme, araç gereç ve ürün üretmektir. Yazılım da dâhil olmak üzere daha yeni, daha iyi, daha ekonomik daha faydalı ve daha etkin, yaygın kullanılan sistem, süreç ve faaliyetler meydana getirmek için yapılan, planlı, programlı, amacı ve hedefi belli olan çalışmaların hepsi ar-ge faaliyetidir.

AR-GE faaliyeti teknoloji eksenli veya temelli yürütülen sistematik çalışmalardır. AR-GE çalışmaları belirlenen hedefe ve bir plan dâhilinde sistematik olarak ilerlemektir. Netice olumlu olması arzu edilmesi hedeflenmesine rağmen, olumsuz bir netice de AR-GE'nin çıktıları arasındadır. Gidilmesi gereken hedefe bu metotla, şartla, zamanla ve imkânlarla gidilmesinin mümkün olmadığını görmek ve bunu bir makale ile diğer araştırmacıların bilgisine sunmak bir AR-GE ürünü, sonucu olarak ifade edilebilir. AR-GE faaliyeti girdi odaklı olarak değil, çıktı odaklı değerlendirme ile yükselir ve verimli olur. Mümkün olan en yüksek fayda, en az girdi ile sağlanabiliyorsa verimli bir ar-ge faaliyeti olarak tanımlanır ve “BAŞARILI” kabul edilir. AR-GE çalışmalarında belirlenen zaman için geçirilen her an çok iyi değerlendirilmelidir. AR-GE, eğlenceli, amaçlı,

hedefli, faydalı ve zevkli bir mühendislik sürecidir. Sonuç ise müthiş bir mutluluk kaynağıdır.

AR-GE ADIMLARI

Kapsamlı ve başarılı bir AR-GE tek adımla sonuç alıcı bir faaliyet değildir. Her bir adım, yeni bir adımı doğuran tükenmez ve mükemmele giden bir evredir. Fikirden yola çıkan çalışma, fikri tartışma değerlendirme ve incelemelerden sonra en iyi, en doğru fikri kabul etmek suretiyle plan-program çalışması ve prototipe ve ilk uygulama ile devam eder. Eğer fikir bir laboratuvar çalışmasını gerektiriyorsa, önce işe buradan başlamak gerekir. Daha sonra gereken adımlar bir bir atılır.

Temel Araştırma

Bu temel araştırmada projenin- hedefin temelleri atılır. Üniversite, kurum ve kuruluşların laboratuvarları, firmaların ve araştırmacıların ilk adımı olan temel araştırmak; “görünürde özel herhangi bir uygulanması ve kullanımı bulunmayan ve öncelikle olgu ve gözlemlenebilir olayların temellerine ait yeni bilgiler elde etmek için yürütülen teorik ve deneysel çalışmalardır.”

Uygulamalı Araştırma

Bir bilim dalında elde edilen temel bilgilerin belirli özel durumlara uygulanmasıyla bilgi edinme, bilgiyi geliştirme araştırmaları, diğer bir ifadeyle “bir görüşün veya kuramın uygulamada geçerliliği test edilen araştırma”dır.

Temel araştırması yapılan bir nitelikli çeliğin, kullanım yerinde (zırh gibi) bıçak keskinliği, dayanıklılık süresi vb. o uygulama faaliyetinde sonuçları görme, elde etmektir. Uygulama ile sonuçları test etme gerçek şartlarını temel araştırmadan sonra bilebilme ve hangi şartlarda, hangi durumları, hangi şekilde sağladığında, en ufak değişiklik dahi yeni ve farklı bir sonuç doğurabilir. Böylece her bir adım başarılı bir AR-GE olabilir.

Deneysel Gelişim

Uygulamalı araştırma sonucunda elde edilen bulguları, daha ileri noktaya taşımak için deneysel gelişim amaçlı faaliyete uğrayabilirler.

Deneysel gelişim de, mükemmele yolculuk sürecidir. Yeni, daha yeni, en iyi arayış bu adımı besler. Deneysel gelişim, uygulamaya, gerçeğe yakın veya gerçek şartlarını Ar-Ge adımı olarak yerine getirmektir. Çeliğin çekme mukavemetini, değişik katkı maddeleri ve oranlarıyla ve etki şekli-şiddeti-zamanı vb. faktörlerle değişimini görmek, kırılmaz bir camın aynı şartlarda

hangi kalınlıkta, hangi sıcaklıkta, basınçta, şartta sağlandığını muhtelif deneysel faaliyetlerle görmek, incelemek kolay anlaşılabilir örneklerdendir.

Aynı deneysel şartlar, aynı sonuçları verdiği müddetçe sonuç elde edilmiştir. Fakat her değişken ayrı bir deneyde ayrı bir değer vermekteyse burada “deneysel gelişme” nin değerli bir çıktısı olarak kullanılabilir.

“Deneysel Gelişme” AR-GE’nin kullanılmasıyla buluşacağı son adımdır. Bu adımın test edileceği son nokta bazen insan kullanımı, toplumsal talep ve yaygınlık olabilir. Mükemmel bir yazılım bir işletim sistemi, eğer talep yetersizliğine uğrarsa başarı engellenebilir. Bu nedenle birey ve toplum olarak “yerli ve milli” AR-GE faaliyetlerini ve bunların çıktıları güçlü bir şekilde desteklenmelidir. İlk deneysel faaliyetler arzu edilen, hedeflenen sonucu sağlamayabilir. Bu durumda, yılgınlığa kapılmadan, olumsuz söz ve davranışları büyütmeden bir sonraki deneysel gelişim adımında daha iyisini, daha gelişmişini yapma, umut, inanç ve gayretiyle davranma, bireysel, gelişme ve ülke geleceği açısından büyük önem taşımaktadır. Bugün kullanılan araç gereç, alet, cihaz, makine vb. ilk denemede bu hale geldiğini söyleyebilmek mümkün müdür? Olumsuzluklar, üzerine gidilecek okuyacağımız ilk satır olmalıdır. Ümit var olmalıyız.

AR-GE’NİN AMACI

Değişen, gelişen ve sürekli artan ihtiyaçlar dolayısıyla, bunları daha hızlı ve etkin bir şekilde karşılamaya yönelik çözüm arayışıdır. AR-GE tanımında da ifade edildiği üzere sistematik, düzenli, etkili sorun çözme metodolojisi veya çalışmasıdır. Şahıslar veya firmalar zorlu rekabet şartlarında ayakta kalmak, büyümek ve gelişmek isterler. Buna mecbur olurlar. Bu nedenle ihtiyaçların, en uygunu iyi, ekonomik ve kaliteli olarak güvenle giderilmesi gerekir.

Hayallerinin peşinden koşan insanın, yeni şeyler keşfetmek, sorunlara çözüm bulmak çabası, bitmez tükenmez bir arzudur. Eğer bu istek olmasaydı ilk insandan günümüzde gelişme, belki çok az belki de hiç olmazdı. İşte bu istek, başarıma arzusu yaşadığımız teknolojik ortamı meydana getirdi. Düşme varken, fermuara ne gerek vardı?

Tamam demeyen, yeter demeyen, alternatifi de olabilir diyen insan, insanlığa değer katan insandır. Faydalı oldukça bu dünyada varlığımız hissedilir. AR-GE personeli, düşünen insan, çözüm insanı budur.

Yaşamda, ihtiyaç hissedilen her şeyin peşine düşmek, yoksa yapmak, varsa daha rekabetlisini, ekonomik, etkili, güçlü ve gelişmişini yapmak arzusu ar-ge’nin amaçlarındandır.

Dünyadaki tüm ülkeler adı konmamış, bir yarışın içindedirler. Bu yarış esasında hükmetme, kendisine bağımlı kılma yarışıdır. AR-GE bu yarışın tezahürüdür. Ben de varım, biz de varız diyebilmenin şartıdır. Dünyadaki gelişmelerden şahsımızı, ülkemizi, firmalarımızı öne çıkarmak, imzamızı, ülkemiz adına insanlığa atma, yer bulma, güç kazanma mücadelesinin kendisidir AR-GE...

AR-GE’NİN ÖNEMİ

Dünyanın gelişmiş ve gelişmekte olan tüm ülkelerinde, ülkelerin geldiği seviyenin ana etkeninin AR-GE politikaları olduğunu bilmekteyiz. Firmalar da işletmeler de yönetim anlayışlarını Arge temelli olarak yaşatabileceklerini, büyüebileceklerini bilmektedirler.

Düşünen, sorun çözme odaklı, yetenekli, değişik bakış açılarıyla gözlemleyen değerlendiren herkes AR-GE ruhuyla hayatını yaşadığını söylememiz mümkündür.

Daima yenilikçi bir bakış açısı olan, değişim ve gelişimden yana olanlar, insanlığa çok büyük faydalar sağlayan unutulmaz, kıymettedir. AR-GE’nin önemini kavrayabilmek için günümüzde dünyanın en büyük piyasa değerine sahip, Pazar ve marka değerine sahip firmalarının sıralamalarını okuduğunda anlaması çok daha etkileyici olmaktadır. Birçok ünlü dünya markaları 100 yıl-150 yıl ömürlerine rağmen ciro, pazar payı, üretimde elde ettikleri başarılarla rağmen, yeni kurulan bazı teknoloji firmalarıyla mukayese edildiğinde şaşılacak başarıların, teknoloji firmaları tarafından kazanıldığını görmekteyiz. Birkaç yıllık, çok küçük sermaye ile kurulmuş, hatta sermayesiz kurulmuş yazılım, teknoloji firmaları çok kısa sürelerde dünyanın en büyük firmalarından biri olabilmektedirler.

Bir örnek olması açısından daha 6-7 yıllık geçmişi bulunan Whatsapp, kuruluşundan 6-7 yıl sonra Facebook tarafından 19 Milyar \$ fiyata satın alınıp, bünyesine katılmıştır. Ülkemizde de “yemek sepeti”, “Gram Games”, “Peak Games” gibi firmalar 2-3 kişi tarafından kurulmuş, yazılım temellidir ve birkaç yıl içinde milyonlarca dolar değerle satışa konu edilmişlerdir. Kısa sürede gelen yoğun talebe bağlı olarak hızla büyüyen, gelişecek olan birey, firma veya ülke ekonomilerinde muazzam katkılar oluşturmaktadırlar.

Bir ülke ki; farklı sektörlerle odaklanıp yola çıkmış firmaları destekleyerek, teşvik ve muafiyetler sağlayarak sanayisini bilim ve teknoloji odaklı girişimlere destek vererek devam ediyorsa, kısa sürede gerek GSMH, gerekse kişi başına düşen milli gelir açısından büyük ilerlemelere sahip olacaktır. Ülkeler o sebeple bütçelerinin GSMH’ da ki bir bölümünü bu tür

faaliyetler için destek kaynağına ayırmaktadırlar. Bazen büyük uluslararası firmaların AR-GE harcamalarına bakıldığında yıllık harcamaları birçok ülkenin bütçelerinden büyük AR-GE kaynağı harcaması yaptığı görülmektedir.

Ülkeler uluslararası ilişkilerde, bu büyük ve etkili teknoloji firmalarının menfaatini korumak suretiyle büyümelerini ve ülkelerin neredeyse iç işlerini sıkıntıya sokacak uygulamaları, kullanabilirler. Günümüzün en büyük firmaları incelendiğinde dünya sıralamasının ilk 10-20 firmasının özel sektör olduğu, yazılım ve teknoloji temelli olduğu, yeni firmalar olduğu ve gelişmeye açık farklı alanlara yöneldiği görülebilir. Teknoloji sayesinde işin merkezinde olan, asıl patron, yapılan tüm işlemler sayesinde kullanım sonucu elde edilen tüm verilerin tespit ve temin edilmesiyle yeni hâkimiyet alanı olan veri toplama, veri sahibi olma, veri işleme, veri güvenliği sağlama gibi yeni birçok stratejik iş ve imkânlarında sahibi olmaktadır. Aleti satın alan, aynı zamanda kullanımıyla bütün ilişkilerini, alışveriş tercihlerini, konumunu, sağlığını, yazışmalarını, paylaştığı yer ve fotoğraflarla milyarlarca veriyi merkez patrona yüklemektedir.

Tüm bunların yanında kişilerin ve hatta ülkelerin güvenlik politikalarını, bu büyük veriler (big data) sayesinde istihbarat ağı ve kaynağı olarak sahiplenmiş olmaktadır. Satın alınan bir teknolojik ürün gibi görünse de, esasında teslim alınmış bir özgürlük, bireysel ve toplumsal sırlar ve hayatlar... AR-GE bu nedenler dolayısıyla da çağımızın en etkili yönetsel sistemlerini kuran bir faaliyettir.

Başarılı bir AR-GE girişiminin milli ve yerli bir örneği ile AR-GE'nin öneminin somutlaştırmak gerekirse, ilk akla gelen örneklerden biri "Gram Games" isimli bir oyun yazılım firması söylenebilir. 2012 yılında İstanbul'da kurulan şirket 5 yıl içinde büyük bir ilerleme sağlayarak dünyada en fazla izlenen oyunların üreticisi haline geldi. 170 milyondan fazla kişinin oyuncusu olduğu söylenen firma 2018 yılında dünyanın en büyük oyun firması "Zynga" tarafından 250 milyon \$ nakit paraya satıldı. 2 Türk girişimci tarafından kurulan şirketin 77 çalışanı bulunuyordu.

Bununla birlikte söylenecek yerli çok örnek olmakla birlikte, günümüzde özellikle savunma sanayiinde aktif olan birçok firma, ASELSAN, HAVELSAN, ROKETSAN, TAİ, TEİ, TUSAŞ vb. birçok firma söylenebilir. Sadece başlı başına bir "BAYRAKTAR" İHA ve SİHA üretimleri sayesinde %90'lar seviyesinde yerli payı ile ibretlik bir başarı hikâyesidir.

Ülkemizin yerli ve milli davranışının parlak örneklerinden olan bu AR-GE ve teknoloji firmaları giderek daha büyük ve etkili başarılar kazanmaktadır.

Ülkemizin savunma kabiliyetine büyük katkıları olan bu firmalar, parayla bile ihtiyaç halinde alınamayan, stratejik, kritik birçok ürünü sistemi gerçekleştirmişlerdir. AR-GE değeri ölçülemeyen, değer biçilemeyen bir özgüven kaynağıdır. Paranın geçmediği yerde, bilim ve teknolojinin hayal ve hedefle buluşmasıyla gerçek hale gelen AR-GE uluslararası özgürlüğün kapı anahtarıdır, şifresidir. Hiçbir ayırım yapılmaksızın her konuda, sonuç odaklı fayda doğuran girişimler geleceğimizin güvencesidir. AR-GE, sonu risklerle dolu bir ilerleme olmakla birlikte devlet destekleriyle desteklenip, cesaretlenen girişimler, projelerini hayata geçirmekte çeşitli platformlarda çalıştırmaktadırlar. Bir kısmı bireysel özel firma bir diğer kısmı teknokent firması, bir kısmı AR-GE merkezi olarak TÜBİTAK, KOSGEB, başta olmak üzere Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı bünyesinden desteklenmektedir.

AR-GE ANLAYIŞI; AR-GE BAKIŞI VE DÜŞÜNCESİ

Gelecek planlama “öngörebilme, değişim ve gereklilik yaratma isteği yaratıcı düşünce odaklı ve gelişim vizyonu ile ürün pazarlarını ve müşteri taleplerini öngörebilmeyi gerektirir.”

AR-GE’ler şirketlerin dünyaya açılan pencereleridir. Bu pencereler ne kadar geniş ve çok yönlü ise, şirketler o kadar geniş bir perspektiften ileriye, geniş bir alanı, geleceği görebilirler. Şirketlerin karlı, sürdürülebilir üretim yapabilmesi ve rekabet gücünü artırabilmesi için mutlaka böyle bir birim, ekip ve alışma grubu oluşturmalıdır.

İdarenin de bu anlayışı destekleyici adımlar atması, personelin bu konuda bilinçlendirilmesi, fikir ve eylem bazında ödüllendirmelerle kişileri cesaretlendirmeleri gerekmektedir.

AR-GE Personeli

AR-GE ve yenilik ekosistemini geliştirecek AR-GE faaliyetlerinde doğrudan görevli araştırmacı teknisyenler ve destek personelinin oluşmaktadır. AR-GE personeli, işletmede üretim faaliyetlerinden ziyade, tasarım, planlama, yazılım, prototip yapımı mali işler ve diğer yardımcı personellerdir.

AR-GE merkezlerinde, bağımsız bir asgari standart büyüklüğü olan, giriş çıkışı kayıt altında, gizliliğe dikkat eden ufku geniş bizzat işin içindeki personellerdir. Büyük çoğunluğu, yükseköğrenimini tamamlamış, lisans, yüksek lisans mezunu ve hatta doktora yapmakta olan yahut yapmış olan

nitelikli kişilerdir. İlk çıkan yasada en az 50 nitelikli personel olarak ifade edilmiş olsa da, zamanla ihtiyaca bağlı olarak 30 nitelikli personele düşürülmüş 2016 yılında AR-GE reform paketi ile yasalaşan son duruma göre bazı sektörler için AR-GE personel sayısı 15'e kadar düşürülmüştür. Kobilerin bazıları daha gelişmeye açık olmaları için işletmelerde bağımsız bir bölümde üretim alanı ile de irtibatla olacak şekilde çalışılmaktadır. Bu konu istismara açık gibi görülse de personelin teşvik, destek ve muafiyetlerden yararlanması konusunda, üretimle iç içe olan mühendis-tekniker, teknisyen gibi AR-GE teknik personelinin aynı zamanda AR-GE (üretim geliştirme) personeli gibi davranması bir ekosistem oluşmasını besler. İhtimalen yasanın işletmelerdeki, AR-GE personelinin üretim alanında belli bir oranını, ¼ gibi faaliyette olmasının faydalı olabileceğidir.

Ayrıca habersiz denetimlerin de daha dikkatli yapılmasının ve proje güvenliği ile devamlılığının üst itiraz kurullarıyla yürütülmesidir. Üretimsiz AR-GE başarısı bir kıymet doğurmaz.

AR-GE PERSONELLERİ

- Araştırmacı,
- Teknisyen,
- Yardımcı Personel olarak ifade edilebilir.

Araştırmacı

AR-GE faaliyetleri ile yenilik tanımı kapsamındaki projelerde, yeni bilgi, ürün, süreç, yöntem ve sistemlerin tasarım veya oluşturulması ile ilgili projelerin yönetilmesi süreçlerinde yer alan en az lisans mezunu uzmanlardır.

Tekniker-Teknisyen

Meslek Yüksekokulları, Teknik ve Mesleki liselerin, Teknik, tasarım, fen ve sağlık bölümlerinden mezun teknik bilgi ve deneyim sahibi kişilerdir.

Destek Personeli

AR-GE ve yenilik veya tasarım faaliyetlerine katılan ya da bu faaliyetlerle doğrudan ilişki yönetici, teknik eleman, laborant, sekreter, işçi ve benzeri personeller destek personeli statüsündedir. Destek personeli AR-GE personeli toplamının en fazla %10'u kadar olabilir.

Tanım, deyim ve sıfatlandırmalar ne olursa olsun, hedefi amacı, çabası olmayan başarıya odaklanmamış bir takım, başarılı olamazsa odaklandığı konu sebebiyle gözüne uyku girmeyen, rüyasında çözümüne odaklandığı sorunu görmeyen AR-GE personeli, görevi ve statüsü ne olursa olsun

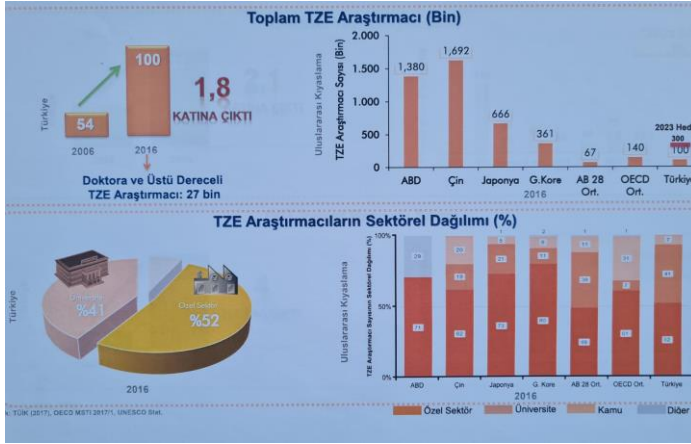
başarılı bir takım olamaz. Bu nedenle bu vazifelere seçilen kişilerin görevin öneminin bilincinde olması şarttır.

Başarısız olmuş bir projeden, bir başka ümitsiz projeye başlamak, zaman kaybindan, emek kaybindan, ekonomik kayıptan başka bir işe yaramaz. Para kazanmak için AR-GE değil, başarı kazanmak için AR-GE yapılmalıdır.

AR-GE merkezlerindeki araştırmacılardan birçoğu mühendis olmakla birlikte, farklı disiplinlerdeki mühendislerin veya lisans, yüksek lisans, doktoralı kişilerin yanında, toplam AR-GE personelinin %10'unu geçmemek üzere üniversitelerin fizik, kimya, matematik, biyoloji gibi temel bilimlerinden lisans mezunu kişilerini almak imkân ve yetkileri vardır.

Öyle ki bilimsel temelini bu kişilerin katkıları olmaksızın yapmak çok kolay olmayabilir. Bu temel bilimler mezunu olan araştırmacıların 2 yıllık brüt asgari ücret tutarındaki maaşları Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ödemektedir.

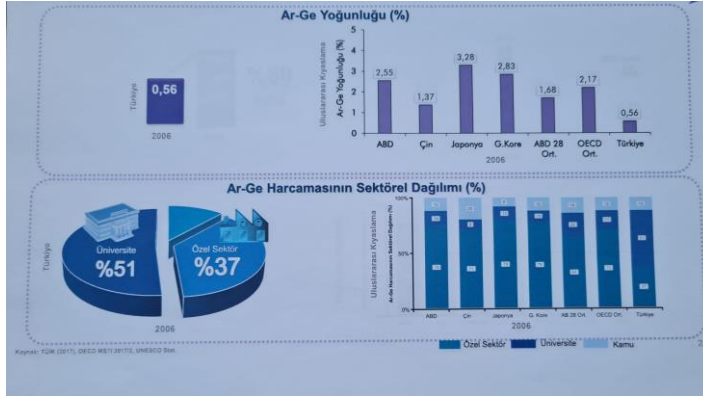
Projelerin bilimsel temellerini ve altyapılarını bu temel bilimler mezunları sağlamakla beraber, mühendisler işin uygulamaya dönük, hayata dönük kısmını yürütmektedirler. 2016 yılı grafikleri incelendiğinde Türkiye tam zaman eşdeğeri TZE araştırmacı sayısı 2006 yılında 54 bin, 2016 yılında 100 bin seviyesindeki artış oranı oldukça yüksektir. Ortalama 1,8 kat araştırmacı sayısının yükseldiği görülmektedir. Uluslararası kıyaslamada en fazla 1 milyon 692 bin ile Çin, 1 milyon 380 bin ile, ABD 666 bin ile, Japonya 100 bin ile yer almaktadır. TZE araştırma sayısı incelendiğinde, özel sektör için, Güney Kore %80, Japonya %73, ABD %71, Çin %62, üniversitelerdeki TZE araştırmacı oranı incelendiğinde ise; Türkiye %41 ile en önde, AB 28 ülkenin ortalaması %39 ile 2. Sırada Japonya %21, Çin %18, Güney Kore %11 ve OECD ortalaması %7 şeklindedir. Kamu arge personel dağılımında OECD ortalaması %31 ile ilk sırada, %29 ile ABD 2. Sırada, Çin %20 ile 3. Sıradadır. Diğer sıralarda AB ortalaması, Güney Kore, Türkiye, Japonya gibi sıralanmışlardır (Şekil 1).



Şekil 1. Toplam TZE Araştırmacı Sayısı ve Sektörel Dağılım Yüzdesi (TZE: Tam Zamanlı Eşdeğer araştırmacı sayısı) (Çelik, 2018)

AR-GE YOĞUNLUĞU

Bir ülkedeki özel sektör, kamu ve serbest AR-GE faaliyetlerinin, GSYH içindeki oranı, AR-GE yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu değer gelişmiş ülkelerde oldukça yüksek olmakla beraber, bazı gelişmekte olan ülkelerde de son yıllarda belirgin artışlara sahne olmuştur. Günümüzde önemli istatistik değer olan AR-GE yoğunluğu, ülkemizde de giderek artmaya başlamış ve devam etmektedir. Son 50 yıllık süreç incelendiğinde ABD, Almanya, Japonya, Güney Kore, İsviçre, Finlandiya, Fransa gibi devletlerin çok önceden bunun farkına varıp, gerekli adımları attıklarıdır. Bu adımlarının karşılığını belirli bir sürede alan bu ülkeler, AR-GE ye verdikleri önemi giderek daha da artırarak ekonomilerinde, kişi başına düşen milli gelirlerinde büyük ilerlemeler kaydetmişlerdir. AR-GE faaliyetlerinin özel sektör, kamu ve üniversiteler tarafından yapılmasındaki oranları da incelendiğinde özel sektörün çok önde olduğu gelişmiş ülkelerde açık olarak görülmektedir. Doğrusu da bu olur.

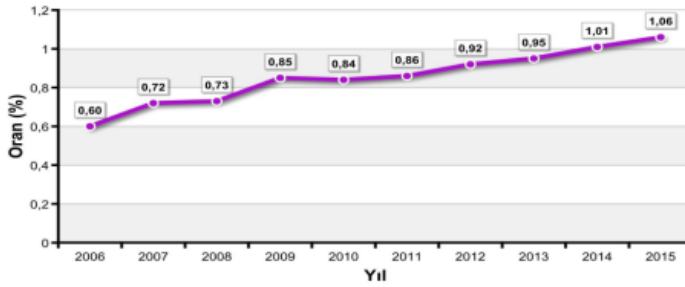


Şekil 2. AR-GE Yoğunluğu ve Harcamaların Sektörel Dağılımı (Çelik, 2018)

Üniversiteler genellikle temel araştırma faaliyetlerinde öncü olmakla birlikte, ticari gayesi olmayan ve sınırlı üretim imkânı olan kritik ve stratejik AR-GE faaliyetleri kamu tarafından yapılması akılcıdır. Kamu AR-GE'sine örnek olarak ifade edilmesi gereken çarpıcı örnek, Ulaştırma Bakanlığı, TÜRSAT, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ortaklığında yürütülen TÜRSAT 6 haberleşme uydu programı söylenebilir (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, 2024).

1 Milyar TL'nin üzerinde bir proje bedeli olan faaliyet 2023 yılında sonlandırılmak üzere planlanmıştır. Uzaya 36.000 km yukarıya yerleştirilecek olan uydunun yapımında, TÜBİTAK uzay, Uzay Ajansı, TÜRSAT gibi kamu kuruluşları ile özel sektör katkıları ile gerçekleştirilmektedir. Uydudan bir tane üretilmekte ülke ihtiyacı için uzayda yörüngesinde 15 yıl görev yapacak ve ortalama 5000 kg ağırlığında yüksek teknolojik bir üretilmektedir.

2006 yılında GSMH %0,56 seviyesinde olan Türkiye, AR-GE yoğunluğu, 2016 yılında %0,94 seviyesine 2019 yılında ise %1,03 seviyesine yükseldiği görülmektedir. 2006 yılına oranla %100'e yakın bir AR-GE yoğunluk artışı önemli olmakla birlikte, gelecek hedefine oldukça çok mesafe vardır. Daha fazla AR-GE-inovasyon ülkemizin geleceği için oldukça önemlidir (Şekil 3).



Şekil 3. Türkiye’de Ar-Ge Harcamalarının GSMH’ya Oranı (%) (Kesikoğlu & Saraç, 2017)

İlgili tablolarda (Şekil 2), (grafiklerde Güney Kore %4.24, Japonya %3.14, ABD %2.74, OECD ort. % 2,35, Çin %2,12, AB ort. %1,94 olarak gösterilmektedir.) Ülkemizde AR-GE yoğunluğu 2019 yılı sonu itibariyle %1,03 değerindedir. Sayılan ülkelerin her biri dünya ekonomisinin tepesinde üretim ve rol sahibi devletlerdir (Çelik, 2018).

AR-GE yoğunluğu tablolardan görüleceği gibi, GSYH’ya oranı arttıkça ülkelerin ekonomilerinde önemli gelişmeler olmaktadır. Toplam AR-GE harcamaları, GSYH’nın %2’sini geçen ülkelerde gelişme trendi hızla yükselmektedir. Adeta bu oran bir sınır gibi karşımızda durmaktadır. %3, %3.5, %4 ve hatta daha ileri noktadaki oranlar beklenmedik başarı hikâyelerini yazarlar. Ülkeler genel çalışmalar yanında odak sektörler belirlemeleri halinde diğer ülkelere kıyasla belirgin üstünlük sağlayabilirler. ABD, Japonya, Güney Kore, İsviçre, Fransa, Almanya, Çin, Rusya, Hindistan, İngiltere gibi ülkeler belirtilen kritik oranın üzerinde AR-GE desteklerine sahiptirler. Ülkemiz güçlü bir AR-GE ekosistemi sağlamış olsa da henüz destek, teşvik ve muafiyetlerin tamamı %1,03 düzeyinde görülmektedir. Buralara %0,5 lerdan gelen ülkemiz özel sektör ve kamu atılımlarıyla da ilerleme kaydetmektedir. Özellikle savunma sanayi konuları, havacılık, İHA, SİHA gibi adımlar iftihar ettiğimiz çalışmaları ortaya koymuşlardır (Kesikoğlu & Saraç, 2017).

Yazılım alanında nitelikli ve yerli etkinlikler, dijital oyun sektörü, otonom araç teknolojileri, iletişim, konularında gideri yok denecek kadar az, fakat getirisi, çok yüksek çalışma alanlarıdır. Yaşadığımız bu günlerde belki en ihmal ettiğimiz alan olarak görülen sağlık konusu, bundan sonra dünyada öncelikli konu olarak ele alınacaktır. Aşı, ilaç, serum, sağlık uygulamaları, tıbbi ürünler, gıda, tohum ve beslenme teknolojileri öncelikli acil ihtiyaçların başına gelecek gibi görünmektedir.

Yaşadığımız salgın hastalık “Covid 19” insanları tecrit etmiş, birinci öncelik, sağlık, hijyen ve asosyal bir yaşam olarak yeni bir hayat tarzını göstermiştir. GSYH ve oranının artması gerektiği gibi bu orandan hatırı sayılır bir miktar belki de bu konulara aktaracağımızı önermektedir. Dünyanın en gelişmiş en büyük ekonomiye sahip ülkeleri salgından kaynaklanan ölümlerin önüne geçememiş, aciz, perişan, zavallı bir toplum fotoğrafı vermişlerdir. Ülkemiz bu süreci, dünyanın en gelişmiş ülkelerinden bile çok daha iyi yöneterek, tıbbi malzeme konusu gibi hayati önem taşıyan konularda en az sıkıntı yaşayan ülkelerden olmuştur. Paranın para etmediği görülmüştür.

AR-GE VE AR-GE MERKEZLERİ

AR-GE Faaliyetleri

Her meraklı, hevesli, yenilikçi kişi tarafından gerçekleştirilebilen bir faaliyettir. Mekân, zaman, imkân aramaksızın her şartta isteyenin ilgilenebileceği bir durumdur. Tek bir kişi de, birkaç kişi de bir mikro KOBİ’de AR-GE yapabilir. Bir ürün geliştirebilir. Yeni bir ürün üretebilir. Bu tarz AR-GE faaliyeti belki devlet destekleri talep edilmemişse, proje bir makamda onay görmemişse kayıtlara bile girmemiş olabilir. Hâlbuki yapılan iş bir AR-GE olmakla birlikte kayıt dışı bir AR-GE olarak devam eden süreçtir.

Sanayide karşılaşılan birçok firma yeni gelişmiş ileri adımlar atmasına rağmen, TÜBİTAK, KOSGEB, Kamu otoriteleri, Üniversiteler gibi kurum ve kuruluşlardan yardım, destek istemedikleri için AR-GE, inovasyon yapıyor görünmemektedir. Çoğu sonuçlanmış kendi ihtiyacını daha iyi gören daha fonksiyonel makine, araç-gereç ve cihaz üretimiyle sanayide teknolojik gelişimler göstermektedirler. Takdir edilmesi gereken, bu öz kaynaklarla yapılan AR-GE-inovasyon çalışmaları sanayimizin üretim maliyeti,, emek değeri, insan kaynakları ile mukayese edildiğinde güçlü rekabet şartları sağlamaktadırlar. İnsanımızın bu güçlü yeteneği, başarılı bir gelecek için sermayemizdir. Tersine mühendislikle taklit yaparak, daha iyisini ve yenisini yapmak, ihtimal bile vermediğimiz mikro kabiliyetlerimizin üstün yeteneklerindendir. Özgün birçok makina, aparat, yöntem geliştiren firmalarımız, krediye ulaşmada karşılaştıkları bürokratik engeller nedeniyle daha ileri çalışmalara girişmemektedirler. Ancak güçlü kurumsal yapısı olan, profesyonelleşmiş firmalar krediye ulaşmada, özel yetişmiş personelleri sayesinde daha kolay yol almaktadırlar. Sanayi ve teknik çevre analizi edildiğinde AR-GE-Inovasyon ekosistemi, ilkokuldan başlayan eğitimin bütün kademelerinde ve sanayinin her ölçeğinde güçlenmektedir.

AR-GE Merkezleri

AR-GE faaliyetinin planlı, programlı, hedefli, amaçlı, takvimlendirilmiş, disiplinli bir şekilde özgünlüğü olan çalışmalar haline gelmesi, bir takım riskleri de oluşturur. Bu riskleri azaltan ve/veya ortadan kaldıran ise devlet destekleri, teşvik ve muafiyetleridir. Projeler ihtiyaçlar doğrultusunda şekillenir. Özellikle çalışan sayısının küçük ve orta büyüklükte işletmelerle büyük sanayi kuruluşları AR-GE merkezleri oluşturmak suretiyle, firmaların içinde sanayi ve teknoloji bakanlığınca belirlenmiş ayrı, büyüklük alanı asgari olarak tanımlanmış, giriş ve çıkışı, personele özel ayrılmış yerlerdir. Bu AR-GE merkezleri kurulmadan önce öngörülen şartları sağlamış olması aranır. Sektörel olarak değerlendirilerek en az 15 (30), tam zaman eşdeğerli araştırmacı, teknisyen bulundurması zorunluluğuna bakılmak suretiyle, gerekli şartları yerine getiren ve usulüne uygun olarak sanayi ve teknoloji bakanlığına başvuran AR-GE merkezi kurma başvuruları, uzmanlar tarafından incelenerek, tescil edilerek belgelendirilirler. Bu merkezler sonraki süreçte, projelerini TÜBİTAK, KOSGEB, Üniversiteler, ilgili Bakanlıklar ve Kurum ve Kuruluşlar tarafından çıkılan çağrılara ve/veya firmalarının yahut ülkenin, dünyanın gidişatı ve beklentilerine uygun hazırlarlar. Bu projeler, destek istenen kurum ve kuruluş tarafından, uzman panelistler, birbirinden habersiz, bağımsız proje değerlendirici akademisyen, uzman vb. kişiler aracılığıyla eksik varsa tamamlatılır. Gerekirse yüz yüze, görüşmelerle tartışılır, sonunda kabul veya reddedilerek AR-GE merkezleri çalışır. Proje birkaç adımda yine uzman ve akademisyenler tarafından yerinde veya proje üzerinde denetlenip incelemelerde adım adım gerekli destekler, maddi olarak sağlanır. Projenin usulüne uygun yürütülmediği ve belirlenen hedefe ulaşamayacağı öngörüldüğü takdirde desteğin kesilmesi gerekirse, desteklenen kısım için müeyyide uygulanır.

Proje, belirlenen plan dâhilinde usulüne göre yürütüldüğüne karar verilmiş ise, gelecek adımlara geçilmek suretiyle belirlenen tarihte sonuçlanması ve başarılı bir şekilde sonuçlanmasına gayret edilir. AR-GE merkezleri büyük firmaların merkezleri ise 15-30 değil, 500-1.000-5.000 kişinin çalıştığı AR-GE merkezlerine evirilebilir. Çalışanlarının yaklaşık %80'inin lisans mezunu, Yüksek Lisans, Doktora mezunu olan bu merkezler büyük buluş ve gelişmelerin sahibi olurlar. Arçelik, Vestel, Huawei, Aselsan, Havelsan, Ford, Tusaş, Tai, Tei, Baykar bunlardan bazılarıdır.

Bazı AR-GE firmaları dünya çapında 100 bin, 200 bin, 300 bin çalışanla dünya teknoloji geleceğini şekillendirmektedirler. İlerleyen zamanlarda konusuna odaklanan, uzmanlığı gelişen bu AR-GE personeli hayalleri, hedefleri, azim ve gayretleriyle yüksek kıymete sahip olurlar. Üstelik bulundukları yerde, edindikleri bilgi ve tecrübe, onların ne pahasına olursa olsun firma dışına çıkmalarına katlanır hale getirir. Bazen ülkeler ve

firmalar arası bilgi transferi bu kıymetli kişiler aracılığı ile yapılır. Teknoloji casusluğu günümüzün en değerli ekonomik faaliyeti olmuştur. O sebeple birçok işletme üretim hatlarını ziyaretçilere açmayı istemez. Özellikle, AR-GE merkezlerini tamamen izole bir anlayışla yürütürler. Gelecek bir zaman diliminde piyasaya sürmeyi düşündüğünüz ve planladığınız bir AR-GE faaliyeti, fikir olarak bile çok değerlidir ve rekabette önde olmayı sağlayan en güçlü silahtır. Bakanlığın belgelendirdiği ve projelerini desteklediği bütün AR-GE merkezlerine giriş, çıkış engellidir, izinlidir. Öyle ki projede yer alan personeller bile kendi işinin ne işe yarayacağını bilemeyebilir. Başkasının yaptığını zaten bilemez. Bütünün parçaları, yani projenin her bölümü, belki de başka bir AR-GE merkezinde yürütülüyor, bir başka yerde koordine ve yönetiliyor olabilir. Burada fikrin gücünü daha net görmekteyiz.

Ülkelerin AR-GE harcamalarının yıllar itibariyle sektörel dağılımı değişmekle birlikte özel sektör ağırlığı bütün dünyada etkilidir. Ülkemizde de AR-GE harcamalarının yaklaşık %54'ü özel sektör tarafından %26'sı Üniversiteler tarafından %10'u da kamu kurum ve kuruluşları tarafından yapılmaktadır. Giderek özel sektör AR-GE harcamalarının ağırlığı (oranı) artmaktadır. 2016 yılı istatistiklerinde uluslararası kıyaslamaya bakıldığında, grafiklerde görülen, özel sektör ağırlığının en fazla ağırlığı olan ülkelerin, Japonya %79, G. Kore, Çin%78, ABD%71, OECD üye ülkelerin oranı %69, AB 28 ülkeleri %64 ve Türkiye %54 olduğu görülmektedir. Ülkemizin daha fazla özel sektör AR-GE harcaması yapması beklenmektedir. Türkiye, Üniversite AR-GE harcamalarında gelişmiş dünya ülkelerine göre oldukça fazla olduğunu görmekteyiz. Bu harcamaların mutlaka çıktı odaklı özendirilmesi ve ödüllendirilmesi hatta akademik yükselme kriterlerinin başarı ölçeğine göre değerlendirilmesi uygun olacağı görülmektedir. Sadece bir AR-GE projesinin yapımında değil, başarılı ve somut sonuçları olan proje nihayetiyle yükselme kriterleri desteklenebilir. Kamu AR-GE harcamaları ise ülkelerin ihtiyaçları doğrultusunda, odak sektörlerle olduğu anlaşılabilir. Güçlü, temel kullanıcı ve sağlayıcı ülkelerin kamu kurumları olması yerindedir. Özel sektörün büyük riskleri alması çok mümkün görünmemektedir (Eke & Ayrancı Bağrıaçık, 2022).

REFERANSLAR

- Çelik, H. A. (2018). TÜBİTAK 2018 brifing notları.
- Kesikoğlu, F., & Saraç, Ş. (2017). AR-GE harcamalarının büyüme üzerindeki etkisi: İBBS Düzey 1 bölgelerinin karşılaştırmalı analizi. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, ICMEB17 Özel Sayısı.
- Türk Havacılık ve Uzay Sanayii. (2024). TÜRKSAT 6A. <https://www.tusas.com/urunler/uzay/haberlesme-uydulari/turksat-6a> (Erişim tarihi: 8 Ekim 2024)

Eke, E. E., & Ayrancı Bağrıaçık, E. (2022). Seçili OECD ülkelerinde kamu AR-GE harcamalarının etkinliğinin analizi. *Fiscaoeconomia*, 6(2), 699-725. <https://doi.org/10.25295/fsecon.1098193>

Fikri Üretim ve Mühendislik

Hasan Ali ÇELİK¹

1- Doç. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. hasancelik@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5083-6100

ÖZET

Fikri üretim, mühendislikte yenilik ve yaratıcılığın temelidir. Hayal, yeni keşifler ve icatlar için bir başlangıç noktası olarak kabul edilir ve mühendisler, hayal gücünü kullanarak çözümler üretir. Bu süreçte hayal, hedef belirleme ve odaklanma önemli yer tutar. Fikirler ise, mühendislikte yaratıcı çözümler üretmenin temel araçlarıdır ve bu fikirler, fikri mülkiyet haklarıyla korunmalıdır. Fikri mülkiyet; patentler, faydalı modeller ve sınai mülkiyet hakları gibi yöntemlerle yasalarla korunur. Patentler, yeni buluşlar için sınırlı bir süreyle sağlanan haklardır ve patent başvuruları detaylı bir inceleme sürecini içerir. Faydalı modeller ise daha hızlı ve basit bir süreçle alınabilir, ancak daha kısa bir koruma süresi sunar. Fikri mülkiyetin korunması, mühendislerin gelecekte yenilikçi çözümler üretmesi için kritik öneme sahiptir. Mühendislerin, yaratıcı fikirlerini hayata geçirmeden önce kapsamlı araştırmalar yapmaları ve bu fikirlerin patentlenebilirliğini değerlendirmeleri gerekir. Sonuç olarak, mühendislikte fikri üretim, teknoloji ve inovasyonun ilerlemesi için hayati öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler – Fikri Üretim, Patent, Faydalı Model, Mühendislik, Fikri Mülkiyet

GİRİŞ

FİKRİ ÜRETİM ve MÜHENDİSLİK

Fikri Üretim

Üretim, teknolojik gelişimin ilerlemenin temelidir. Hayalden hedefe giden yolculuğun esası budur. Yeryüzündeki ihtiyaçlara karşılık vermek, sorun olarak hissedilen veya kabul edilen konuların sorun olmaktan çıkarılması fikir düşünce eseri ortaya konan somutlaşmış sonuçlardır.

Günümüze kadar insanlığın geçirdiği evreler iyiye, daha iyiye duyulan isteklerin devamlı olarak dinamik kalmasıyla ilerleme kaydetmektedir. İhtiyaçların sınırsızlığı, imkanları zorlayarak neredeyse imkansız-olmazı olur hale getirmektedir.

Sınırsız hayaller zor hedeflerin başlangıç noktaları olmakla birlikte, başarmanın gerekli şartlarından. Bilgiye ulaşmanın her geçen zamanda daha kolay ve hızlı olması, ilerleme hızını oldukça arttırmıştır.

İnsan kaynaklarının öğrenme ve başarma arzusu farklı motivasyon yöntemleriyle büyük bir bilim ve teknoloji faaliyetlerini desteklemektedir.

Geçen her yüzyıl, hatta her gün olağanüstü gelişmelerin yaşandığı rehber bir kitap gibi arkamızda durmakta ve önümüzü aydınlatmaktadır. İnsanın ve mühendisin yaşadığı bu muhteşem örnekler, gelecek için ümit verici hayallerin beslenmesi için yeterli kıvılcımlardır. Belli ki daha

yapılacak çok şey, çözülecek çok sorun ve giderilecek çok ihtiyaç var. Özetle çok hayale çok fikre ve düşünmeye devam edeceğiz.

Hayal

Basit bir eylem gibi görünen hayal, gerçekte çok değerli bir faaliyettir. Yeri ve zamanı olmamakla birlikte, her yer ve her zaman etkin olunabilecek bir çalışma türüdür. Bir zihinsel faaliyet olan hayal; soyut bir faaliyet olmakla birlikte hedef olabilecek düşünce adıımıdır. Mühendis için hayal yeni icat ve keşifler için kapalı bir odadaki pencere gibidir. Kapalı bir odada duvarlardan başka bir şey görmek mümkün değilken bir küçük tuğla deliği, pencere, uçsuz bucaksız evrene yolculuk imkanı sağlar. O sebeple hayal yeni şeyler keşfetmenin başlangıcıdır. Beyin kadar hiçbir şey üretken olamaz. Birçok konuyu zihinde tasarlar, çizer, çözer ve hatta yapar. Muazzam bir egzersiz alanı silinmez bir not defteridir. Günümüzde kullanılan teknolojik alet, araç, gereç, makine ve cihazların neredeyse tamamı hayalin hedefe konulmasıyla elde edilmiş değerlerdir. Bazen neredeyse imkansız gibi görünen konuları ifade edenlere söylenen “hayal gücü çok yüksek” deyiimi hayalin, azmin, sürekliliğin ve karalılığın klişeleşmiş şeklidir. Mühendis hayal kurmalı bulunduğı her ortamda, yeni ve yenilikçi adımların kaşifi olabilmelidir. Hayal hakikate giden yolun başlangıcıdır. Kağıt, kalem, bilgisayar olmaksızın üretimin başlangıcıdır.

Hayal ve gücü hakkında sosyal hayattan örnekler oldukça çoktur. Film senaryoları, romanlar, hikayeleri, çizgi film karakterleri vb. birçok faaliyet hayal ile gerçekleşir. Öyle ki bu eserler yıllar yılı hafızalarda kalır ve hatta gerçek hayata rehber olurlar. Hayalden gerçeğe ilerleyiş, etkili ve güçlü bir fikri mülkiyete dönüş, çoğı kişinin önemsemediğı, boş zannettiğı zihni faaliyetin ürünüdür. “Derin derin uzaklara dalış” boş bir bakış değil yoğun bir zihni faaliyetin odaklanma meşguliyetidir. Hayal, bilinmeyene büyütec tutmaktır.

Hedef, Amaç

Herkesin bir hedefi olmalıdır. Yaşı, işi, eğitimi ne olursa olsun mutlaka bulunulan seviye ne olursa olsun ileri yönlü bir hedef oluşturulmalıdır. Hedefler belli zaman ve şartlara göre güncellenebilirler. Mühendis, araştırma-geliştirme amaçlı hedefleri kendisi için vazgeçilmez görmelidir. Öğrenim sırasında aldıkları notları, bilgileri, karşılaştığı sorunların çözümü için kullanabileceğı gibi, yeni farklı bir ürün tasarımı içinde kullanılmalıdır. Öğrenilen her bilgi hedefler için pusula önemindedir. Çoğı mühendis adayları, öğrenimleri boyunca devlet kademelerinde bir iş olmazsa özel sektörde işe kabul edilip çalışmayı hedefler. Maalesef eğitim sistemi ve günümüz şartları böyle bir hedefi cazip göstermektedir. Olması gereken ise daha fazla ihtiyaçlara odaklanan, sorunları tespit eden ve çözümleri için yeni yollar arayan bir eğitim-öğretim ile bilim ve teknoloji yolculuğunda olmaktır. Ne yazık ki hazırcılık kullandığımız teknolojik

cihazların merakını bile yok etmektedir. Nasıl çalışır? Nasıl yapılır? Başka bir yolu yöntemi var mıdır? vb. soruları sormaktan alıkoyar. Bu kadar kolaycılık ve hazırcılık hem mühendis için hem gelecek için ilerlemeye engel olan tutumdur. “Amacı-hedefi olmayan gemiye hiçbir rüzgar çare değildir.” sözü yerinde söylenmiş tecrübe ağırlıklı bir sözdür.

FİKİR (DÜŞÜNCE)

Beynimizin bir fonksiyonu olan fikir, düşünce, insanın çok değerli bir özelliğidir. Bütün canlılar yaşam için gerekli olan uzuvlara organlara sahip olsalar da insanı yücelten fikir-düşünce faaliyetinin varlığıdır. Günümüzün ileri faaliyetlerinden olan teknolojik yapay zeka, geleceğin tasavvuru olarak muazzam bir güce sahiptir.

Makinalar, robotlar insan hayalinin hedefi, fikrinin muhteşem sonuçlarıdır. Fikir denilen insan beyninin faaliyeti, varoluşun günümüze ve bundan sonraya da ışık saçan enerji hazinesidir. Evrende var olan her şey, fikri bir faaliyetle bilinirliğe, olabilirliğe, hayata sahip olunmaktadır. Düşüncenin, fikrin çok çok önemli olması birçok filozof tarafından ifade edilmiştir. Varlığın alameti düşünmek, fikretmek olarak belirtilmiştir. Fiziki beden var olması, fikri var olmanın ancak bir bölümüdür. Fikri varlık ve düşünce bilgisayar kasasındaki çip, anakart gibidir. Günümüzde hala fikrin önemi yeterince anlaşılmamış, fikri varlık ve fikri mülkiyet önemi kavranılmamıştır. Geçmişin filozofları, düşünürlerinin asırlar sonra yol gösteren söz davranış ve eylemleri fikrin-düşüncenin kıymetinin güçlü sonuçlarıdır. Fikir ve fikri mülkiyet ülkelerde yasalarla korunmakta, medeniyet inşasında eşsiz konumunu korumaktadır.

FİKRİ MÜLKİYET

Fikir malı, mülkü, serveti olan bu ifade insan düşüncesinin, beyninin ürünüdür. Fikri faaliyet ve kapasite bir insanın, mühendisin değerini yücelten, onu çözüm insanı yapan bir durumdur. Fikri mülkiyet, ev, arsa, fabrika vb. somut mülkiyet değerleri ile mukayese edildiğinde çok daha fazla değer ifade eden fikirler, buluşlar fikri mülkiyettir.

Dünyanın her yerinde yasalarla korunan fikri ve sınai mülkiyet hakları kişinin en önemli servetidir. Fikri ve sınai mülkiyetin, izinsiz olarak kullanılması, üretilmesi ve satılması, altından kalkılamaz bir cezai müeyyideyi zorunlu kılabilir. O sebeple fikrin belgelenmesi çok önemlidir. Bu hakların bir kısmı telif olarak bazıları da sınai mülkiyet olarak tanımlanır.

Telif hakları

TDK göre bir fikir veya sanat eserini yaratan kişinin, bu eserden doğan haklarının hepsi, telif, yazar hakkı, röyalti (Türk Dil Kurumu, 2024).

Sınai Mülkiyet Hakları

Yeni, yenilikçi ve özgün bir fikrin hayata dokunması için ilk üreten, yapan, satan için onun hak ve menfaatlerini korumak amacıyla ürünün ilk sahibi, fikrin ilk sahibi adına tescili ve belli bir sürede ve belli ülkede tek üretici olma hakkıdır. İzinsiz olarak başka birinin bu yeni ürünü üretmesi suçtur. Türk patent ve marka kurumundan onun hak ve menfaatlerini koruması için belge alınır. Patenler, faydalı modeller, tasarımlar, markalar ve diğerleri bu haklardan yararlanır.

Patent, faydalı model, tasarım vb fikri ve sınai mülkiyet başvuruları yapmak için, öncesinde sözlü ve yazılı, görsel bütün mecralarda bu fikrin daha önce yayınlamış bilinirliklerinin olmaması esastır. Fikri ve sınai mülkiyet sahibi olmak için başvurudan ön bir araştırma yapmak gerekir.

BULUŞ

Bilinmeyen, aranılanı bulma. Yeni bir şey, daha farklı bir şey, daha fonksiyonel bir şey bulmak, keşfetmektir. Mevcut bir cihaz, alet, makineyi farklı bir yöntem ile işletmek, çalıştırmak, icat ve imal etmektir.

Buluşların asıl kaynağı meraktır. Soru sormak, alternatif aramak, başka türlü olabilirliğini fikretmektir. Buluş anlık bir ilhamla da olabilir, uzun bir odaklanma süreci, sabır, azim ve yılmayan bir kararlılıkla sağlanabilir. Bir insanın, mühendisin uzun süreli emeği ile olabileceği gibi bazen uykusuz bir gecenin içinde, uyku halinde bir rüyanın rehberliğinde de olabilir.

Var olan bir sorunun çözümü, ihtiyaç duyulana erişme isteği buluşları tetikleyen kıvılcımlardır. Bir buluş zannedilenin gerçekten bir buluş olup olmadığı, Türk Patent ön araştırma işlemleri ile resmi ve kesin olmayan bir şekilde aşağıdaki internet sitesinden faydalanılabilir. Bu şekilde hem zaman kaybı hem mali kayıp hem de emek harcanmamış olur.

- <http://tr.espacenet.com>
- <http://worldwide.espacenet.com>
- <http://www.wipo.int>
- <http://www.uspto.gov>
- <http://google.com/patents>

PATENT

Buluş sahiplerine, sınırlı bir süre ve sınırlı bir (ülke) için tek yetkili olma hakkı sağlayan bir belgedir. Bu belge sahibi dışındakiler, patent belgesinde ifade edilen buluşun üretilmesini, ithalatını, kullanımını izin almaksızın yapamazlar.

Tablo 1. Başvuru Tescil Sayıları (Türk Patent ve Marka Kurumu, 2024)

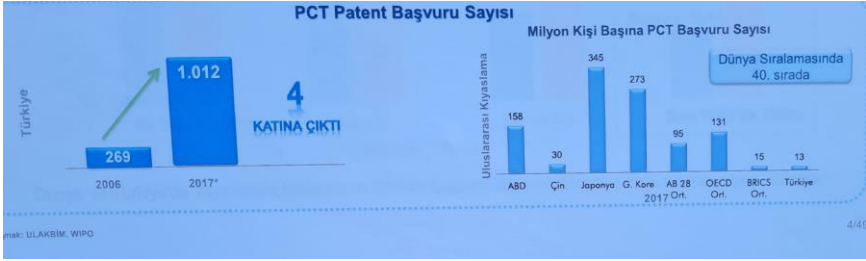
Dönem	Yeri Patent Başvuru Sayısı	Yeri Patent Tescil Sayısı	Yeri Faydalı Model Başvuru Sayısı	Yeri Faydalı Model Tescil Sayısı	Yeri Tasarım Başvuru Sayısı	Yeri Tasarım Tescil Sayısı	Yeri Marka Başvuru Sayısı	Yeri Marka Tescil Sayısı
2000	277	23	454	145	10.118	8.178	21.188	10.668
2001	337	58	631	257	13.363	10.806	20.289	10.150
2002	414	73	914	376	19.906	14.452	28.534	13.502
2003	490	93	1.206	704	21.730	16.098	30.507	14.542
2004	685	68	1.479	678	23.235	21.533	38.524	18.931
2005	935	95	1.896	964	26.694	21.942	48.981	26.963
2006	1.090	122	2.424	1.665	28.822	27.963	54.788	34.543
2007	1.838	318	2.972	2.148	29.085	29.048	58.713	40.757
2008	2.268	338	2.949	1.833	28.822	27.963	60.597	35.543
2009	2.588	456	2.842	2.151	26.277	23.765	59.838	41.414
2010	3.250	642	2.994	2.022	29.467	28.623	73.142	32.397
2011	4.087	847	3.175	1.948	35.453	31.782	103.747	35.858
2012	4.543	1.025	3.726	2.245	39.890	35.954	97.311	52.386
2013	4.528	1.244	3.468	1.997	43.654	40.707	93.320	68.391
2014	4.861	1.251	3.477	2.474	41.183	41.233	97.145	72.334
2015	5.512	1.730	3.451	2.681	38.665	40.859	95.962	70.111
2016	6.445	1.794	3.457	2.347	39.294	41.391	94.575	83.665
2017	8.625	1.964	3.256	2.014	39.172	37.131	106.099	77.394
2018	7.349	2.805	2.698	307	35.354	33.621	105.550	81.911
2019	8.126	2.003	2.906	661	39.178	33.127	119.412	72.434
2020	8.200	2.214	3.577	1.145	41.921	38.121	155.913	85.729
2021	8.439	3.342	4.418	2.513	59.247	44.091	176.493	114.242
2022	9.009	3.407	5.502	2.302	78.268	58.358	197.235	140.065
2023	8.663	2.536	3.321	1.627	52.352	54.418	168.850	123.660

Teknolojinin her alanındaki buluşlar

- Yeni olması
- Sanayiye uygulanabilir olması
- Buluş basamağı içermesi

şartlarıyla patent belgesi verilir.

Teknolojinin bilinen durumu patent başvurusunun yapıldığı tarihten önce, buluş konusunda toplumca erişilebilir yazılı veya sözlü tanıtımı, kullanım veya banka yoluyla açıklanan belgeleri kapsar. Bu konular dünyanın herhangi bir yeri için geçerlidir(Türk Patent ve Marka Kurumu, 2023).



Şekil 1. Patent Başvuru Sayıları (Çelik, 2018)

Yenilik

Patent başvurusunun ardından önce dünyanın herhangi bir yerinde bilinen, kullanılan, satılan, alınan, ithal, ihraç edilen bir ürün, fikir olmaması.

Buluş Basamağı

Buluşun sanayinin herhangi bir alanında üretilebilir ve kullanılabilir olması.

Sanayiye uygulanabilirlik

Doğa, fizik kuralları gereği üretilebilir olması. Yapılması mümkün görülmeyen, kullanılması mümkün görülmeyen, doğa kanunlarına aykırı fikirler patentlenemez.

Türk patent ve marka kurumu başvuruları inceleyerek, araştırarak karar verir. Bu konuda yetkili uzmanlar bütün dünyadaki alakalı fikri çalışmaları karşılaştırırlar ve değerlendirmeye alırlar.

Fikrin patentlenebilmesi için;

Türk patent ve marka kurumu veri tabanında araştırma yapmak için

- <https://portal.turkpatent.gov.tr/>

Avrupa patent ofisinin veri tabanında araştırma yapmak için,

- <https://worldwide.espacenet.com/>

Fikri ve sınai mülkiyet başvurusunda bulunmadan önce, buluş tahmin ettiğimiz konu ile ilgili ulusal ve uluslararası alanda emsal, benzer, aynı

alandanda bir fikir ortaya atılıp atılmadığı araştırılıp incelenirse gereksiz heves, heyecan ve ümit olunmaz ve yeni bir konuya, soruna odaklanıp çözmeye fikri arayışına yönelinir.

Patent başvurusu yapmak için, internet üzerinden Türk patent ve marka kurumuna başvurulabilir. Başvurma belgesinde; özet bir bilgi, buluşu ayrıntılı bir şekilde anlatacak tarifname, buluşta korunmasını istenilen özellikler, istemler kısmında ifade edilir, yazılır. Eğer varsa resim, fotoğraflar açıklanarak başvuru dosyasına eklenir.

Patent belgesi buluş fikrini 20 yıl boyunca Patent belgesi sahibi adına korur. Belgenin korunması patent alınan ülkenin sınırları içerisinde geçerlidir.

FAYDALI MODEL

Fikri ve sınai bir mülkiyet hakkı olan faydalı model, patent alma şartlarına sahip olanların başvurduğu; yenilik sanayiye uygulanabilirlik özellikleri aynen var olan bir durumda patentten farklı olarak teferruatlı bir inceleme yapılmaksızın daha hızlı, kısa sürede alınabilecek bir belgedir. Patent 2-3 yılda alınabilirken, faydalı model 1-2 yılda alınabilmektedir. Patentin koruma süresi 20 yıl iken faydalı modelin 10 yıl koruma süresi vardır.

Patent ve faydalı model esasında çok yakın fikri ve sınai mülkiyet hakkı olup ihtiyaca ve şartlara göre tercih hakkı kullanılabilir. Başvuru şekli ve şartları da birbirine çok yakın ve benzer olan bu iki belge sahibine yeni ufuklar açabilecek önemli bir ayrıntıdır (Türk Patent ve Marka Kurumu, 2024).

Fikri ve sınai mülkiyetle ilgili bir mühendis gereken ayrıntıları ilgili kurumdan kurum yayınlarından, patent-marka uzmanı veya ofislerinden öğrenebilirler. Önemli olan düşünmek, çözüm aramak yeni ve yenilikçi fikirlere odaklanmaktadır.

ODAKLANMAK

Azmin, kararlılığın, titizliği, bir konu ile zihinsel bütün zamanını geçirmenin adıdır odaklanmak.

Bütün dikkati bir yere, bir şeye bir noktaya yöneltmektir. Öyle ki her şeyde odaklandığı konuyu, olayı görmektir. Uyurken bile, rüyada odaklandığı konu ile meşgul olmak bazen çözmektir.

Esasında merceğin güneş ışıklarını bir noktada toplayıp, bir kağıdı, yaprağı, otu ve hatta bütün bir ormanı yakmaktır odaklanmak. Güneşten gelen ışın demeti bir noktada birleştiğinde çok kuvvetli bir enerji oluşturur. Halbuki bu güneş ışınları her gün evimize, ormanımıza, çöpümüze yine dokunur. İşte odaklanma o kadar önemli ve gereklidir ki kuvvetli bir enerji oluşumu bu şekilde gerçekleşir. Teleskop uzayda gök cisimlerini

odaklanarak görür. Mikroskop zerre kadar virüsü, bakteriyi odaklanarak tespit eder. Odaklanmak sadece ona o noktaya dikkat etmek, çözüm aramaktır. Birçok fikri ve sınai mülkiyetin kaynağı odaklanmaktır. Günlük aktivitelerde dahi odaklandığı konuyu hatırlamak, onu yaşamaktır. Odaklanmak geçici bir heves ve merak değil süreklilik isteyen bir eylemdir. Mühendisin çözüm anahtarı, formülü ve tünel ucundaki ışıdır. Karanlığa ışık tutmak, görebilmek, odaklanmaktır.

PATENT VE MARKA VEKİLLİĞİ

Mühendisler için önemli bir faaliyet alanı olan, fikri mühendislik alanına “patent ve marka vekilliği” olarak profesyonelce yönelmek mümkündür. Türk patent ve marka kurumu tarafından belirli aralıklarla yapılan sınavlarda başarılı olanlara bu belge verilir. “Patent ve marka vekili” olanlar konulara hakim, yasa ve yönetmelikleri bilen ve yakın takip eden kişilerdir.

Şehirlerde, ihtiyaç hissedilen yerlerde ve hatta büyük firmalarda oluşturulan iş yerlerinde talep sahiplerine gerekli bilgi, destek ve takip faaliyeti ile profesyonel bir çalışma imkanı sağlamış olurlar.

Günümüzde firmalar, AR-GE ve inovasyon faaliyetlerini önemseyen bir yaklaşım içindedirler. Hatta bazı firmalar sanayi ve teknoloji bakanlığı tarafından şartları belirlenmiş, denetime tabi olan ve onaylanmış AR-GE merkezi olarak belgelendirilir. Bazı firmalar ise yasal yeterli şartları sağlayamadığı için firma içinde yaptıkları görevlendirmeler ile üretimi geliştirme, yeni ve farklı bir ürüne yönelme fikri ve sınai mülkiyet haklarına ait yasa ve yönetmelikleri bilen kişilere ihtiyaç duyarlar.

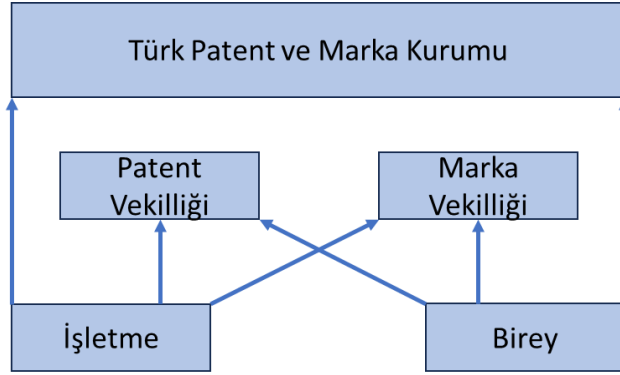
Yeni ve yenilikçi her ürün, usulünce yapılan başvurular ile fikri ve sınai mülkiyet hakkına kavuşur. Patent, faydalı model, tasarım, marka ve diğerleri Türk Patent ve Marka kurumuna yapılan başvuru ile yasal bir hak doğurur. O sebeple mevzuata hakim bir mühendis, gerekli iş ve işlemleri, güvenilir bir tutumla gizliliğe önem vererek tamamlayarak belgelendirir. Belgenin yasal haklarını kuruma ödenmesi gereken yıllık ücretleri ödeyerek hak devamlılığını takip eder. Aksi halde takip edilmeyen buluş, patent ve faydalı model, marka , tasarım belgesi hak kaybına uğrayabilir.

Fikri mühendisliği bir bütün olarak değerlendirdiğimizde, geleceğin aranan, fikri zenginliği ve derinliği olan mühendisi olabilecektir.

Bir mühendis, temel bilimleri (fizik, kimya, matematik, biyoloji vb.) iyi öğrenmiş, yabancı dil bilen, meraklı, araştıran, literatür tarayan, mesleğine ilişkin yasa ve yönetmelikleri bilen, takip eden, dünyadaki teknolojik gelişmeleri izleyen, sorun arayan ve onu nasıl çözmesi gerektiğini inceleyen özelliklere sahip olmalıdır.

Söylenen bu özelliklerin yanında faydalı olmayı kendine görev edinmiş, ideal sahibi, cesur ve ısrarcı olmalıdır. Olumsuzluk karşısında hemen vazgeçmemelidir. Evrende keşfetmemiz gereken sayısız konu, sorun

ve durum vardır. Sadece kendi bulunduğumuz yer değil bütün dünya ve evren ilgi alanı olmalıdır. Günümüzde kullandığımız birçok araç, gereç, teknolojik cihaz, makine uzak bir hedef ve hayalin ürünüdür.

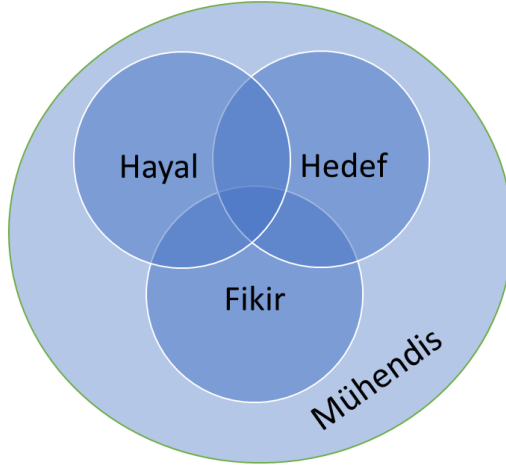


Şekil 2. Patent, Faydalı Model, Tasarım ve Marka Başvurularında İzlenebilecek Yol

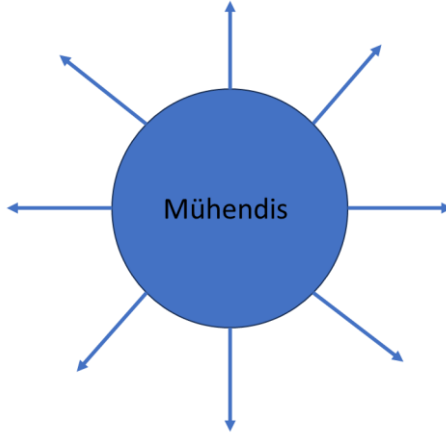
Buluş sahipleri, kişiler veya işletmeler Patent, faydalı model, tasarım ve marka başvurularını doğrudan Türk Patent ve Marka kurumuna yapabilecekleri gibi, daha uzman bir aracı olan patent ve marka vekilleri aracılığı ile de yapabilirler (Şekil 2).

- Problem ne?
- Nasıl çözülür?
- Başka türlü olabilir mi?
- Alternatifleri neler?
- Fonksiyonu arttırabilir mi?
- Daha uzun ömür nasıl sağlanır?
- Daha uygun fiyatlandırma mümkün mü?
- Daha fazla talep nasıl sağlanır?
- Kullanımı nasıl daha basitletilir?
- Yerine ne konulabilir?
- Herhangi bir konuda hayatı nasıl kolaylaştırır?
- Daha güvenlisi nasıl olur?
- Daha güvenilirli nasıl olur?
- -Yeni bir yöntem olur mu?
- Başkasında olmayan bir uygulama olsun! vb.

Soru, bakış, değerlendirme cümleleri fikri bir mühendislik faaliyetinin bazı şifreleridir.



Şekil 3. Mühendisin davranışı için gerekli olanlar



Şekil 4. Mühendis Bakış Açıları

Mühendisin bakış açısı bütün yönlerde olmalıdır. Hatta bilinen mümkün ötesine ilerlemelidir.

ÖZGÜN FİKİR

Patent ve/veya faydalı model başvurusu yapmadan önce, başvuru yapacağımız konuda bir sorun var mı?, çözümlenmesi istenen bir problem yaşanıyor mu?, vb. gibi soruların ülke içinde veya dışında kapsamlı bir araştırmasını yapmak gerekir. Önceden bir araştırma yapmadan yapılan patent/faydalı model – tasarım ve marka başvuruları boşa zaman kaybına da sebep olabilir. Sadece zaman kaybı değil maddi kayıplara da sebep olur. Baştan sorunu tespit edip, çözümüne yönelik talep ne ölçüde olduğunu değerlendirmek gerekir. Daha sonra sorunun çözümüne dönük fikri yol,

teknik usul, her yönüyle incelenerek, başvuracağımız yöntemin seçilmesi gerekir. Patent, faydalı model, tasarımın, yeni ve yenilikçi, daha önce başkaları tarafından ortaya konmamış olmasına özen gösterilmelidir. Her aklımıza gelen, düşündüğümüz, hayal ettiğimiz konu önemli olmakla beraber, özgün olması ilk kez ve sadece kendimiz tarafından ifade ediliyor olması bu fikri önemli yapar. Bizler her gün, her an kullandığımız şeylerin biz düşünmeden önce düşünülp, gerekli işlemler yapıldıktan sonra fikri ve sınai mülkiyet hakkı kazandığı, daha sonra ise bir girişimci tarafından üretilip toplumun kullanımına sunulduğu hatırlanmalıdır. Görülmektedir ki dünya her daim bir yeniliğe, gelişmeye, daha mükemmele yol almaktadır.

Bugün var olan imkanlar, teknolojik gelişmeler, dünyamız ve evrendeki keşifler sonsuz düşünce deryasının ürünleridir. Daha ilk insandan itibaren başlayan alet kullanma, zoru başarma, işi kolaylaştırma isteği hızlanarak devam etmektedir.

Günümüzde beyindeki düşünce etkisiyle istediğini gerçekleştirme faaliyetleri güçlü bir şekilde sürmektedir. Bedenimize takılan çipler sayesinde sorunlu organlarımıza aktivite kazandıran uygulamalar etkinliğini arttıracığı görülmektedir. Cep telefonlarının birkaç yılda geldiği aşama hayalimizi zorlamaktadır. Ses alıp veren telefonlar, şimdi birçok fonksiyonu gerçekleştirmektedir.

Hastalığa göre ilaç döneminden, kişiye göre ilaç dönemi gündemdedir. Ülkelerin savunma sanayi konusundaki çalışmaları da başka bir örnek olarak görülmektedir. Yapılan bir saldırı silahına karşı, onu durduran veya zararsız hale getiren karşı uygulamalar güncel konulardandır. Kilometrelerce öteden atılan bir füze, havalandıktan birkaç saniye sonra karşı bir savunma sistemi ile havada imha edilmesi, şehirlerin güvenlik sistemlerindendir. Tohum, gen, aşı vb. uygulamalar gelecek için canlıların hayatıyeti için son derece değerlidir. Makineleşme, nesnelerin interneti, yapay zeka, robotik sistemler, otonom sistemler ve daha nice bizi bekliyor. Hayallerimiz hedeflerimize bizi yaklaştırıyor.

Düşünme, var oluş değerlerimizdendir. Mühendis temel eğitim ve öğretimi almış kişilerin bu fikri faaliyeti beslemeleri gerekir. Var olanı kullanan, izleyen, takdir eden herhangi bir kişi de olabilir. Fakat mühendis bunun daha mükemmelini arayandır. Geniş bir perspektiften olayları inceleyip değerlendiren mühendis, yeni fikirlere yeni ufuklara yelken açan bir kaptan gibi topluma öncü olmalıdır.

NOT DEFTERİ

Fikri mülkiyete konu olabilecek hayaller veya düşünceler, anlık durumlardır. Merak edilen bir bilinmezi, fikri ve hayali bir irdeleme çoğu kez unutulur kaybolur gider. O sebeple o andaki fikri yazarak kayıt altına almak sağlıklı bir yoldur.

Her ortam, her koşul ayrı bir etkileşim sağlar. Sıcak, soğuk, bulut, yağmur, kar, dolu, rüzgar vb. doğal olaylar ve koşullar yeni ve farklı fikirlerin beslenmesini sağlarlar. Suyun katı, sıvı ve gaz halleri, malzemelerin fiziki ve kimyasal halleri yeni fikir ve hayaller için yeni ortam oluştururlar. Çaydanlıktan çay dökerken yaşanan bir durum, çözüm için anlık bir fikir kırıntısıdır. Olay yaşanıp geçtikten sonra belki bir daha hatırlanmayacaktır. Örneğin içecek içmek için pipet nasıl ihtiyaç hissedildi ve yapıldı, düz boru gibi olduğu gibi akordiyonlu olana neden ihtiyaç duyuldu. Nasıl bu kadar yaygınlaştı. Bütün bu ve buna benzer çok basit olup, hayatımızda yer eden aletlerin mucidi meraklı ve araştırmaya hevesli kişiler, mühendislerdir. Not almanın önemi, unutulma ve sonra önemsememe durumudur. Zaman ne kadar geçerse geçsin, alınan not silinmez ve yeni hayal ve hedeflerimize rehber olur. Rehber olduğu müddetçe de hedefe varmamız kolaylaşır.

REFERANSLAR

- Çelik, H. A. (2018). TÜBİTAK 2018 brifing notları.
- Türk Dil Kurumu. (2024). Türk Dil Kurumu sözlükleri. <https://sozluk.gov.tr/> (Erişim tarihi: 8 Ekim 2024)
- Türk Patent ve Marka Kurumu. (2023). Patent Başvuru Kılavuzu 2023. Türk Patent ve Marka Kurumu.
- Türk Patent ve Marka Kurumu. (2024). Patent, faydalı model, marka, tasarım bilgilendirme broşürü. Türk Patent ve Marka Kurumu.
- Türk Patent ve Marka Kurumu. (2024). Patent istatistikleri. Türk Patent ve Marka Kurumu. <https://www.turkpatent.gov.tr/patent-istatistik> (Erişim tarihi: 8 Ekim 2024)

Sulu Çözeltilerden Boyar Madde Gideriminde Kullanılan Kil Minerallerinde Adsorpsiyon Kapasitesini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi

Ceyda BİLGİÇ¹

Şafak BİLGİÇ²

1-Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ceydabilgic@gmail.com Orcid No: 0000-0002-9572-3863

2-Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü safakbilgic@gmail.com Orcid No: 0000-0002-9336-7762

ÖZET

Bu çalışma, killerin katyon doygunluğunu, boya çözeltilerinin pH ve iyonik şiddet gibi adsorpsiyonu etkileyen faktörlerin incelenmesini içermektedir. Kil minerallerinin yük yoğunlukları, killerin adsorpsiyon süreçlerinde uygulanmasında önemlidir. Bir kilin ayrışıp ayrışmaması, mevcut katmanlar arası katyonlara ve katman yüküne bağlıdır. Doğal killerin katyonlarla doygunluğunun, su çözeltilerinden boyaların giderilebilmesinde adsorpsiyon kapasitesini artırdığı bulunmuştur. Boya adsorpsiyonunu etkileyen en önemli faktör, katyonik boya adsorpsiyonu için yüksek bir pH değerinin, anyonik boya adsorpsiyonu için ise düşük bir pH değerinin tercih edildiği pH faktörüdür. İyonik şiddet, adsorpsiyon deneylerinde araştırılması gereken önemli bir parametredir çünkü endüstriyel atık suların her zaman inorganik tuzlar gibi kirleticilere sahip olduğu iyi bilinmektedir. Bu tür tuzların çözeltide bulunması, tüm adsorpsiyon sürecini büyük ölçüde etkileyen yüksek iyonik şiddete yol açar. Genel olarak gözlemlenen durum, iyonik şiddet arttıkça adsorplanan molekül ile adsorban yüzey arasındaki elektrostatik çekimin azalması ve dolayısıyla giderim verimliliğinin azalmasıdır. Sonuç olarak, çözeltinin iyonik şiddeti arttırıldığında killerin adsorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: adsorpsiyon, asidik ve bazik boyalar, killer, katyon doygunluğu, iyonik şiddet, pH.

GİRİŞ

Gelişmiş kimyasal veya fiziksel arıtmalar arasında adsorpsiyon, ozon veya elektrokimyasal oksidasyon, membran ayırma yöntemleri diğer teknolojilerden daha etkili ve daha ucuz olarak kabul edilmektedir (Yagub vd., 2014). Bu durum, kolay bulunabilirliği, tasarımının basitliği, kullanım kolaylığı, biyolojik olarak parçalanabilirliği, toksik maddelere karşı duyarsızlığı ve daha konsantre formlardaki boyaları arıtma kabiliyetine bağlanmaktadır. Adsorpsiyon, atık su ortamının saflaştırılması için önemli bir endüstriyel ayırma tekniğidir. Katı bir maddenin, çözünmüş maddeyi yüzeyine çekerek sulu bir çözeltiden çözünmüş bileşenleri seçici olarak uzaklaştırabildiği bir kütle transfer işlemidir. Bu nedenle, konsantre maddelerin bir yüzeyde veya arayüzeyde birikimini içerir. Bu ayırma tekniği, boyanın sulu ortamdan uzaklaştırılmasında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Adsorpsiyon, özellikle su geri kazanımının çok önemli olduğu tekstil, deri, boyama, kozmetik, plastik, gıda ve kağıt endüstrilerinde uygulanmaktadır (Adeyemo vd., 2017:543; Ngulube vd., 2017:35; Mu ve Wang, 2016:1274; Srinivasan ve Viraraghavan, 2010:1915).

Atık su arıtımı için çok çeşitli adsorbentler kullanılmasına rağmen, doğal olarak bulunan killer çoğu gelişmekte olan ülkede tercih edilen

adsorbanlardan biri olmuştur (Hajjaji vd., 2016:197; Mu ve Wang, 2016:1274; Santos vd., 2016:667). Killer, yüksek iyon değiştirme ve adsorpsiyon kapasitelerinin yanı sıra termal ve mekanik stabiliteleri nedeniyle adsorbanlar olarak önemli alternatiflerdendirler. Kil mineralleri, yapılarındaki bazı atomların farklı değerlikteki diğer atomlarla izomorfik olarak yer değiştirmesinden kaynaklanan bir yük taşırlar; tetrahedral tabakalarındaki Si^{4+} , üç değerlikli katyonlarla yer değiştirebilir veya oktahedral tabakalarındaki Al^{3+} iki değerlikli katyonlarla yer değiştirebilir. Bu durumda, yük eksikliği ortaya çıkar ve kil yüzeyinde negatif potansiyel oluşur. Nötr bölgeler ve nötr kompleksler üzerinde organik katyon adsorpsiyonu, yüzeylerin yükünün tersine dönmesine neden olur ve bu da killerin adsorpsiyon özelliklerini ve kolloid davranışını değiştirir. Farklı komplekslerin ve ters yüklü bölgelerin miktarının bilinmesi, kolloid davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlar ve bu da kilin çeşitli uygulamalarda daha etkili bir şekilde kullanılmasına yol açar.

Kil mineralleri katyonik ve anyonik boyalar için güçlü bir çekim gücü sergilemektedir (Hajjaji vd., 2016:197; Santos vd., 2016:667; Yan vd., 2015:1074; Yu vd., 2015:489). Bununla birlikte, bazik boyalar için adsorpsiyon kapasitesi asidik boyalara kıyasla daha yüksektir. Metilen Mavisi ve Malakit Yeşili gibi bazik boyalar üzerinde kaydedilen adsorpsiyon kapasiteleri, Kongo Kırmızısı ve Metil Turuncu gibi asidik boyalar için kaydedilenlerden yaklaşık üç kat daha yüksektir. Adsorpsiyon kapasitelerindeki farklılıkların arkasındaki ana neden, boyalar üzerindeki yükler ve kil malzemelerin yüzey özellikleridir.

Killer genellikle toprakların, tortuların, kayaların ve suyun kolloid fraksiyonunu ($<2 \mu m$) oluşturan mineraller olarak tanımlanır ve ince taneli kil mineralleri ile kuvars, karbonat ve metal oksitler gibi diğer minerallerin kil boyutundaki kristallerinin karışımları olabilir. Killer her zaman yüzeylerinde değiştirilebilir iyonlar içerir ve iyon değişimi veya adsorpsiyon yoluyla katyonları ve/veya anyonları tutarak, kirleticilerin doğal temizleyicisi olarak hareket eder ve çevre açısından önemli bir rol oynarlar. Doğal kil mineralleri, doğada bol miktarda bulunan, yüksek adsorpsiyon ve iyon değişimi potansiyeline sahip, bu özelliklere sahip oldukları için insanoğlunun en eski günlerinden beri kullandıkları minerallerdendirler. Kil mineralleri düşük maliyetli etkili adsorbanlardandır (Babel ve Kurniawan, 2003:219).

Killer katmanlı yapılarındaki farklılıklara göre sınıflandırılırlar. Bazı kil sınıfları smektit (montmorillonit, saponit), mika (illit), kaolinit, serpantin, pirofillit (talk), vermikülit ve sepiolittir. Son yıllarda, inorganik iyonları ve organik molekülleri adsorbe etme kapasiteleri nedeniyle kaolinit, bentonit, diatomit ve fuller toprağı gibi ham kil minerallerinin kullanımına yönelik ilgi artmaktadır. Kil mineralleri hem katyonik hem de anyonik boyalar için güçlü bir tutucu özellik gösterirler ve killerin boyaları adsorplayarak iyi bir giderim sağladığı birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bununla birlikte boyaların kil mineralleri üzerindeki adsorpsiyonu, esas olarak iyon değişim süreçleri tarafından yürütülmektedir. Bu durum aynı zamanda adsorpsiyon

kapasitesinin, çözeltinin pH değeriyle de değişebileceği anlamına gelmektedir.

Silika partiküller, alunit, dolomit ve perlit gibi doğal silisli adsorbanlar, düşük maliyetleri, bol miktarda bulunmaları ve yüksek adsorpsiyon özellikleri nedeniyle atık su arıtımında oldukça fazla kullanılmaktadırlar. İnorganik malzemeler arasında silika partiküller, hidrofilik yüzeylerinin kimyasal reaktivitesi nedeniyle büyük bir öneme sahiptirler. Gözenekli yapıları, mekanik stabiliteleri ve yüksek yüzey alanları onları kirlilik giderme uygulamalarında adsorban olarak çekici kılmaktadır. Ayrıca, diğer yüzey grupları arasında silisli malzemelerin yüzeyi, güçlü ve genellikle tek tabakalı adsorpsiyona neden olan asidik silanol grupları içermektedirler. Boyalarla etkileşimlerini arttırmak amacıyla silika yüzeyleri, amino fonksiyonel gruplu silan bağlama ajanları kullanılarak modifiye edilebilirler (Krysztalkiewicz vd., 2002:31). Dolomit, perlit ve cam gibi diğer silisli malzemeler de boya giderimi için önerilmiştir. Dolomit hem bir mineral hem de bir kayadır. Yanmış dolomit, reaktif boya giderimi için aktif karbondan daha yüksek bir denge kapasitesine sahiptir. Perlit camı volkanik bir kayadır ve genellikle %70'ten fazla olmak üzere yüksek silika içeriğine sahiptir. Ucuzdur ve birçok ülkede kolayca temin edilebilir, dekontaminasyon kullanımları için iyi bir adsorbandır.

Son yıllarda, bentonit, kaolinit, diatomit ve fuller toprağı gibi kil minerallerinin sadece inorganik değil organik molekülleri de adsoplama kapasiteleri nedeniyle kullanımına yönelik ilgi artmaktadır. Özellikle, boyalar ve kil partikülleri arasındaki etkileşimler kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (Alkan vd., 2005:251; Gürses vd., 2004:310; Wang vd., 2004:80; Al-Bastaki ve Banat, 2004:103; Özcan vd., 2004:44; Özdemir vd., 2004:49; Al-Ghouti vd., 2003:229; Atun vd., 2003:32; Espantaleon vd., 2003:105; Orthman vd., 2003:53; Lazaridis vd., 2003:3023; Shawabkeh ve Tutunji, 2003:111; Neumann vd., 2002:254; Ghosh ve Bhattacharyya, 2002:295; Pala ve Tokat, 2002:2920; Harris vd., 2001:131; Ho vd., 2001:2473; Bagane ve Guiza, 2000:615; Gupta, 2009:2313). Kil mineralleri hem bazik (katyonik) hem de asidik (anyonik) boyalar için güçlü bir afinite (tutuculuk) sergilemektedirler.

Bu çalışma, killeri katyon (Na^+ ve Ca^{2+}) ile doyurmanın, boya çözeltilerinin pH'nın ve iyonik şidetin, sulu çözeltilerden boyar madde gideriminde kullanılan killerin adsorpsiyon kapasitelerini etkileyen faktörleri de içermektedir. Kil minerallerinin yük yoğunlukları, adsorpsiyon süreçlerinde killerin kullanılmasında önemlidir. Bir kilin tamamen ayrışıp ayrışmaması, mevcut ara katman katyonlarına ve katman yüküne bağlıdır. Doğal killerin katyonlarla doyurulmasının, sulu çözeltilerden boyaların uzaklaştırılması için adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı bulunmuştur. Boyar maddelerin adsorpsiyonunu etkileyen en önemli faktörlerden birtanesi de pH faktörü olup, katyonik boya adsorpsiyonu için yüksek pH değeri tercih edilirken, anyonik boya adsorpsiyonu için düşük pH değeri tercih edilmektedir. İyonik güç, adsorpsiyon deneylerinde araştırılması gereken önemli bir parametredir; çünkü endüstriyel atık suların her zaman inorganik

tuzlar gibi kirleticilere sahip olduğu iyi bilinmektedir. Bu tür tuzların çözeltide bulunması, tüm adsorpsiyon sürecini büyük ölçüde etkileyen yüksek iyon şiddetine yol açmaktadır. Genel olarak, iyonik şiddeti arttıkça adsorplanan molekül ile adsorban yüzeyi arasındaki elektrostatik çekim azalır ve sonuç olarak giderim verimliliği düşer. Sonuç olarak, çözeltinin iyon şiddeti arttıkça killerin adsorpsiyon kapasitesi düşmektedir.

BOYA ADSORPSİYONU

Doğal olarak oluşan ham ve modifiye killeri, çeşitli metallerin, organik bileşiklerin ve boyaların giderilmesinde adsorban olarak iyi sonuçlar göstermiştir. Killeri, boyut ve mineralojideki farklılıklarla diğer ince taneli topraklardan ayrılır. Anyonik boyaların ve katyonik boyaların saflaştırılmış killeri üzerine adsorpsiyonu, su ve atık sulardan uzaklaştırılmaları için basit, hızlı ve ekonomik bir yöntem olarak düşünülebilir.

Renk giderme için kullanılan çok sayıda teknik arasında adsorpsiyon tercih edilen prosedürdür ve farklı renklendirici maddelerin giderilmesinde en iyi sonuçları verir. Adsorpsiyon prosesi, seyreltik çözeltilerden bile boyaların tamamen uzaklaştırılmasını sağlayan temiz, çamursuz çalışması nedeniyle diğer giderim yöntemlerine göre daha avantajlıdır. Adsorpsiyon, çözülmüş moleküllerin fiziksel/kimyasal kuvvetlerle bir adsorbanın yüzeyine bağlandığı fizikokimyasal bir süreçtir. Aktif karbon, yüksek yüzey alanına ve yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu için bu tür adsorpsiyon işlemleri için en popüler adsorbandır. Bununla birlikte, rejenerasyonu zor ve pahalıdır dolayısıyla, düşük maliyetli hazır yeni adsorbanların arayışını gerektirmiştir. Bu bağlamda, sepiolit, kaolinit, montmorillonit, smektit ve bentonit gibi doğal killeri, atık sulardan boya giderimi için alternatif düşük maliyetli adsorbanlar olarak değerlendirilmektedir. Aktif karbona göre daha düşük adsorpsiyon kapasitesine sahip olmalarına rağmen, doğal killeri daha ucuz ve çok daha bol bulunan malzemelerdir. Yağların ve katı yağların, renklerinin ağırtılması ve rafine edilmesi amacıyla kil kullanımı yaygın olarak rapor edilmiştir.

Doğal kil mineralleri iyi bilinmekte ve medeniyetin ilk günlerinden beri insanoğluna tanındık gelmektedir. Düşük maliyetleri, dünyanın çoğu kıtasında bol miktarda bulunmaları, yüksek adsorpsiyon özellikleri ve iyon değiştirme potansiyelleri nedeniyle kil mineralleri adsorban olarak güçlü adaylardır. Kil mineralleri katmanlı bir yapıya sahiptir ve adsorban malzemeler olarak kabul edilirler. Katmanlı yapılarındaki farklılıklara göre sınıflandırılırlar. Smektit (montmorillonit, saponit), mika (illit), kaolinit, serpantin, pirofillit (talk), vermikülit ve sepiolit gibi çeşitli kil sınıfları vardır. Adsorpsiyon yetenekleri, minerallerin yapısındaki net negatif yükten kaynaklanmaktadır. Bu negatif yük, kile pozitif yüklü türleri adsorbe etme kabiliyeti kazandırır. Adsorpsiyon özellikleri ayrıca yüksek yüzey alanları ve yüksek gözenekliliklerinden kaynaklanmaktadır (Alkan vd., 2004:135). Montmorillonit kili en geniş yüzey alanına ve en yüksek katyon değişim kapasitesine sahip bir kil mineralidir.

Ayrıca mevcut piyasa fiyatının aktif karbonunkinden 20 kat daha ucuz olduğu göz önüne alınmalıdır.

Bentonit ve sepiolit kil mineralleri, endüstriyel uygulamalarda adsorban olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca ağır metal iyonlarının giderimine yönelik yüksek kapasiteler sergilemekte ve atık su arıtımında kullanılmaktadırlar. Hammadde kaynakları da bol miktarda bulunmaktadır ve nispeten düşük maliyetleri gelecekte de kullanımlarının devam etmesini garanti etmektedir. Kil minerallerinin dünya rezervlerinin çoğu Türkiye'de bulunmaktadır. Minerallerin bu özellikleri ve avantajları birçok alanda ticari açıdan büyük ilgi görmektedir ve bunun sonucu olarak kapsamlı çalışmalara konu olmuştur. Yükleme derecesi, ligandların varlığı, kompleks oluşumu, kil ile temas halindeki sulu çözeltinin pH'ı ve tuz konsantrasyonu gibi çeşitli faktörler iyonların killer üzerine adsorbe edilme derecesini etkilemektedir.

KİLLERİN KATYONLARLA DOYURULMASININ ADSORPSİYON KAPASİTESİNE ETKİSİ

İyon değişimi temel olarak, çözeltideki bir iyonun hareketsiz bir katı parçacığa bağlı benzer yüklü bir iyonla değiştirildiği tersinir bir kimyasal süreçtir. İyon değişimi, kesikli ve sabit yataklı proseslerde uygulama açısından adsorpsiyon ile birlikte çeşitli ortak özellikleri paylaşır ve yüksek su kalitesine sahip olmak için ikisi birlikte uygulanarak bir arıtma için "sorpisyon prosesleri" olarak birlikte gruplandırılabilirler. İyon değişimi yöntemi de renklerin giderilmesi için verimli bir şekilde kullanılmıştır. İçme suyu arıtımında iyon değişiminin en geniş uygulama alanı yumuşatma işlemidir; yani kalsiyum, magnezyum ve diğer çok değerlikli katyonların sodyum iyonu ile yer değiştirilerek uzaklaştırılmasıdır. Boyaların giderilmesi amacıyla, iyon değişimi yöntemi kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Liu vd., 2007:1491; Raghu ve Ahmed Basha, 2007:324; Wu vd., 2008:239). Kil minerallerinin yüzey reaktivitesi genellikle taşıdıkları yüzey yükten kaynaklanmaktadır. Bu yüzey yükünün varlığı, değişim kapasitelerinin ve dolayısıyla şişmelerinin temelini oluşturur. Kil yüzey yükü ve şişme arasındaki ilişki, kil yüzey yükü yoğunluğu arttıkça kil üzerindeki çekim enerjilerinin baskın olması nedeniyle kilin şişmemesi, yük yoğunluğu azaldığında ise tam tersinin geçerli olması sebebiyle kilin şişmesi gerçeğinde yatmaktadır (Miyamoto ve ark., 2000:161). Kaolinit, illit ve smektitler olmak üzere üç ana kil minerali grubu bulunmaktadır (Liu ve Zhang, 2007:32). Bununla birlikte, boya adsorpsiyonu işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan killer smektit ve kaolinitlerdir. Yapısal olarak illit killeri muskovite benzer, ancak tipik olarak alkaliler bakımından eksiktir, Si yerine daha az Al ikamesi vardır ve olası yük dengesizliği nedeniyle Ca ve Mg da bazen K yerine geçebilir. K, Ca veya Mg ara katman katyonları yapıya H₂O girişini önler, dolayısıyla bu tür killeri şişmeyen (genişlemeyen) killer haline getirir. Tıpkı illit killerindeki gibi kaolinit kilide su emmez ve suyla temas ettiğinde şişmez.

Ancak smektit veya montmorillonit türü killer su ile temas ettiklerinde farklı bir davranış gösterirler. Smektitler Na^+ , Ca^{2+} gibi katyonlar tarafından zayıf bir şekilde bağlanır ve bu da bu tür killerin yüksek şişme/büzülme potansiyeline sahip olmasına neden olmuştur. Smektitlerin ara katmanı sadece hidrate olmakla kalmaz, aynı zamanda şişebilir (genişleyebilir) ve bu nedenle genellikle "şişen killer" olarak adlandırılırlar (Grim, 1962).

İyon değiştiriciler, sulu elektrolit çözeltilerinden pozitif veya negatif yüklü iyonları tutabilen ve aynı zamanda eşdeğer miktardaki diğer iyonları sulu çözeltiye bırakabilen katı maddeler veya sıvı çözeltilerdir. Çoğu sentez reçinesi (iyon değiştirici reçineler) polimerik yapıdadır. Ticari iyon değişim reçineleri mükemmel adsorpsiyon kapasitesine sahip olma potansiyeline sahiptir ve reaktif boyaların uzaklaştırılması ve geri kazanımı için yüksek rejenerasyon özelliği gösterirler (Jeng-Shiou vd., 2008:239). İyon değişiminin atık su arıtma, şeker ve alkol işleme, biyolojik geri kazanım ve saflaştırma gibi farmasötik uygulamalar ve hidrometalurji endüstrisi alanındaki uygulamaları rapor edilmiştir. Ayrıca, anyonik boya Orange-G (Labanda vd., 2009:234) ve katyonik boya Methyl violet 2B (Jeng-Shiou vd., 2008:239) gibi toksik boyaların atık sulardan uzaklaştırılmasında iyon değişimi kullanılmaktadır. İyon değişimi yöntemi, toksik ve çözünebilir boyaları atık sulardan gidermek için iyi bir yöntemdir, ancak bu işlemle ilişkili yüksek maliyetler kullanımını sınırlamaktadır.

İyon değişim süreçleri denge süreçleridir. Konuyu basitleştirmek için, bir katyon değiştiricinin işgalinin, değişim için mevcut katyonun türüne ve konsantrasyonuna bağlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, katyonların pozitif yüklerinin boyutu ve sayısı önemlidir. Örneğin, iki değerlikli kalsiyum (Ca^{2+}) tek değerlikli sodyuma (Na^+) karşı daha kolay yer değiştirir (Egloffstein, 2001:427). Bentonitteki tetrahedral tabakada Si^{4+} için Al^{3+} ve oktahedral tabakada Al^{3+} için Mg^{2+} iyonu ile yer değiştirmesi net bir negatif yüzey yükü ile sonuçlanır. Bu yük dengesizliği bentonit yüzeyindeki değiştirilebilir katyonlar (Na^+ ve Ca^{2+} , vb.) tarafından dengelenir. Kilin katmanlı yapısı ıslandıktan sonra genişler. Na^+ ve Ca^{2+} su varlığında güçlü bir şekilde hidratlanır ve bentonit yüzeyinde hidrofilik bir ortam oluşturur (Shen, 2001:989). Sepiolit kili, silikatin dış yüzeyinde silanol gruplarına sahiptir. Bunlar genellikle organik türler için ulaşılabilirler ve nötr adsorpsiyon alanları olarak işlev görürler. Buna ek olarak, kafes mineralinin tetrahedral tabakasındaki Si^{4+} yerine Al^{3+} geçmesi nedeniyle, bazı izomorfik yerdeğistirmeler (katyon değişimi) nedeniyle negatif yüklü adsorpsiyon bölgeleri oluşur. Bu tür bölgeler, elektrik yükünü dengeleyen değiştirilebilir katyonlar tarafından işgal edilir (Rytwo vd., 2002:273).

Kil minerallerinin yük yoğunlukları sadece yapısal araştırmalar için değil, aynı zamanda adsorpsiyon süreçlerinde killerin uygulanmasında da önemlidir. Bir kilin tamamen ayrışıp ayrışmayacağı, mevcut ara katman katyonlarına ve katman yüküne bağlıdır (Liu ve Zhang, 2007:32). Örneğin, vermikülitler yüksek bir yüzey yüküne sahiptir ve bu nedenle tamamen

ayrışamazlar. Esasen, yüzey yükü olmadan, kaolinitler başlangıçta asla ayrışmazlar, çünkü hidratlaşan ara katman katyonları yoktur. Bununla birlikte, partikül içi şişmenin aksine partiküller arası şişmeye maruz kalabilirler. Diğer iki kil türünden farklı olarak, smektitler, Na^+ 'ya eşit veya daha büyük hidratasyon enerjisine sahip katyonlarla doyurulduğunda ozmotik şişme yoluyla tamamen ayrışmaya uğrayacaktır.

Bilgiç (2005:33) bazık metilen mavisi boyar maddesinin doğal bentonit ve sepiolit killeri tarafından adsorpsiyonu çalışmasında, doğal bentonit ve sepiolit killerin Na^+ ve Ca^{2+} ile doyurulmasının adsorpsiyon kapasitesini artırdığını tespit etmiştir. Na^+ ile doyurmanın adsorpsiyon kapasitesini bentonit için %27, sepiyolit için %15 artırırken; Ca^{2+} ile doyurmanın adsorpsiyon kapasitesini bentonit için %15, sepiyolit için %16 artırmaktadır (Bilgiç, 2005:33). Ancak aynı doğal kil mineralleri kullanarak yapılan asidik boyar madde (asidik mavi 193) adsorpsiyonu çalışmasında ise; Na^+ iyonları ile doyurma, adsorpsiyon kapasitesinde bentonit için %52 ve sepiolit için %9'luk bir artışa yol açarken, Ca^{2+} iyonları ile doyurmanın bentonit için %30 ve sepiolit için ise %30'luk değerlere karşılık gelen artışlara yol açtığı bulunmuştur (Bilgiç, 2008:363). Adsorpsiyon kapasitesindeki en yüksek artış Na^+ ile doyurulmuş bentonit kili için bulunmuştur. Bu durum Na^+ ile doyurmanın bentonitlerin şişme özelliğinin artmasına neden oluşuna bağlanmıştır. Suda, montmorillonit tabakaları, tabakalar arasına su moleküllerinin girmesiyle ayrılabilir ve bu da bentonitlerin suda karakteristik şişmesine yol açar. Bentonitlerde kristal içindeki tek tek tabakalar ayrılabilirdiğinden, sadece dış alan değil, aynı zamanda iç yüzey alanı da adsorpsiyon için kullanılabilir. Bu özellik Na^+ ile doyurulmuş bentonitler için daha geçerlidir.

Aynı şekilde, Boubarka vd. (2005:117) ve Özcan vd. (2004:301) Na^+ ile doyurmanın bentonit kilinin adsorpsiyon kapasitesini artırdığını bulmuşlardır (Boubarka vd., 2005:117, Özcan vd., 2004:44). Ayrıca Wang ve arkadaşları (2004:80) yaptığı bir çalışmada, yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş Ca-montmorillonit kili için , asit boyaların sulu çözeltilerinden giderilmesinde iyi bir adsorban olduğunu göstermişlerdir (Wang vd., 2004:80). Kilde, Ca^{2+} iyonlarına nazaran daha fazla miktarda Na^+ iyonlarının bulunması, daha fazla dağılmış tabakaya sahip kil yapısı ile sonuçlanır ve bu da adsorbe edilen boya miktarını artırır. Hang ve Brindley (1970:203) yaptıkları çalışmada, Na^+ ile doyurmanın bentonit kilinin adsorpsiyon kapasitesini %40 artırdığını bulmuşlardır. (Hang ve Brindley, 1970:203). Ayrıca, Rytwo ve arkadaşları (2002:273) yaptıkları çalışmada, hem metilen mavisi hem de kristal viyole boyalarının çözeltilerinin adsorpsiyonunda, Na ile muamele edilen kilin, Ca ile muamele edilmiş kilden daha fazla adsorpsiyon özelliğine sahip olduğunu ve Wyoming bentonitinin orta seviyede adsorpsiyon sağladığını göstermişlerdir. Yapılan bu çalışmada da kildeki Na^+ iyonlarının miktarının Ca^{2+} iyonlarının miktarından fazla olması, kil tabakalarının daha fazla dağılmasına neden olmuş ve bu da adsorbe edilen

boya miktarını artırmıştır (Rytwo vd., 2002:273).

Bentonit, yüzey kafesinde aşırı negatif yüke sahiptir ve bir alüminat tabakasını kaplayan iki silikat tabakasına sahip üç katmanlı bir yapı ile karakterize edilir (Adeyemo vd., 2017:543). Bu, tetrahedral tabakadaki dört değerlikli Si'nin üç değerlikli Al ile kısmi olarak yer değiştirmesinin bir sonucudur ve bu da üç değerlikli Al'ın iki değerlikli Ca ile yer değiştirmesine yol açar. Zıt yükler birbirini çektiğinden, bentonit kilinin negatif yüklü yüzey kafesi katyonik boya için bir afiniteye sahip olabilir. Bu nedenle, bentonit kilinin katyonik boyaları adsorplamasında daha büyük bir kapasite sergilemesi beklenebilir. Öte yandan, tabakalı kaolinit minerali su veya (sıvı) içerisinde heterojen yüzey yüküne sahiptir. Tabakaların bazal düzlemleri, kristal yapı içerisindeki yüksek değerlikli katyonlar yerine düşük katyonların geçmesi sebebiyle bütün pH'larda daima negatif yük sergiler. Bir başka ifadeyle tabaka yüzeyi pH'dan bağımsızdır. Buna mukabil tabakanın kenar yüzeyleri ise içerdiği silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) ve alüminol ($=\text{Al-OH}$) gruplarından dolayı pH'ya bağımlı bir yük davranışına sahip olup, düşük pH'larda pozitif, yüksek pH'larda negatif yük sergilerler (Suraj vd., 1998). Bu kil mineralinin, pH'a olan yüksek bağımlılığı nedeniyle, çözeltinin pH'ına göre boyaların adsorpsiyon kapasitesi artar veya azalır. Adsorpsiyon, silika ve alümina tabakalarının düz açık düzlemleri üzerinde de gerçekleşebilmektedir (Spark vd., 1995:633).

Katyonik boyaları sulu ortamdan uzaklaştırmak için şişen killerin kullanıldığı kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, Katyon değişim kapasitesinin (KDK) ve spesifik yüzey alanı tayininde bazik boyaların adsorpsiyonunu kullanmanın uygulanabilirliğini ve fizibilitesini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Li ve arkadaşları (2011:1193), şişen bir kil olarak montmorillonit üzerinde metilen mavisi adsorpsiyon mekanizmasını açıklamak için bir çalışma yapmışlardır. Metilen mavisi adsorpsiyonu ile ilişkili killerden yer değiştirilebilir katyonların stokiyometrik desorpsiyonu sağlanarak, killerin KDK'si ve adsorpsiyon kapasitesi arasındaki yakın ilişki olduğu bulunmuştur. Yazarlar, katyonik boyalar içeren atık suların arıtılması için yüksek KDK değerlerine sahip şişen killerin etkili adsorbanlar olacağı sonucuna varmışlardır (Li vd., 2011:1193).

ÇÖZELTİ PH'ININ ETKİSİ

Adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi, yüzey yükleri ve aktif bölgeler gibi çeşitli parametreler, adsorbanın farklı pH'lardaki adsorpsiyon davranışıyla ilişkilendirilebilir. Atık su arıtımında adsorbanın kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri çözelti pH'ıdır. Adsorpsiyonun verimliliği çözelti pH'ına bağlıdır, çünkü pH'daki değişim adsorplanan molekülün iyonlaşma derecesinde ve adsorbanın yüzey özelliklerinde değişime yol açar (Gupta, 2009; Nandi vd., 2009). Kil yüzeyleri çok sayıda aktif bölge içerirler. Boya giderimi aktif bölgelerle ve ayrıca çözeltideki boyanın kimyasıyla

ilişkilendirilebilir. Teorik olarak, $pH < \text{izoelektrik noktasında}$, yüzey pozitif yüklenir ve bu da elektrostatik çekim kuvvetleri yoluyla negatif yüklü (anyon yüklü) boya anyonlarının adsorpsiyonunu artırır. $pH > \text{izoelektrik noktasında}$ ise kil partiküllerinin yüzeyi negatif yüklenir ve bu da pozitif yüklü (katyon yüklü) boyanın adsorpsiyonunu destekler (Nandi vd., 2009:583; Yagup vd., 2012:172).

Tanım olarak pH, hidrojen iyonları konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. Adsorpsiyon sürecinin gerçekleştiği sulu çözeltinin pH'ının değişkenliği, tüm adsorpsiyon sürecinde hayati bir rol oynamaktadır (Elmoubarki vd., 2015:16). Genel olarak pH, adsorbanın yüzey özelliklerindeki ve boya kimyasındaki değişim nedeniyle boya adsorpsiyonunu etkiler. Çözelti pH'ı ayrıca OH değişim bölgelerinin protonlanma derecesini ve adsorplanan molekülün protonlanma derecesini belirler, böylece bir değişim bölgesinin spesifik yükünü ve dolayısıyla sonuçta substratın (adsorbanın) adsorpsiyon eğilimini de belirler (Tomar ve ark., 2014:97). Bu nedenle adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi çözelti pH'ına da bağlı olacaktır. Genel olarak, düşük pH değerlerinde (asidik koşullar) anyonik boya giderim miktarında bir artış olur. Anyonik boyalar ile adsorban arasında meydana gelen elektrostatik çekim kuvveti nedeniyle, anyonik boyalar adsorbanın pozitif yüklü yüzeyine bağlanmaktadır. Yüksek pH değerlerinde (bazik koşullar), negatif yüklü adsorban yüzeyi ile anyonik boya arasında elektrostatik itme kuvveti vardır, bu nedenle adsorpsiyon kapasitesi ve anyonik boyaların yüzde giderimi azalmaktadır (Han vd., 2014:140; Bilgiç, 2008:363).

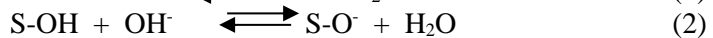
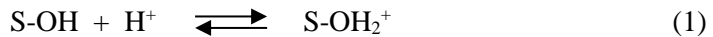
Katyonik ve anyonik boya adsorpsiyonu güçlü bir şekilde çözelti pH'ına bağlıdır. Katyonik boya adsorpsiyonu pH yükseldikçe, anyonik boya adsorpsiyonu ise düşük pH aralıklarında artış göstermiştir. Hai ve arkadaşları (2015:558) çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bu araştırmacılar, sulu çözeltiden Kongo Kırmızısı (CR), Direk Fast Scarlet 4BS (4BS) ve asit dark blue 5R (5R) azo boyalarını gidermek için TiO_2 ve asitle aktive edilmiş kaolinit kullanmış ve birçok boya giderme çalışmasında olduğu gibi, boya giderme yüzdesini nasıl etkileyeceğini görmek için pH'ın etkisini de araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgular, her üç boyanın da asidik koşullarda bazik koşullara nazaran kaolinit kili tarafından maksimum düzeyde giderildiğini göstermiştir. Yazarlar bulgularında, çözelti pH'nın TiO_2 nanopartiküllerinin yüzey yüklerini ve boyaların iyonik doğasını belirlediğini belirtmişlerdir (Hai vd., 2015). Anirudhan ve Ramachandran'da (2015) çalışmalarında boya adsorpsiyonu için benzer açıklamayı yapmışlardır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda da; negatif yüklü CR, 4BS ve 5R anyonik boyalarının, asidik koşullarda giderimleri incelenmiş ve sonuçlar beklendiği gibi çıkmış, giderim miktarı artmıştır. Bu gözlemin olası bir açıklaması, pH'daki artışın yüzeydeki pozitif yükleri azaltması ve böylece negatif yüklü bölgeleri arttırmasıdır (Anirudhan ve Ramachandran, 2015:215). Kil üzerindeki negatif yüklü yüzeyler, elektrostatik çekim kuvvetleri nedeniyle katyonik boya moleküllerinin adsorplanmasını destekleyecektir. Esasen çoğu

katyonik boya, moleküler katyonların (C⁺) yanı sıra indirgenmiş iyonlar (CH⁺) verir (Kavitha ve Namasivayam, 2007:14). Elektrostatik itme nedeniyle asidik koşullarda boya adsorpsiyonunda bir azalma vardır çünkü protonlanmış adsorban yüzeyi katyonik boya moleküllerini iter.

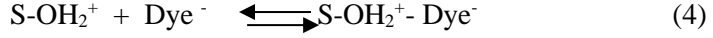
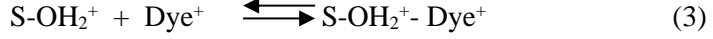
Adsorpsiyon süreçlerinin her zaman pH'a bağlı olmadığı, bazen adsorpsiyonun pH'tan tamamen bağımsız olabileceği, ancak bu durumun çoğu çalışma için her zaman geçerli olmadığı belirtilmelidir. Santos ve diğerleri (2016:667) ile Santos ve Boaventura (2016:1473), bentonit ve sepiolit killeri tarafından Bazik Kırmızı 46 (BR) giderimi üzerinde pH'ın etkisini değerlendirmişlerdir. Boya gideriminde pH'ın etkisine ilişkin genel bulguların aksine, elde ettikleri sonuçlar adsorbe edilen boya miktarının pH'tan önemli ölçüde etkilenmediğini göstermiştir. Başlangıç pH değerleri 2 ile 6 arasında olduğunda, adsorbe edilen BR boya miktarının yaklaşık 220 mg/g olduğunu ve bu pH değerlerinin adsorpsiyon kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir (Santos vd., 2016:667; Santos ve Boaventura 2016:1473). Benzer durum bentonit (montmorillonit) ve palygorskit killeri tarafından katyonik boya adsorpsiyonu için de rapor edilmiştir. Bu bulgular, BR boyasının (katyonik bir boya) asidik koşullar altında bile yoğun bir şekilde giderilebildiğini ve ayrıca bentonit kilinin iyi bir adsorpsiyon performansı göstermek için pH daki değişimlerden etkilenmediğini açıkça göstermektedir. Yazarlar bu gözlemlerinin minerallerdeki yüzey yükünün ikili yapısından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. İki farklı yüzey yükünün mevcut olduğu durumlarda: kalıcı bir negatif yük (yapısal izomorf yerdeğiştirmelerden kaynaklanan) ve pH'a bağlı bir yük (öncelikle hidroksil gruplarının ayrışmasıyla ilgili) göz önüne alınmalıdır (Al-Futaisi vd., 2007:327; Roulia ve Vassiliadis, 2008:732). Santos ve Boaventura tarafından katyonik boyalar için elde edilen benzer sonuçlar anyonik boyalar için de gözlenmiştir ve bu durum elektrostatik çekim ile açıklanmıştır. pH'daki artışla birlikte, bağımlı yük daha negatif olma eğilimindedir ve bu nedenle katyonik türleri adsorbe etmeye uygun ve anyonik olanları adsorbe etmeye daha az uygundur (Santos vd., 2016:667; Santos ve Boaventura, 2016:1473; Bilgiç, 2005:33; Han vd., 2014:140; Bilgiç, 2008:363; Tabak vd., 2009:1087).

Bir çözeltinin pH değeri, hidrojen iyonlarının molar konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. Çözelti pH'ı <7 olduğunda asidik çözelti oluşur, çözelti pH'ı >7 ise bazik çözeltiyi gösterir. Çözelti pH'ındaki değişim, adsorbanın yüzey özelliklerindeki değişim ve boyanın kimyasındaki değişim nedeniyle çözünen madde adsorpsiyonu için önemli bir parametredir. Bu nedenle, boyanın adsorpsiyon kapasitesi çözeltinin pH'ına bağlıdır.

Yüzey, reaksiyon (1)'in baskın olduğu düşük pH değerlerinde pozitif, reaksiyon (2)'nin baskın olduğu yüksek pH değerlerinde ise negatiftir.



Boya çözeltilerinin pH'larının 2'nin altına düştüğünde, S-OH_2^+ gruplarının sayısının artması nedeniyle boya anyonlarının daha pozitif yüklü kil yüzeyi ile birleşmesi daha kolay gerçekleşebilir (Alkan vd. 2004:135; Bilgiç, 2008:363; Ahmad ve Kumar, 2010:1032):



Bu yüzeydeki silanol grupları, adsorpsiyon sisteminin pH'ı yükseldikçe giderek deprotonize olur ve böylece negatif yüklü adsorban bölgelerinin sayısı artar. Bazık boya Metilen Mavisinin asidik pH'larda adsorpsiyonunun azalması, adsorpsiyon bölgeleri için boya katyonlarıyla rekabet eden fazla H^+ iyonlarının varlığını işaret etmektedir (Hamdaoui, 2006:264).

Tahir ve Naseem (2006) yaptıkları çalışmada, katyonik bir boyanın adsorpsiyon yoluyla sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için bentonit kilini kullanmıştır. Boya konsantrasyonu, çalkalama süresi ve bentonit miktarı sabitken, pH değişiminin bentonit üzerine boya adsorpsiyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bentonit üzerindeki malahit yeşili (MG) adsorpsiyonunun 2-10 pH aralığındaki değişimi, çözeltinin pH'nın 2'den 9'a yükselmesiyle boyanın adsorpsiyon miktarının %29'dan %91'e yükseldiğini ve daha sonra neredeyse sabit kaldığını ortaya koymuşlardır. Bu yüklü boya gruplarının adsorbent yüzeyine adsorpsiyonu öncelikle adsorbent üzerindeki yüzey yükünden etkilenmiş, bu da çözeltinin pH'ından etkilenmiştir. MG, yapısındaki pozitif azot iyonunun varlığından da anlaşılabacağı üzere katyonik bazık bir boyadır. Çözünme sırasında oksalat iyonu sulu çözeltiliye geçerek boyanın genel olarak pozitif bir yüke sahip olmasını sağlar. Katyonik boya üzerindeki pozitif yük, anyonik bir adsorban tarafından çekilmesini sağlamıştır. Adsorpsiyon miktarı pH 9'da maksimuma ulaşmış ve boyanın neredeyse %91'i uzaklaştırılmıştır; yani yüksek pH'larda, tetrahedral tabakanın bazal oksijen yüzeyi ile temas eden çözelti fazla hidroksil grubu içerdiğinden dolayı, yüzey yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir (Tahir ve Naseem, 2006:1842).

Ehssan ve çalışma arkadaşları (2011:63), modifiye edilmiş Irak bentonit kili üzerinde bazı boyaların adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Boya çözeltisinin pH'ı tüm adsorpsiyon sürecinde ve özellikle adsorpsiyon kapasitesi üzerinde önemli bir rol oynamıştır. Fast Green (Hızlı Yeşil) (FG) ve kristal viyole (CV) adsorpsiyonunun geniş bir pH aralığında modifiye kil üzerindeki değişimi, CV adsorpsiyonunun $\text{pH} < 7$ 'de daha düşük olduğunu, ancak $\text{pH} > 7$ 'de daha yüksek değerlere çıktığını, FG adsorpsiyonunun ise $\text{pH} > 7$ 'de daha düşük olduğunu, ancak $\text{pH} < 7$ 'de daha yüksek değerlere çıktığını göstermiştir (Ehssan vd., 2011:63).

Bellir ve arkadaşlarının (2010) yaptığı bir çalışmada, Metilen Mavisinin (MB) giderim verimi $\text{pH} = 3$ 'te minimum (%55,48) olmuş ve adsorpsiyon sürecinin ilk 5 dakikasında pH değeri 10 yükseldiğinde maksimuma (%91,65) ulaşmıştır. Boya gideriminin düşük pH değerlerinde

nispeten küçük olduğu görülmüştür; ancak pH 4 ile 5 değerlerinde, adsorpsiyon oranını önemli ölçüde artırmıştır. Adsorpsiyon sürecinin sonuna doğru (90 dakikalık çalkalama süresinden sonra) pH'ın etkisi azalmıştır. Asidik pH'larda, H^+ bentonit yüzeyindeki adsorpsiyon bölgeleri için boya iyonlarıyla rekabet etmiş ve böylece düşük pH'larda boyanın adsorpsiyonunu engellemiştir. Bununla birlikte, alkali ortamda, alümina ve silika (Al-OH ve Si-OH) gibi yüzey hidroksil bölgesinin (M-OH) deprotonasyonu nedeniyle bentonit yüzeyinde muhtemelen daha fazla negatif yük mevcuttur; böylece bentonit üzerindeki iyonize edilebilir bölgelerin sayısı artmıştır. Çözeltinin pH'ı MB'nin gideriminde önemli bir rol oynamıştır ve bu nedenle bazik ortam MB'nin giderilmesi için en uygun ortamdır (Bellir vd. 2010:360).

Termal aktivasyon (TA), asit aktivasyonu (AA) ve birleştirilmiş asit ve termal aktivasyon (ATA) uygulanarak modifiye edilmiş doğal bentonit, diazo boyasının giderimi için kullanılmıştır. Kongo Kırmızısı (CR) adsorpsiyonunun kapasitesi, pH=2-4 aralığında; inorganik asitlerin varlığında CR çözeltisinin renginin kırmızından maviye dönüşmesiyle artmıştır. Alkali koşullar altında, yani pH=10-12 aralığında; yüklü kalıcı yapılar arasındaki rezonans (yer değiştirme) nedeniyle, CR çözeltisi kırmızı kalmıştır, ancak kırmızı renk, çözeltinin orijinal kırmızı renginden farklı olmuştur. Bentonitin kimyasal yapısı pH ile değişmiştir, yani doğal bentonit doğası gereği asidiktir ve inorganik asitlerin varlığında yüzeyinde net bir negatif yük taşır. Başlangıç pH'ının 3, 5, 7, 9 ve 11 değişim değerleri için; TA, AA ve ATA bentonitleri üzerindeki CR adsorpsiyonu üzerindeki etkisi, pH değişikliklerinin ham ve modifiye bentonitler kullanılarak CR adsorpsiyon performansı üzerinde çok az etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Modifiye edilmiş üç bentonit kullanılarak pH 3-11 arasında %95'in üzerinde CR giderimi sağlanırken, pH>10'da anyonik boya molekülleri ile negatif yüklü kil partikülleri arasındaki itmeye bağlı olarak CR adsorpsiyonunda hafif bir düşüş gözlenmiştir (Toor ve Jin, 2012:79).

Lian ve grubu (2009:126), CR'nin sulu çözeltilerinden Ca-bentonit üzerine adsorpsiyonunu incelemiştir. Maksimum renk giderme verimi pH 5'te (%94,59) gerçekleşmiş ve Ca-bentonit üzerine adsorbe edilen boya miktarı pH 6-10 aralığında önemli ölçüde değişmemiştir. Ca-bentonit asidik veya bazik ortamda H^+ veya OH^- nötralize edebilir ve bu da özel yapısal özellikleri nedeniyle çözeltinin nötral eğilimli olmasını sağlayarak boya çözeltisinin asidik pH'ını nötralize eder. Öte yandan, Ca-bentonit yüksek kalsiyum içeriğine sahiptir; dolayısıyla Ca^{2+} , Ca-bentonit yüzeyindeki OH^- nötralize edebilir, bu da pH'ın adsorpsiyon üzerindeki etkisini önemli ölçüde azaltmıştır, yani Ca-bentonit farklı pH değerlerinde benzer boyar maddelerin atık su arıtımında uygun olabilir. Ca-bentonit tarafından adsorbe edilen boya miktarı; 20 °C'de ve CR çözeltisinin doğal pH'ında (pH=6,92), başlangıç boya konsantrasyonu 50 ila 200 mg/L arasında arttıkça 23,25 ila 85,29 mg/g arasında artmıştır. İşlemin ilk aşamasında adsorpsiyon için çok sayıda boş yüzey alanı mevcuttur ve zaman ilerledikçe, Ca-bentonit yüzeyine adsorbe

edilen CR boyası ile çözelti fazı arasındaki itici kuvvetler nedeniyle kalan boş yüzey alanlarında tutunmak zordur (Lian vd., 2009:126).

Abd El-Latif ve arkadaşları (2010:280) yaptıkları çalışmada, sulu çözeltiden metilen mavisinin uzaklaştırılması için aljinat/polivinil alkol-kaolin kompozitlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada, boya giderimi 360 dakika sonra başlangıç boya konsantrasyonunun 10'dan 500 mg/L'ye çıkarılmasıyla %100'den %61,6'ya düşmüştür; bu durum Metilen Mavisi (MB) boya moleküllerinin organik kaolin kompozitinin dış yüzeyine adsorpsiyonunun artmasına bağlanmış, bu da yerel boya konsantrasyonunu önemli ölçüde artırarak kompozit partiküller üzerinde boya agregatlarının oluşmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, başlangıç boya konsantrasyonunun 10 ila 500 mg/L arasında artması, boyanın kompozit üzerine adsorpsiyon kapasitesinin 1 ila 30,8 mg/g arasında artmasına yol açmıştır. Boya çözeltisinin pH'nın adsorplanan boya miktarı üzerindeki etkisi, sabit proses parametreleri altında başlangıç pH'ı değiştirilerek incelenmiştir. MB'nin yüzde giderimi çözeltisinde 360 dakikalık bir adsorpsiyon süresinden sonra, pH değerleri 2-12 arasında %76'dan %93,4'e yükselmiştir. Giderim kapasitesi de aynı davranışı göstermiş ve 1,52'den 1,87 mg/g'a artmıştır. MB'nin asidik pH'da daha düşük adsorpsiyonu, adsorpsiyon bölgeleri için boya katyonu ile rekabet eden fazla H^+ iyonlarının varlığından kaynaklanmıştır. Sistemin pH'ı arttıkça ($pH > 8$), pozitif yüklü mevcut alanların sayısı azalırken, negatif yüklü alanların sayısı artmıştır. Negatif yüklü bölgeler, elektrostatik çekim nedeniyle MB boya katyonunun adsorpsiyonunu desteklemiştir. MB'nin (katyonik formda) adsorpsiyonundan sonra adsorban yüzeyinin aktif bölgesinden H^+ iyonlarının salınmasıyla çözeltinin son pH'nın çok az (0,5 - 0,7) düştüğü bulunmuştur (Abd El-Latif vd. 2010:280).

Kongo kırmızısı (CR) boyasının uzaklaştırılması için doğal ve kalsine kaolinit kilin adsorpsiyon kapasitesi Nwokem ve çalışma arkadaşları (2012:939) tarafından rapor edilmiştir. Dengede birim adsorban kütlesi başına adsorplanan CR miktarı, hem doğal hem de kalsine kaolinit killeri için pH 2'den 5'e yükseldikçe artmış, pH 5'te doğal ve kalsine kaolinit killeri için sırasıyla %84 ve %94 adsorpsiyon verimliliği ile maksimuma ulaşmıştır. Birim adsorban kütlesi başına adsorplanan boya miktarı pH 9'a kadar artan pH ile sabit kalmıştır; daha sonra adsorpsiyon pH'daki artışla azalmıştır. pH 9'un üzerinde, adsorbanın yüzeyindeki negatif yük yoğunluğu azalmış ve bu da kilin giderim kabiliyetinde kademeli bir düşüşe yol açmıştır. Bununla birlikte, pH değerleri 5 ve 9 arasında gözlenen plato (değişmeyen doğru şeklinde), yüksek konsantrasyonlarda hidroksonyum (hidronyum) iyonlarının varlığının adsorpsiyon kinetiğini etkilemediğini ve sonuç olarak giderimin maksimum olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, kilin hidroksoillenmiş oksitlerinin asit-baz ayrışması nedeniyle bir iyon değişim mekanizması izlemiştir (Nwokem ve ark. 2012:939).

Elass'ın grubu (2010:153), 3-11 pH aralığında değişiminin, Ghassoul adlı ucuz ve kolayca bulunabilen bir Fas doğal kili kullanarak Metlen

mavisinin (MB) sulu çözeltiden uzaklaştırılmasında adsorpsiyon kapasitelerini çok az etkilediğini gözlemlemiştir. Bu nedenle sonraki çalışmalar için boya çözeltilerinde başlangıç pH ayarlaması yapılmamıştır, çünkü taze hazırlanmış boya çözeltisinin pH'ı yaklaşık 4,5-5'tir. Sıcaklık değişiminin, farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermelerinde yansıtıldığı gibi MB'nin adsorpsiyon kapasitesi üzerinde neredeyse hiçbir etkisi olmamıştır. MB'nin denge adsorpsiyonu, başlangıç boya konsantrasyonundaki artışla birlikte artmış, böylece adsorpsiyon sürecinin başlangıç konsantrasyonuna nasıl bağlı olduğunu göstermiştir. Boya moleküllerinin Ghassoul üzerindeki yüzey bölgeleri için güçlü bir afiniteye (tutunmaya) sahip olası, adsorpsiyon izotermelerindeki ilk dik yükselen kısmı (ilk 30 dakika) ile gözlenmiştir. Adsorpsiyon kapasitesi 300 mg/g civarında oldukça yüksek bir değere ulaşmıştır (Elass vd. 2010:153).

Karim'in grubu (2017:1082) tarafından Fas kili (Morocco) üzerine adsorpsiyon yoluyla bazik kırmızı 46 (BR46) boyasının sulu çözeltiden uzaklaştırılması araştırılmış, adsorpsiyonun 20 dakika içinde toplam kapasitenin %95'ine ulaştığını ortaya koymuşlardır. Boya giderimi eklenen kil miktarı ile artmış ve maksimum boya giderimi 40 mg/g olarak elde edilmiştir. Adsorpsiyon bölgelerinin sayısı, adsorban yüzey alanındaki artış ve daha fazla adsorpsiyon bölgesinin mevcudiyeti nedeniyle adsorban kütlesi arttıkça artmıştır. Bununla birlikte, adsorban miktarındaki daha fazla artış, giderim (adsorpsiyon) kapasitesini önemli ölçüde etkilememiştir. Başlangıçtaki adsorpsiyon oranı daha yüksek başlangıç boya konsantrasyonu için daha yüksektir, çünkü kütle transferi itici gücü arttıkça boya tutulmasına karşı direnç azalmıştır. Ham kil için sıfır yük noktasındaki pH 9,5'tir ve BR46'nın adsorpsiyon kapasitesi bu pH değerinden itibaren önemli ölçüde artmıştır. Kil yüzeyindeki yük değerinin geniş bir pH aralığında (9,5-12) negatif kaldığını, yani bazik çözeltide negatif yüklü kil yüzeyinin BR46 adsorpsiyonunu desteklediğini göstermektedir. Bu nedenle, kil üzerine adsorbe edilen BR46 miktarı pH'ın düşmesiyle azalmış, bu da 9,5'in altındaki pH'larda pozitif yüklü yüzey ile pozitif yüklü boya molekülleri arasındaki elektrostatik itmeye bağlanmıştır. Ayrıca, BR46'nın asidik pH'larda daha düşük adsorpsiyonu, adsorpsiyon bölgeleri için boya kanyonlarıyla rekabet eden fazla H⁺ iyonlarının varlığından kaynaklanıyor olabilir (Karim vd 2017:1082).

Rehman ve arkadaşları (2013:54) tarafından yapılan bir çalışmada kırmızı kilin kimyasal karakterizasyonu, pH 6,8'de sıfır yük noktasına sahip olduğunu göstermiştir (Rehman vd., 2013:54). Boya adsorpsiyonunun çözeltinin pH'ına bağlı olduğu iyi bilinmektedir çünkü adsorbanın yüzey yükü ve adsorplanan molekülün iyonlaşma derecesi ile fonksiyonel grupların ayrışma derecesi çeşitli pH'larda farklılık göstermektedir (Nandi vd., 2009:583; Ghaedi vd., 2011:226). Brilliant Green (BG) boyasının kırmızı kil tarafından adsorpsiyonu nötral pH'da daha yüksek olmuştur. Ancak, en yüksek adsorpsiyon verimi (%97) ve adsorpsiyon kapasitesi (121 mg/g) pH 7'de kaydedilmiştir. Yüksek pH'da kırmızı kil yüzeylerinde yük nötralizasyonu

meydana gelmekte ve bu da BG'nin adsorpsiyonunu arttırmaktadır (Ghaedi vd., 2011:226). $pH > 7$ 'de önemli bir adsorpsiyon olmamıştır. Nandi ve diğerleri (2009:583) ile Shirsath ve diğerleri (2013:914) de $pH 7$ 'de BG'nin kaolin kili tarafından adsorpsiyonunu incelemiş ve aynı sonuçları bulmuşlardır. Ancak, $pH \leq 4$ 'teki yüksek BG adsorpsiyon kapasitesi (108,4 mg/g), BG boya adsorpsiyonunun sadece elektrostatik çekimden kaynaklanmadığını ortaya koymuştur (Nandi vd., 2009:583; Shirsath vd., 2013:914).

Çeşitli çalışmalarda kullanılan sepiolit farklı mineralojik bileşime sahiptir ve elektro kinetik ölçümler için kil minerali hazırlama yöntemleri farklılık göstermektedir, bu nedenle sepiolit kili üzerine yapılan adsorpsiyonlarda çözeltinin pH değişiminin etkisi, geniş bir değer aralığı görülmektedir. Adsorban malzemelerin yüzey yükleri, adsorplanan molekülün iyonlaşma derecesi üzerindeki etkisi nedeniyle genellikle pH 'tan etkilenir. $pH 7,9$ 'dan düşük olduğunda, sepiolit yüzeyi, yüzey fonksiyonel gruplarının protonlanması nedeniyle pozitif yüklüdür ve $pH 7,9$ 'dan yüksek olduğunda, sepiolit yüzey gruplarının dehidroksilasyonu nedeniyle yüzey negatif yüklüdür. Asidik koşullarda, H^+ mevcut adsorpsiyon bölgeleri için pozitif yüklü boya molekülleriyle rekabet eder, dolayısıyla giderim verimliliği düşer. pH arttıkça, sepiolit kilinin negatif yüklü yüzeyi ile katyonik Safranin molekülleri arasındaki elektrostatik çekim nedeniyle giderim veriminde de bir artış olmaktadır (Fayazi vd., 2015:675).

Anirudhan ve Ramachandran (2015:215), bentonit kilini modifiye etmek için katyonik bir yüzey aktif madde olarak hexadecyltrimethylammonium chloride (HDTMA) kullanmıştır (Anirudhan ve Ramachandran, 2015:215). Hazırlanan organo bentonit kil daha sonra bazik boya giderimi kristal viyole (CV), Metilen Mavisi (MB) ve Rhodamine B (RB) için adsorpsiyon davranışı açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, modifiye kilin seçilen tüm boyaların giderilmesi için daha iyi adsorpsiyon kapasitesi gösterdiğini ortaya koymuştur. pH değişiminin adsorpsiyon sürecinde önemli bir rol oynadığı, ayrıca boyaların gideriminin başlangıçtaki boya konsantrasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur. Organo bentonitin adsorpsiyon verimliliği beklendiği gibi modifiye edilmemiş bentonitten daha yüksektir. Sonuçlar ayrıca organokilin MB, CV ve RB adsorpsiyonu için doğal bentonitten sırasıyla 1,6, 1,7 ve 1,75 kat daha etkili olduğunu göstermiştir, çünkü modifikasyondan sonra kilin gözenekliliği artmıştır. Yazarlar adsorpsiyon sürecinin mekanizmasını adsorpsiyon/partisyon modeline bağlamışlardır. Bu çalışma temel olarak bize kilin yüzey aktif madde modifikasyonunun adsorpsiyon kapasitelerini artırabileceğini göstermiştir. (Anirudhan ve Ramachandran, 2015:215; Zhu ve Chen, 2000:2997).

Chinoune ve arkadaşları (2016:64) tarafından yapılan bir çalışmada, etkili bir brusit kaplı bentonit sentezlenmiş ve sudan anyonik boya gideriminde değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, bentonit

kilinin brusit ($Mg_3(OH)_6$) ile kaplanmasının reaktif boyaların giderimini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Çözelti pH' nın 5 olduğu değerde, reaktif boyalar esas olarak anyonlar olarak mevcuttur ve negatif yüklü oldukları için montmorillonit yüzeyleri tarafından itilmeleri muhtemeldir. Brusit kaplı bentonit daha polar asidik Si-O- grupları ve organik bileşiklerle reaksiyona girme eğilimi olan bazik $Mg(OH)_2$ bölgeleri içerir, çünkü bunlar diğer birkaç fonksiyonel gruba ek olarak polardır. Modifiye edilmiş bentonitin boyaları giderime işlemi için, kil üzerinde bulunan OH iyonları arasında van der Waals ve π - π etkileşimlerinin gerçekleştiğini göstermiştir. Maksimum boya giderimi pH 2'de elde edilmiştir. Bu durum katyonik boya molekülleri ile negatif yüklü Brusit kaplı bentonit yüzeyleri arasındaki elektrostatik etkileşimin bir sonucu olabilir (Chinoune vd., 2016:64).

Özcan ve arkadaşları (2004:301) tarafından bentonit üzerine yapılan bir başka çalışmada, doğal bentonit yüzeylerinin elektrik yükleri ve hidrofilik yüzey yapısı nedeniyle hidrofobik organik bileşikler gidermede daha az etkili olduğunu öne sürülmüştür. Doğal bentonit büyük moleküllü organik katyonlarla modifiye edilerek, Dodesiltrimetilamonyum bromür ile modifiye edilmiş bentonit (DTMA bentonit) üretilebileceğini ve böylece hidrofobik kirleticileri sudan uzaklaştırma kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilirliğini öne sürmüşlerdir. Bulguların Na-bentonit ile karşılaştırılması, doğal malzemelerden sentezlenen Na-bentonit ve DTMA bentonitin asit mavi 193'ü boyasını sulu çözeltiden giderebileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, DTMA bentoniti doğal bentonitten daha büyük bir giderim kapasitesi sergilemiştir. Ayrıca Özcan ve arkadaşları (2005:73) tarafından, asit mavisi 193 boyasının, yüzey aktif madde benziltrimetilamonyum (BTMA) klorür kullanılarak bentonitin modifiye edilmesiyle hazırlanan adsorban tarafından, etkili bir şekilde adsorbe edildiği bulunmuştur. Özcan ve arkadaşları (2007:173) tarafından, reaktif mavi 19'un sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş bentonit (DTMA- bentonit) kullanmıştır. Asidik çözeltilerde (pH yaklaşık 1,5 olduğu) DTMA-bentonit için adsorpsiyon kapasitesinin Na-bentonitten yaklaşık 3 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum, bentonitin adsorpsiyon bölgesi ile anyonik boyalar arasında elektrostatik etkileşimlerin meydana geldiğini göstermiştir (Özcan vd 2004:301; Özcan vd., 2005:73; Özcan vd., 2007:173).

ÇÖZELTİ İYON ŞİDDETİNİN ETKİSİ

İyonik şiddet, adsorpsiyon deneylerinde araştırılması gereken önemli bir parametredir çünkü endüstriyel atık suların her zaman inorganik tuzlar gibi kirleticileri de içerdikleri iyi bilinmektedir. Bu tür tuzların çözeltide bulunması, tüm adsorpsiyon sürecini büyük ölçüde etkileyen yüksek iyonik şiddete yol açar (Anirudhan ve Ramachandran, 2007:276; Anirudhan ve Ramachandran, 2015:215). Genellikle, NaCl, KCl ve $CaCl_2$ gibi tuzların konsantrasyonundaki değişim, asidik boyaların adsorpsiyonu üzerinde kayda

değer bir etkiye sahiptir. Çoğu zaman, NaCl boyama işlemini başlatmak için kullanılır. Akl ve arkadaşları (2013:1) tarafından doğal bentonit ve yüzey aktif madde ile modifiye edilmiş bentonit kullanılarak bir asit boya olan Kongo Kırmızısının uzaklaştırılmasını değerlendirmek için yapılan bir çalışmada, tuzların sırayla eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir: $\text{NaCl} < \text{KCl} < \text{CaCl}_2$ (Akl vd., 2013:1). Çözeltideki iyonik şiddet artışı, adsorbent üzerindeki dağınık çift tabakanın sıkışmasına neden olarak elektrostatik çekimi ve dolayısıyla adsorpsiyon sürecini kolaylaştırabilir (Li vd., 2013:2610; Peng vd., 2013:81).

Kamal ve arkadaşları (2014:523) polimer/kil kompozit hidrojellerinin kristal viyoleye (CV) karşı adsorpsiyon özelliklerini araştırmışlardır. Bulgular, adsorbanın adsorpsiyon kapasitelerinin artan NaCl konsantrasyonu ile azaldığını göstermektedir. Bu bulgular aynı zamanda, Bayramoğlu ve arkadaşları (2009:339) tarafından da rapor edilenleri de desteklemektedir (Bayramoğlu ve ark., 2009:339). Genel olarak, NaCl ilavesiyle iyonik şiddet arttıkça, aşırı Na^+ iyonları negatif yüklü adsorban yüzeylerini perdeleyerek elektrostatik çekim kuvvetinin azalmasına yol açabilir ve sonuç olarak katyonik boya adsorpsiyonu azalır. Yazarlar, NaCl ilavesinin bu tür hazırlanmış hidrojellerin boya adsorpsiyonu için performansını bozduğu sonucuna varmışlardır (Akl vd., 2013:1; Kamal vd., 2014:523). Fil ve arkadaşları (2014:171), montmorillonit kullanarak elektrolit konsantrasyonlarının Astrazon Red Violet (ARV) (basic violet 16), giderimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Yukarıda bahsedilen ve farklı Cl tuzları kullanan araştırmacıların aksine, Fil ve arkadaşları farklı molar konsantrasyonlarda NaCl çözeltileri kullanmışlardır. ARV'nin montmorillonit yüzeyine adsorpsiyonu sulu çözeltilerdeki NaCl'den olumsuz etkilenmiştir. NaCl konsantrasyonunun artması, adsorpsiyon kapasitesini azaltmıştır. Bu eğilimin olası bir açıklaması, iyonik şiddet arttıkça adsorplanan moleküllü ile adsorban yüzeyi arasındaki elektrostatik çekimin azalması ve sonuç olarak giderim veriminin düşmesidir. Sonuçta, artan çözelti iyon şiddeti, süspansiyonun nihai pH'ını da düşürmektedir (Fil vd., 2014:171). Sonuç olarak, montmorillonit yüzeyinde pozitif iyonlar artar, yükler arasındaki elektrostatik etkileşimleri perdeler ve adsorpsiyonu azaltır (Doğan vd., 2009:1142; Weng vd., 2009:417). Endüstriyel atık sular her zaman inorganik tuzlar gibi çeşitli katkı maddeleri ile kirlendiğinden, bu iyonların boya çözeltilerinin adsorpsiyon özelliği üzerindeki etkisini incelemek önemlidir. Tuzların adsorpsiyon süreci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir.

Bilgiç (2005:33; 2008:363) deneyler, iyonik şiddetin metilen mavisi (MB) adsorpsiyonu için bentonit ve sepiolit killerinin adsorpsiyon kapasiteleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 0 ila 0,5 arasında değişen farklı iyonik şiddet değerlerine sahip farklı çözeltiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İyonik kuvvet OH^- , H_3O^+ ve özellikle adsorblanabilir boya iyonlarının aktivite katsayılarını etkilemektedir. Çözeltideki artan iyonik şiddet, MB'nin killer üzerine adsorpsiyonunda bir azalmaya neden olmaktadır. Adsorban yüzeyi ile

adsorbalanan boya iyonları arasında elektrostatik çekim olduğunda artan iyon şiddeti adsorpsiyon kapasitesini azaltmıştır (Bilgiç, 2005:33; Bilgiç, 2008:363; Pengthamkeerati vd., 2008:1149; Al-Degs vd., 2008:16). Bu durum, bentonit üzerindeki pozitif yüklü bölgelerin sayısının arttığı anlamına gelir. Bu nedenle, boyaların bentonit üzerindeki adsorpsiyon kapasitesi azalır. Ayrıca tuz, oksit yüzeyinin ve boya moleküllerinin zıt değişimlerinin elektrostatik etkileşimini perdeleyeceğinden, adsorplanan miktar da KCl konsantrasyonunun artmasıyla azalacaktır (Alkan vd., 2007:388).

SONUÇ

Son zamanlarda, boyaların üretiminde ve kullanımında bir artış olduğundan dolayı çevre kirliliğinde bir artışa neden olduğu açıktır. Boyaların giderilmesinde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Adsorpsiyonun diğer teknolojilere göre daha etkili ve daha ucuz olduğu düşünülmektedir. Kil mineralleri, yapılarındaki bazı atomların farklı değerlikteki diğer atomlarla izomorf olarak yer değiştirmesinden kaynaklanan bir yük taşır. Killer, kafes yapılarında aşırı negatif yüke sahiptir ve bentonit türü killer bir alüminat tabakasını kaplayan iki silikat tabakasına sahip üç katmanlı bir yapı ile karakterize edilirler. Bu durum, tetrahedral Si'nin üç değerlikli Al ile kısmi olarak yer değiştirmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve üç değerlikli Al'ın iki değerlikli Ca ile yer değiştirmesine yol açmaktadır. Zıt yükler birbirini çektiğinden, kilin negatif yüklü yüzey kafesi katyonik boya için bir afiniteye sahip olabilir. Bu nedenle, kilin katyonik boyaları gidermek için daha büyük bir kapasite sergilemesi beklenebilir. Katyonik boyaları sulu ortamdan uzaklaştırmak için şişen killerin kullanıldığı kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Kil minerallerinin yük yoğunlukları, adsorpsiyon işlemlerinde killerin uygulanmasında önemlidir. Bir kilin tamamen ayrışıp ayrışmaması, mevcut ara katman katyonlarına ve katman yüküne bağlıdır. Doğal killerin katyonlarla doyurulmasının, su çözeltilerinden boyaların uzaklaştırılması için adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı bulunmuştur.

Katyonik boyalar çoğunlukla tekstil, kağıt, kauçuk, plastik, deri, kozmetik, ilaç ve gıda endüstrileri tarafından kullanılan yaygın bir boyalardır. Katyonik boyalar molekül yapılarında pozitif iyonların bulunması nedeniyle, bazik boyalar olarak da adlandırılmaktadır. Kil süspansiyonlarında boyanın adsorpsiyonu, kil yüzey özelliklerinden oldukça etkilenir. Adsorban üzerindeki yüzey yükü, boya çözeltisinin pH'ı ve iyonik şiddeti, bir adsorbanın boya iyonlarına karşı kapasitesini etkilemede önemli bir rol oynamaktadır.

Genel olarak gözlemlenen, boya çözeltisindeki pH'daki artışın yüzeydeki pozitif yükleri azalttığı ve böylece negatif yüklü bölgeleri arttırdığıdır. Kil üzerindeki negatif yüklü yüzeyler, elektrostatik çekim nedeniyle katyonik boya moleküllerinin giderimini destekleyecektir. Asidik koşullarda elektrostatik itme nedeniyle boya adsorpsiyonunda bir azalma olur

çünkü protonlanmış adsorban yüzeyi katyonik boya moleküllerini iter. Ancak katyonik boya molekülleri kil yüzeyleri için çok daha yüksek afiniteye sahiptir ve kil süspansiyonlarına eklendiğinde kolayca adsorbe edilebilirler. Bunun nedeni kil katmanlarının önemli bir özelliğinin negatif yüklü olması ve bu negatif yükün normalde katyonik boyalar tarafından dengelenmesidir. Sonuç olarak, kil yüzeyinde pozitif iyonlar artar, yükler arasındaki elektrostatik etkileşimleri perdeler ve adsorpsiyonu azaltır. Katyonik ve anyonik boya adsorpsiyonu güçlü bir şekilde çözelti pH'ına bağlıdır. Katyonik boya adsorpsiyonu pH yükseldikçe, anyonik boya adsorpsiyonu ise düşük pH aralıklarında iyileşir.

İyonik güç, adsorpsiyon deneylerinde araştırılması gereken önemli bir parametredir çünkü endüstriyel atık suların her zaman inorganik tuzlar gibi kirleticilere sahip olduğu iyi bilinmektedir. Bu tür tuzların çözeltide bulunması, tüm adsorpsiyon sürecini büyük ölçüde etkileyen yüksek iyonik şiddete yol açar. Genel olarak, NaCl ilavesiyle iyonik şiddet arttıkça, aşırı Na^+ iyonları negatif yüklü adsorban yüzeylerini perdeleyerek elektrostatik çekim kuvvetinin azalmasına yol açabilir ve sonuç olarak boya adsorpsiyonu azalır. Genel olarak, iyonik şiddet arttıkça adsorplanan boya moleküllü ile adsorban yüzeyi arasındaki elektrostatik çekim azalır ve sonuç olarak giderim verimliliği düşer. Sonuçta, artan çözelti iyonik şiddeti, süspansiyonun nihai pH'ını da düşürür. Çözeltinin iyonik şiddeti arttıkça killerin adsorpsiyon kapasitesi azalmıştır.

REFERANSLAR

- Abd El-Latif, M. M., El-Kady, M. F., Ibrahim, A. M., ve Ossman M. E. (2010). Alginate/polyvinyl alcohol-kaolin composite for removal of methylene blue from aqueous solution in a batch stirred tank reactor. *J Am Sci.* 6(5), 280–292.
- Adeyemo, A. A., Adeoye, I. O., ve Bello, O. S. (2017). Adsorption of dyes using different types of clay: a review. *Appl Water Sci.* 7, 543-568.
- Ahmad, R., ve Kumar, R. (2010). Adsorption studies of hazardous malachite green onto treated ginger waste. *J. Environ. Manage.*, 91, 1032-1038.
- Akl M. A., Youssef, A. M., ve Al-Awadhi, M. M. (2013). Adsorption of acid dyes onto bentonite and surfactant-modified bentonite. *J. Anal. Bioanal. Tech.* 4(4), 1-10.
- Al-Bastaki, N., ve Banat, F. (2004). Combining ultrafiltration and adsorption on bentonite in a one-step process for the treatment of colored waters. *Resour. Conser. Recycl.* 41(2), 103–113.
- Al-Degs, Y. S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H., ve Walker, G. M. (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon, *Dyes Pigments* 77(1), 16-23.
- Al-Futaisi, A., Jamrah, A., ve Ai-Hanai, R. (2007). Aspects of cationic dye molecule adsorption to palygorskite. *Desalination* 214 (1-3), 327-342.
- Al-Ghouti, M. A., Khraisheh, M., Allen, S. J., ve Ahmad, M. N. (2003). The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and

- adsorption mechanisms of diatomaceous earth, *J. Environ. Manage.* 69(3), 229–238.
- Alkan, M., Demirbaş, Ö., Çelikçapa, S., ve Doğan, M. (2004). Sorption of acid red 57 from aqueous solutions onto sepiolite. *J. Hazardous Mater.* 116(1-2), 135–145.
- Alkan, M., Çelikçapa, S., Demirbaş, Ö., ve Doğan, M. (2005). Removal of reactive blue 221 and acid blue 62 anionic dyes from aqueous solutions by sepiolite. *Dyes Pigments* 65(3), 251–259.
- Alkan, M., Demirbaş, Ö., ve Doğan, M. (2007). Adsorption kinetics and thermodynamics of an anionic dye onto sepiolite, *Micropor. Mesopor. Mater.* 101(3), 388–396.
- Almeida, C. A. P., Debacher, N. A., Downs, A. J., Cottet, L., ve Mello, C. A. D. (2009). Removal of methylene blue from coloured effluents by adsorption on montmorillonite clay, *J. Colloid Int. Sci.* 332(1), 46–53.
- Almeida, C. A. P., Zanela, T. M. P., Machado C., Flores, J. A. A., Scheibe, L. F., Hankins, N. P., ve Debacher, N. A. (2016). Removal of methylene blue by adsorption on aluminosilicate waste: equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters, *Water Sci. Technol.*, 74(10), 2437–2445.
- Anirudhan, T. S., ve Ramachandran, M. (2007). Surfactant-modified bentonite as adsorbent for the removal of humic acid from wastewaters. *Appl. Clay Sci.* 35(3-4), 276–281.
- Anirudhan, T. S., ve Ramachandran, M. (2015). Adsorptive removal of basic dyes from aqueous solutions by surfactant modified halloysite clay (organoclay): kinetic and competitive adsorption isotherm. *Process Saf. Environ. Prot.* 95, 215–225.
- Armağan, B., Özdemir, Ö., Turan, M., ve Çelik, M.S. (2003). Adsorption of negatively charged azo dyes onto surfactant-modified sepiolite. *J. Environ. Eng. ASCE* 129(8), 709–715.
- Atar, N., ve Olgun, A. (2009). Removal of basic and acid dyes from aqueous solutions by a waste containing boron impurity, *Desalination* 249(1), 109–115.
- Atun, G., Hisarlı, G., Sheldrick, W. S., ve Muhler, M. (2003). Adsorptive removal of methylene blue from colored effluents on fuller's earth. *J. Colloid Int. Sci.* 261, 32–39.
- Attia, A. A., Rashwan, W. E., ve Khedr, S. A. (2006). Capacity of activated carbon in the removal of acid dyes subsequent to its thermal treatment, *J. Dyes Pig.* 69(3), 128–136.
- Babel S., ve Kurniawan T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *J Hazard Mater.* 97(1), 219–243.
- Bagane, M., ve Guiza, S. (2000). Removal of a dye from textile effluents by adsorption, *Ann. Chim. Sci. Mater.* 25(8), 615–626.
- Bayramoğlu, G., Altıntaş, B., ve Arıca, M. Y. (2009). Adsorption kinetics and thermodynamic parameters of cationic dyes from aqueous solutions by using a new strong cation-exchange resin. *Chem. Eng. J.* 152(2-3), 339–346.
- Bellir, K., Bencheikh-Lehocine, M., ve Meniai, A. H. (2010). Removal of methylene blue from aqueous solutions using an acid activated Algerian bentonite: equilibrium and kinetic studies. *Int Renew Energy Congr.* November 5–7, Sousse, Tunisia, 2010, 360–367.
- Bilgiç, C. (2005). Investigation of the factors affecting organic cation adsorption on some silicate minerals, *J. Colloid Int. Sci.* 281, 33–38.

- Bilgiç, C. (2008). Investigation of the factors affecting the removal of an acid dye from aqueous solution by adsorption using bentonite and sepiolite, *Adsorption Science and Technology*, 26, 363–372.
- Bouberka, Z., Kacha, S., Kameche, M., Elmaleh, S., ve Derriche, Z. (2005). Sorption study of an acid dye from an aqueous solutions using modified clays. *J. Hazard. Mater.*, 119(1-3), 117-124.
- Chinoune, K., Bentale, K., Bouberka, Z., Nadim, A., ve Maschke, U. (2016). Adsorption of reactive dyes from aqueous solution by dirty bentonite. *Appl. Clay Sci.* 123, 64-75.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresour Technol.*, 97(9), 1061–1085.
- Dawood, S., ve Sen, T. (2014). Review on dye removal from its aqueous solution into alternative cost effective and non-conventional adsorbents. *J. Chem. Process Eng.* 1, 104.
- Doğan, M., Karaoğlu, M. H., ve Alkan, M. (2009). Adsorption kinetics of maxilon yellow 4GL and maxilon red GRL dyes on kaolinite. *J. Hazard. Mater* 165(1-3), 1142-1151.
- Egloffstein, T.A. (2001). Natural bentonites-influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(7), 427-444.
- Ehssan, D. J., Shaymaa, H. K., ve Hussein, A. N. (2011). A thermodynamic study of adsorption of some dyes on Iraqi bentonite modified clay. *Eur J Sci Res* 60, 63–70.
- Elass, K., Laachach, A., Alaoui, A., ve Azzi, M. (2010). Removal of methylene blue from aqueous solution using ghassoul, a low-cost adsorbent. *Appl Ecol Environ Res.*, 8, 153–163.
- El Boujaady, H., El Rhilassi, A., Bennani-Ziatni, M., El Hamri, R., Taitai, A., ve Lacout, J. L. (2011). Removal of textile dye by adsorption on synthetic calcium phosphate, *Desalination*, 275(1-3), 10–16.
- Elmoubarki, R., Mahjoubi, F.Z., Tounsadi, H., Moustadraf, J., Abdennouri, M., Zouhri, A., ElAlban, A., ve Barka, N. (2015). Adsorption of textile dyes on raw and decanted Moroccan clays: kinetics, equilibrium and thermodynamics. *Water Resour. Industry* 9, 16-29.
- El Qada, E. N., Allen, S. J., ve Walker, G. M. (2008). Adsorption of basic dyes from aqueous solution onto activated carbons, *Chem. Eng. J.* 135, 174–184.
- Eren, E. (2010). Adsorption performance and mechanism in binding of azo dye by raw bentonite. *Clean Soil Air Water* 38, 758-763.
- Errais, E., Duplay, J., Elhabiri, M., Khodja, M., ve Ocampo, R. (2012). Anionic RR120 dye adsorption onto raw clay: surface properties and adsorption mechanism. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 403(5), 69-78.
- Espantaleon, A.G., Nieto, J.A., Fernandez, M., ve Marsal, A. (2003). Use of activated clays in the removal of dyes and surfactants from tannery waste waters. *Appl. Clay Sci.* 24(1-2), 105–110.
- Fayazi, M., Afzali, D., Taher, M. A., Mostafavi, A., ve Gupta, V. K. (2015). Removal of Safranin dye from aqueous solution using magnetic mesoporous clay: optimization study. *J. Mol. Liq.* 212, 675-685.
- Fil, B. A., Yılmaz, M. T., Bayar, S., ve Elkoca, M. T. (2014). Investigation of adsorption of the dyestuff astrazon red violet 3rn (basic violet 16) on montmorillonite clay, *Braz.J. Chem. Eng.* 31 (1), 171-182.

- Fu, J., Xin, Q., Wu, X., Chen, Z., Yan, Y., Liu, S., Wang, M., ve Xu, Q. (2016). Selective adsorption and separation of organic dyes from aqueous solution on polydopamine microspheres, *J. Colloid Interf. Sci.*, 461, 292-304.
- Ghaedi, M., Hossainian, H., Montazerohori, M., Shokrollahi, A., Shojapour, F., Soylak, M., ve Purkait, M.K. (2011). A novel acorn based adsorbent for the removal of brilliant green. *Desalination* 281, 226-233.
- Ghosh, D., ve Bhattacharyya, K. G. (2002). Adsorption of methylene blue on kaolinite, *Applied Clay Science*, 20(6), 295–300.
- Ghosh, R. K., ve Reddy, D. D. (2014). Crop residue ashes as adsorbents for basic dye (methylene blue) removal: adsorption kinetics and dynamics. *Clean. Soil Air Water* 42 (8), 1098-1105.
- Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York.
- Gupta, V. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *J Environ Manage.*, 90(8), 2313–2342.
- Gürses, A., Karaca, S., Doğar, Ç., Bayrak, R., Açıkıldız, M., ve Yalçın, M. (2004). Determination of adsorptive properties of clay/water system: methylene blue sorption. *J. Colloid Int. Sci.* 269(2), 310–314.
- Hai, Y., Li, X., Wu, H., Zhao, S., Deligeer, W., ve Asuha, S. (2015). Modification of acidactivated kaolinite with TiO₂ and its use for the removal of azo dyes. *Appl. Clay Sci.* 114, 558-567.
- Hajjaji, W., Pullar, R.C., Labrincha, J.A., ve Rocha, F. (2016). Aqueous Acid Orange 7 dye removal by clay and red mud mixes. *Appl. Clay Sci.* 126, 197-206.
- Hamdaoui O. (2006). Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick, *J Hazard Mater.*, 2006, Jul 31;135(1-3):264-273
- Han, Z. X., Zhu, Z., Wu, D. D., Wu, J., ve Liu, Y. R. (2014). Adsorption kinetics and thermodynamics of acid blue 25 and methylene blue dye solutions on natural sepiolite. *Synth. React. Inorg. Met.* 44, 140-147.
- Hang, P. T., ve Brindley, G. V. (1970). Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVIII), *Clays Clay Minerals*, 18, 203-212.
- Harris, R. G., Wells, J. D., ve Johnson, B. B. (2001). Selective adsorption of dyes and other organic molecules to kaolinite and oxide surfaces. *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 180(1-2), 131–140.
- Heinz, H., Vaia, R. A., Krishnamoorti, R., ve Farmer, B. L. (2007). Self-assembly of alkylammonium chains on montmorillonite: effect of chain length, head group structure, and cation exchange capacity. *Chem. Mater* 19, 59-68.
- Ho, Y. S., Chiang, C. C., ve Hsu, Y. C. (2001). Sorption kinetics for dye removal from aqueous solution using activated clay. *Sep. Sci. Technol.* 36(1), 2473–2488.
- Jeng-Shiou, W., Chia-Hung, L., KH, C., ve Suen, S. (2008). Removal of cationic dye methyl violet 2B from water by cation exchange membranes. *J Memb Sci.*, 309(1-2), 239–245.
- Kamal, H., El-Sayed, A. H., Sabaa, M. W., Maher, El-Dessouky M., ve Mohamed, M. M. (2014). Adsorption properties of PVA/PAA/clay composite hydrogel synthesized by Gamma radiation and its application in removal of crystal violet dye from its aqueous solution. *J Nucl. Technol Appl Sci.* 2 (5), 523-537.
- Karim, A. B., Mounir, B., Hachkar, M., Bakasse, M., ve Yaacoubi, A. (2017). Adsorption/desorption behavior of cationic dyes on Moroccan clay:

- equilibrium and mechanism. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(3), 1082-1096.
- Kavitha, D., ve Namasivayam, C. (2007). Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by coir pith carbon. *Bioresour. Technol* 98(1), 14-21.
- Krysztalkiewicz, A., Binkowski, S., ve Jesionowski, T. (2002). Adsorption of dyes on a silica surface. *Appl Surf Sci.*, 199(1), 31–39.
- Labanda, J., Sabate, J., ve Llorens, J. (2009). Modeling of the Dynamic Adsorption of an Anionic Dye Through Ion-Exchange Membrane Adsorber. *J Memb Sci.*, 340(1-2), 234–240.
- Lazaridis, N. K., Karapantsios, T. D., ve Geogantas, D. (2003). Kinetic analysis for the removal of a reactive dye from aqueous solution onto hydrotalcite by adsorption. *Water Res.* 37(12), 3023–3033.
- Leechart, P., Nakbanpote, W., ve Thiravetyan, P. (2009). Application of ‘waste’ wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye, *J. Environ. Manage.* 90(2), 912–920.
- Li, Z., Chang, P. H., Jiang, W. T., Jean, J. S., ve Hong, H. (2011). Mechanism of methylene blue removal from water by swelling clays. *Chem. Eng. J.* 168(3), 1193-1200.
- Li, M., Yao, J., Lin, B., Yang, X., Zhang, L., ve Lei, L. (2013). Pentachlorophenol sorption in the cetyltrimethylammonium bromide/bentonite one-step process in single and multiple solute systems. *J. Chem. Eng. Data* 58(9), 2610-2615.
- Lian, L., Guo, L., ve Guo, C. (2009). Adsorption of Congo red from aqueous solutions onto Ca-bentonite. *J Hazard Mater* 161(1), 126–131
- Liu, C. H., Wu, J. S., Chiu, H. C., Suen, S. Y., ve Chu, K. H. (2007). Removal of anionic reactive dyes from water using anion exchange membranes as adsorbers. *Water Res.* 41(7), 1491–1500.
- Liu, P., ve Zhang, L. (2007). Adsorption of dyes from aqueous solutions of suspensions with clay nano-adsorbents. *Sep. Purif. Technol.* 58(1), 32-39.
- Miyamoto, N., Kawai, R., Kuroda, K., ve Ogawa, M. (2000). Adsorption and aggregation of a cationic cyanine dye on layered clay minerals. *Appl. Clay Sci.* 16, 161-170.
- Mohammed, M. A., Shitu, A., ve Ibrahim, A. (2014). Removal of methylene blue using low cost adsorbent: a review, *Res. J. Chem. Sci.* 4(1), 91–102.
- Mu, B., ve Wang, A. (2016). Adsorption of dyes onto palygorskite and its composites: a review. *J. Environ. Chem. Eng.* 4(1), 1274-1294.
- Nandi, B., Goswami, A., ve Purkait, M. (2009). Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: kinetic and equilibrium studies. *Appl Clay Sci.* 42(3–4), 583–590.
- Neumann, M. G., Gessner, F., Schmitt, C. C., ve Sartori, R. (2002). Influence of the layer charge and clay particle size on the interactions between the cationic dye methylene blue and clays in an aqueous suspension. *J. Colloid Int. Sci.* 255(2), 254–259.
- Ngulube, T., Gumbo, J. R., Masindi, V., ve Maity, A. (2017). An update on synthetic dyes adsorption onto clay based minerals: A state-of-art review, *J. Environ. Manag.* 191, 35-57.
- Nwokem, N. C., Nwokem, C. O., Ayuba, A. A., Usman, Y. O., Odjobo, B. O., Ocholi, O. J., Batari, M. L., ve Osunlaja, A. A. (2012). Evaluation of adsorptive

- capacity of natural and burnt kaolinitic clay for removal of Congo red dye. *Arch Appl Sci Res* 4, 939–946.
- Ogawa, M., Kawai, R., ve Kuroda, K. (1996). Adsorption and aggregation of a cationic cyanine dye on smectites. *J. Phys. Chem.* 100(4), 16218–16221.
- Orthman, J., Zhu, H. Y., ve Lu, G. Q. (2003). Use of anion clay hydrotalcite to remove coloured organics from aqueous solutions. *Sep. Purif. Technol.* 31(1), 53–59.
- Özcan, A. S., ve Özcan, A. (2004). Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite. *J. Colloid Interface Sci.* 276(1), 39–46.
- Özcan, A. S., Erdem, B., ve Özcan, A. (2004). Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite. *J. Colloid Interface Sci.* 280, 44–54.
- Özcan, A. S., Tetik, Ş., ve Özcan, A. (2004). Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto sepiolite. *Sep. Sci. Technol.* 39(2), 301–320.
- Özcan, A., ve Özcan, A. S. (2005). Adsorption of Acid Red 57 from aqueous solutions onto surfactant-modified sepiolite. *J. Hazard. Mater.* 125(1-3), 252–259.
- Özcan, A. S., Erdem, B., ve Özcan, A. (2005). Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto BTMA-bentonite. *Colloids Surf., A* 266(1-3), 73–81.
- Özcan, A., Öncü, E.M., ve Özcan, A. S. (2006a). Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto DEDMA-sepiolite. *J. Hazard. Mater.* 129(1-3), 244–252.
- Özcan, A., Öncü, E.M., ve Özcan, A. S. (2006b). Kinetics, isotherm and thermodynamic studies of adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto natural sepiolite. *Colloids Surf., A* 277(1-3), 90–97.
- Özcan, A., Ömeroğlu, C., Erdoğan, Y., ve Özcan, A. S. (2007). Modification of bentonite with a cationic surfactant: an adsorption study of textile dye Reactive Blue 19. *J. Hazard. Mater.* 140(1-2), 173–179.
- Özdemir, Ö., Armağan, B., Turan, M., ve Çelik, M. S. (2004). Comparison of the adsorption characteristics of azo-reactive dyes on mezoporous minerals. *Dyes Pigments* 62(1), 49–60.
- Pala, A., ve Tokat, E. (2002). Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. *Water Res.* 36, 2920–2925.
- Peng, Y. G., Chen, D. J., Ji, J. L., Kong, Y., Wan, H. X., ve Yao, C. (2013). Chitosan-modified palygorskite: preparation, characterization and reactive dye removal. *Appl. Clay Sci.* 74, 81–86.
- Pengthamkeerati, P., Satapanajaru, T., ve Singchan, O. (2008). Sorption of reactive dye from aqueous solution on biomass fly ash, *J. Hazard. Mater.* 153(3), 1149–1156.
- Qin, Q., Ma, J., ve Liu, K. (2009), Adsorption of anionic dyes on ammonium-functionalized MCM-41, *J. Hazard. Mater.*, 162(1), 133–139.
- Raghu, S., ve Ahmed Basha, C. (2007). Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *J. Hazard. Mater.* 149(2), 324–330.
- Rehman, M. S. U., Munir, M., Ashfaq, M., Rashid, N., Nazar, M. F., Danish M., ve Han J. I. (2013). Adsorption of Brilliant Green dye from aqueous solution onto red clay. *Chem. Eng. J.* 228, 54–62.
- Rouliia, M., ve Vassiliadis, A. A. (2008). Sorption characterization of a cationic dye retained by clays and perlite. *Micropor. Mesopor. Mater.* 116 (1-3), 732–740.

- Rytwo, G., Tropp, D., ve Serban, C. (2002). Adsorption of diquat, paraquat and methyl green on sepiolite: experimental results and model calculations. *Appl. Clay Sci.* 20(6), 273–282.
- Santos, S. C. R., Vilar, V. J. P., ve Boaventura, R. A. R. (2008). Waste metal hydroxide sludge as adsorbent for a reactive dye. *J. Hazard. Mater.* 153(3), 999–1008.
- Santos, S. C. R., ve Boaventura, R. A. R. (2016). Adsorption of cationic and anionic azo dyes on sepiolite clay: equilibrium and kinetic studies in batch mode. *J. Environ. Chem. Eng.* 4(2), 1473–1483.
- Santos, S. C. R., Oliveira, A. F. M., ve Boaventura, R. A. R. (2016). Bentonitic clay as adsorbent for the decolourisation of dyehouse effluents. *J. Clean. Prod.* 126, 667–676.
- Sarma, G. K., Gupta, S. S., ve Bhattacharyya, K. G. (2016). Adsorption of Crystal violet on raw and acid-treated montmorillonite, K10, in aqueous suspension. *J. Environ. Manag.* 171, 1–10.
- Shawabkeh, R. A., ve Tutunji, M. F. (2003). Experimental study and modelling of basic dye sorption by diatomaceous clay. *Appl. Clay Sci.* 24(1-2), 111–120.
- Shen, Y. H., 2001. Preparation of Organobentonite Using Nonionic Surfactants. *Chemosphere*, 44(5), 989–995.
- Shen, D., Fan, J., Zhou, W., Gao, B., Yue, Q., ve Kang, Q. (2009). Adsorption kinetics and isotherm of anionic dyes onto organo-bentonite from single and multisolute systems, *J. Hazard. Mater.* 172(1), 99–107.
- Shirsath, S.R., Patil, A.P., Patil, R., Naik, J.B., Gogate, P.R., ve Sonawane, S.H. (2013). Removal of Brilliant Green from wastewater using conventional and ultrasonically prepared poly (acrylic acid) hydrogel loaded with kaolin clay: a comparative study. *Ultrason. Sonochem.* 20(3), 914–923.
- Spark, K. M., Wells, J. D., ve Johnson, B. B. (1995). Characterizing trace metal adsorption on kaolinite. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 633–640.
- Srinivasan, A., ve Viraraghavan T. (2010). Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: a review. *J Environ Manage.* 91(10):1915–1929.
- Suraj, G., Iyer, C. S. P., Rugmini, S., ve Lalithambika, M. (1998). Adsorption of cadmium and copper by modified kaolinites. *Appl. Clay Sci.* 13(4), 293–306.
- Tabak, A., Eren, E., Afşin, B., ve Çağlar, B. (2009). Determination of adsorptive properties of a Turkish Sepiolite for removal of Reactive Blue 15 anionic dye from aqueous solutions. *J. Hazard. Mater* 161(2-3), 1087–1094.
- Tahir, S. S., ve Naseem, R. (2006). Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay. *Chemosphere* 63(11), 1842–1848.
- Tomar, V., Prasad, S., ve Kumar, D. (2014). Adsorptive removal of fluoride from aqueous media using citrus limonum (lemon) leaf. *Microchem. J.* 112, 97–103.
- Toor M., ve Jin B. (2012). Adsorption characteristics, isotherm, kinetics, and diffusion of modified natural bentonite for removing diazo dye. *Chem Eng J* 187, 79–88.
- Vimonses, V., Lei, S., Jin, B., Chow, C. W. K., ve Saint, C. (2009). Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo red adsorption by clay materials. *Chem. Eng. J.* 148(2-3), 354–364.
- Wang, C. C., Juang, L. C., Hsu, T. C., Lee, C. K., Lee, J. F., ve Huang, F. C. (2004). Adsorption of basic dyes onto montmorillonite. *J. Colloid Int. Sci.* 273(1), 80–86.

- Wang, L., ve Wang, A. (2007). Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite. *J. Hazard. Mater.* 147(3), 979–985.
- Weng, C. H., Lin, Y. T., ve Tzeng, T. W. (2009). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pineapple leaf powder. *J. Hazard. Mater* 170(1), 417–424.
- Worch, E. (2012). Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes and modelling. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston.
- Wu, J. S., Liu, C. H., Chu, K. H., ve Suen, S. Y. (2008). Removal of cationic dye methyl violet 2B from water by cation exchange membranes. *J. Membr. Sci.* 309, 239–245.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., ve Ang, H. (2012). Equilibrium, kinetics, and thermodynamics of methylene blue adsorption by pine tree leaves. *Water Air Soil Pollut.* 223(8), 5267–5282.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., ve Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review, *Adv in Colloid and Interf Sci*, 209, 172–184.
- Yan, L., Qin, L., Yu, H., Li, S., Shan, R., ve Du, B. (2015). Adsorption of acid dyes from aqueous solution by CTMAB modified bentonite: kinetic and isotherm modelling. *J. Mol. Liq.* 211, 1074–1081.
- Yaneva, Z. L., ve Georgieva, N. V. (2012). Insights into Congo Red Adsorption on Agro-Industrial Materials-Spectral, Equilibrium, Kinetic, Thermodynamic, Dynamic and Desorption Studies. A Review. *International Review of Chemical Engineering.* 4(2), 127–146.
- Yu, X., Wei, C., ve Wu, H. (2015). Effect of molecular structure on the adsorption behavior of cationic dyes onto natural vermiculite. *Sep. Purif. Technol.* 156(2), 489–495.
- Zhang, Z. H., Zhu, H. J., Zhou, C. H., ve Wang, H. (2016). Geopolymer from kaolin in China: an overview. *Appl. Clay Sci.* 119(1), 31–41.
- Zhu, L. Z., ve Chen, B. L. (2000). Sorption behavior of p-nitrophenol on the interface between anionecationic organobentonite and water. *Environ. Sci. Technol.* 34(14), 2997–3002.

Avrupa Birliği Ülkelerinin Döngüsel Ekonomi Analizi

Emirhan Ersin KARACA ¹

Esra Kurt TEKEZ ²

- 1- Emirhan Ersin KARACA; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü. emirhan.karaca@ogr.sakarya.edu.tr ORCID No: 0009-0006-3048-7237
- 2- Doç.Dr. Esra Kurt TEKEZ.; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü. etekez@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0429-5593

ÖZET

Döngüsel ekonomi, israfın önlenerek kaynakların verimli kullanılmasına odaklanmaktadır. Kullanılan kaynakların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı yoluyla yeniden katma değer üretebilecek şekilde sisteme katılmaları çevre ve ekonomi alanlarında yarar sağlar. Avrupa Birliği'nin döngüsel ekonomiye geçişle sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ulaşılabilirliğin sağlanması beklenmektedir. Avrupa Birliği'ne (AB) üye ülkelerin döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde performanslarının hangi durumda olduklarının bilinmesi, AB'nin döngüsel ekonomi vizyonuna ulaşmadaki katkılarının artırılabilmesi için önemli olacaktır. Bu nedenle bu çalışma Avrupa Birliği ülkelerinin döngüsel ekonomiye geçiş sürecinin verimlilik analizini yapmayı amaçlar. Çalışmada Avrupa Birliği'ne üye ülkelerin döngüsel ekonomi verimlilikleri entropi ve EATWOS teknikleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilir. Çalışmada kullanılan döngüsel ekonomi göstergeleri ile ilgili değerler Avrupa Birliği'nin Eurostat internet sitesinde yayınlanan verilerden alınmıştır ve 2019 yılı verileriyle AB üye 28 ülkeyi kapsamaktadır. Çalışmanın sonucunda verimlilik puanı yüksek ülkeler sırasıyla Slovenya, Belçika, Hollanda, Avusturya, Litvanya şeklinde sıralanırken; puanı düşük ülkeler olarak Malta, Kıbrıs, İrlanda ve Romanya görülmüştür. Elde edilen bulgular bazı ülkelerin sürece daha iyi uyum sağlarken bazılarının ise zorlandığını işaret etmektedir. Ülkelerin döngüsel ekonomi performansındaki bu değerlendirme, iyi uygulama örneklerinin belirlenmesine ve paylaşılarak artmasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler – döngüsel ekonomi, verimlilik, performans, entropi, EATWOS

GİRİŞ

Yaşamda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri kaynakların kıtlığıdır. Bununla birlikte üretilen atık miktarındaki artış da dikkat çekmektedir. Bu nedenle kaynakların daha verimli kullanılması ihtiyacı doğmaktadır.

Döngüsel ekonomi tüketimle birlikte oluşan atıkların geri dönüştürülerek üretime yeniden kazandırılmasını amaçlamaktadır. Böylece birincil hammadde kullanımından da tasarruf sağlanarak daha az doğal kaynak kullanımı sağlanır. Döngüsel ekonomi, kaynak kıtlığı ve atık bertaraf sorunlarının üstesinden gelmeyi amaçlayan bir stratejidir (Homrich vd. 2018:525). Buradan hareketle; döngüsel ekonomi, doğal kaynak tüketimini azaltmayı, daha etkin kaynak kullanımını arttırmayı ve üretim süreci sonunda minimum atık ortaya çıkmasını hedefleyen bir yaklaşımdır (Singh ve Ordonez, 2016: 342). Bu ise kaynakların daha etkili ve kapalı devre bir sistem içinde kullanılması için süreçlerin yeniden düşünülmesi gerekliliğini ortaya koyar (Morone ve Yılan, 2020:17). Umut verici döngüsel ekonomi stratejileri, maliyetler ve atık azaltma açısından faydaları nedeniyle yeniden kullanım

(reuse) - geri dönüşüm (recycle) - yeniden üretim (remanufacturing) şeklinde ifade edilen 3R süreçlerinde, atık yönetimi ve malzeme ve enerji verimliliği alanlarında belirlenmiştir (Taddei vd., 2022:19). Döngüsel ekonomi yaklaşımını benimseyen toplumlar için; kaynak kıtlığına karşı korunma, daha verimli üretim ve tüketim, atık yönetiminin optimizasyonu, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik gibi önemli faydalar sağlanabilmektedir.

Avrupa Komisyonu, döngüsel ekonomiye geçişi kolaylaştırmak için Aralık 2015'te atıkla ilgili revize edilmiş yasal düzenleme teklifleri ile birlikte kapsamlı bir döngüsel ekonomi eylem planını içeren döngüsel ekonomi paketini ortaya koydu (EC, 2019). Bu eylem planında döngüsel ekonomi, atık üretiminin en aza indirilerek, ekonomide bulunan tüm kaynakların değerlerinin olabildiğince uzun süre devam ettirildiği bir sistem olarak tanımlanır.

Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ürün yaşam döngüsündeki tüm aşamaları ele almak ve döngüsel ekonominin "döngüsünü kapatmak" için atıkların üretilmesi, yönetilebilmesi ve döngüsel malzeme kullanım alanlarında önlemler belirledi (EC, 2019). Plan, tüm döngüyü kapsayan aşağıdaki gibi önlemler içermektedir.

- Daha dayanıklı veya onarımı, yükseltmesi veya yeniden üretimi daha kolay ürünler için; özellikle elektrikli ve elektronik ürünlere vurgu yapılarak; ürün tasarımı yapabilmek
- Kaynakların daha verimli kullanılmasına yönelik üretim süreçlerinin yönetimini sağlayabilmek
- Tüketicilerin erişebildiği bilgileri iyileştirmek için, örneğin çevresel ayak izleri, enerji verimliliği etiketleme, onarım ve yedek parça bulunabilirliği ve yeterli ekonomik sinyalleri sağlamak için vergilendirme tasarımı;
- Yüksek kaliteli geri dönüşümü artırmak veya atığı çöplüğe atmak yerine enerji içeriğini geri kazanmak için atık yönetimi
- İkincil hammaddeleri pazara yeniden sokmak ve suyun yeniden kullanımını iyileştirmek için atık-kaynak bağlantısı geliştirebilmek

Eylem Planı ayrıca, plastikler, gıda atıkları, kritik ham maddeler, inşaat ve yıkım, gibi belirli sektörlerde veya malzemelere yönelik bir dizi önlemler de içermektedir. 2018'de, bu ilk önlemler seti, aşağıdakileri içeren ikinci Döngüsel Ekonomi Paketi ile tamamlandı (EC, 2019):

- Plastikler için AB stratejisi; plastik ambalajların geri dönüştürülebilir olmasının 2030 yılına kadar sağlanabilmesi;
- Döngüsel ekonomi için göstergeleri izleme çerçevesi;
- Geri dönüştürülmüş malzemeler ve yan ürünler için tanımların ve hesaplama yöntemlerinin basitleştirilmesi, uyumlu hale getirilmesi ve yasal statünün açıklığa kavuşturulması;
- Biyolojik atık, tehlikeli atık, inşaat atıkları gibi atıkların ayrı toplama konusunda güçlendirilmiş kurallar ve yeni yükümlülükler

- Gıda atığı ve kritik hammaddeler içeren ürünler dahil olmak üzere atık önleme ve atık yönetimi önlemlerinin güçlendirilmesi.

Avrupa Birliği (AB) toplumunun döngüsel ekonomi uygulamalarında öncü olması beklenmektedir. Birlik içinde belirlenen hedeflere ülkelerin ne kadar yaklaşabildikleri, döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde hangi düzeyde olduklarının bilinmesi ve AB'nin döngüsel ekonomi vizyonuna katkı verme düzeylerinin arttırılabilmesi için önemlidir. Bu bağlamda bu çalışma Avrupa Birliği ülkelerinin döngüsel ekonomiye geçiş sürecinin verimlilik analizini yapmayı amaçlar. Böylelikle ülkelerin bu süreçteki yolculukları hakkında karşılaştırmalı öngörü elde edebilmek ve iyi uygulama örneklerinin artmasına rehberlik etmede yardımcıdır.

Literatürde AB üye ülkelerin döngüsel ekonomi performanslarını dikkate alan çalışmalar incelendiğinde, genellikle atık yönetimi ve sosyal faktörler ile değerlendirildiği, ancak üretim ve tüketim göstergeleri ile analiz eden çalışmaların ise az sayıda olduğu görülmüştür. Buna ilaveten literatürde AB ülkelerinin döngüsel ekonomi performansı analizinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniklerinden faydalanan çalışmaların da sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu çalışma hem girdi göstergeleri olarak belediye atığı ile ambalaj atığı üretimlerini değerlendirmeye alarak hem de analiz için ÇKKV tekniklerini kullanarak literatüre katkı sağlar. Buna ilaveten, literatürdeki çalışmalarda kullanılan tekniklerden farklı olarak, bu çalışma Entropi ve EATWOS tekniklerini kullanır. Entropi yöntemi ile belirlenen göstergelerin döngüsel ekonomi verimliliği üzerindeki farklı önem düzeylerini belirler. EATWOS yöntemi ile AB ülkelerinin döngüsel ekonomi verimlilik değerlerini hesaplar.

Çalışma, literatür taraması ile devam eder. Devamında sırasıyla çalışmada kullanılan yöntemler ve analiz sırasında elde edilen bulgulara yer verilir. Çalışmanın sonuç kısmında, yapılan uygulamanın bulguları ışığında AB üye ülkelerin döngüsel ekonomiye geçişteki durumları değerlendirilmektedir.

LİTERATÜR TARAMASI

Döngüsel ekonomiye geçişin öneminin artması ile birlikte AB ülkelerinde döngüsel ekonomi çalışmalarında da artış eğilimi görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Škrinjaric (2020) 2010-2016 yılları arasındaki verilerle AB ülkelerinin döngüsel ekonomi performansını gri ilişkisel analiz yöntemini kullanarak değerlendirdi. Çalışmada enerji geri kazanımı, kişi başına geri dönüştürülmüş malzeme, döngüsel ekonomiye katkıda bulunan istihdam, toplam çalışanların yüzdesi, döngüsel malzeme kullanım oranı ve geri dönüşümle ve ikincil ham maddelerle ilgili patent sayısı gibi göstergeler kullanılmıştır. Çalışmada performanslarına göre ülkelerin kümeleme analizi yapıldı. Buna ilaveten performansı iyi ülkelerin performansına eğitim, ar-ge, ekonomik büyüme, alt

yapı gibi sosyo-ekonomik faktörlerin de performansa etkisi olduğu ifade edildi. Benzer olarak 2010-2016 yılları arasındaki dönemi Fura ve diğerleri (2020) 28 AB ülkesinin döngüsel ekonomi seviyesini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Analiz, döngüsel ekonominin alanlarını kapsayan Eurostat göstergeleri kullanılarak yapılmıştır. Her alan, döngüsel ekonomi seviyesini belirlemek için geliştirilen genel sentetik ölçünün bir bileşenidir. Benelüks ülkelerinin yüksek döngüsel ekonomi ilerleme seviyelerinin olduğu görülmüştür. Gelecekteki uyumunu değerlendirmek için eski ve yeni AB ülkelerini değerlendirmişlerdir. Marino ve Pariso (2020) 2006-2016 döneminde 28 AB üye devletinin performanslarını analiz etmişlerdir. Döngüsel ekonomiye geçiş için ülkelerin "azaltma, yeniden kullanma, geri dönüştürme" faaliyetlerindeki performanslarını ölçtüler. Çalışmaları kapsamında; çevresel boyutta üretilen belediye atığı, üretilen gıda atığı, belediye atığı geri dönüşüm oranı göstergelerini; ekonomik boyutta yurtiçi malzeme tüketimi, geri dönüştürülebilir hammaddelerin pazar oranı, üretim malzemesi yeniden kullanım oranı göstergelerini ve sosyo-ekonomik boyutta da döngüsel ekonomiyle ilgili patentler, uygulanan en iyi uygulamalar göstergelerini kullanmışlardır. Robaina ve diğerleri (2020) çalışmalarında, 26 Avrupa ülkesinin verimliliğini 2006-2016 dönemi için, çok yönlü verimlilik analizine dayanan metodoloji ile ve plastikler için atık üretimi ve geri dönüşümünü dikkate alarak, döngüsel ekonomi bağlamında tahmin etmektedirler. Çalışılan dönemde en verimli ülkeleri belirlemenin yanı sıra, sonuçlar, çoğu ülke için verimliliğin zamanla arttığını ve birçok ülkenin çalışma döneminin sonunda ve özellikle 2016'da tam verimliliğe ulaştığını göstermektedir. Çıktı analizi, ülkeler arasındaki verimlilik farkının toplam atık veya emisyonların azaltılmasında değil, daha ziyade ekonomik büyümenin döngüsel bir şekilde iyileştirilmesinde ve bunun anlamı ise geri kazandıran ve dönüştüren faaliyetleri ile beraber gayri safi yurt içi hasılanın iyileştirilmesinde olduğunu göstermektedir. Bu sonuçların plastiklerin daha verimli ve döngüsel kullanımına yönelik politikalar tasarlamak için yararlı olabileceğini ifade ettiler.

Üsas ve diğerleri (2021), AB ülkelerinde 2016'da döngüsel ekonominin gelişimini incelediler. Bunun için geri dönüşüm ve malzeme döngüsellliği ile ilgili göstergelere odaklanarak TOPSIS, PROMETHEE II ve ELECTRE I yöntemlerini içeren bir çerçeve sundular. Sonuçlar, küçük ülkelerin ve yeni AB üye devletlerinin en düşük performans gösterenler arasında olduğunu göstermektedir. Almanya, İsveç ve Hollanda, döngüsel ekonomi gelişimi anlamında en ileri olanlar olarak görünmektedir. Yılmaz (2022), 2016 ve 2018 yıllarına ait gösterge değerleri ile Avrupa Birliğine üye 28 ülkenin döngüsel ekonomi performanslarını veri zarflama analizi kullanarak karşılaştırmıştır. Çalışmasında atık üretimini ve geri dönüşümünü gösteren değişkenler kullanmıştır. Candan ve Toklu (2022) AB üye ülkelerin 2014-2018 dönemi için döngüsel ekonomi performanslarını SMART ve CODAS yöntemlerini kullanarak değerlendirdiler. Çalışmalarının sonucunda, döngüsel ekonomi

verimliliğine göre ilk beş ülkeyi Hollanda, Lüksemburg, Belçika, Fransa ve Almanya olarak belirlediler.

Kaya ve diğerleri (2023), döngüsel ekonomi stratejilerinin sosyal etkisi açısından, benzer sosyal etki seviyelerine sahip 27 AB üyesini gruplamak için k-ortalamalar kümeleme analizini kullandılar. Ardından sosyal faktörleri dikkate alarak CRITIC, MARCOS ve MEREC yöntemlerini kullanmışlardır. Son çözümlere göre, ilk kümede en düşük işsizlik ve yolsuzluk oranlarına sahip Batı Avrupa ülkeleri ve bu kısımda Hollanda en iyi performansa sahip ülke olarak görünmekte. İkinci küme, 20 ila 64 yaş arasındaki üniversite mezunlarını takip eden en düşük istihdam oranlarına sahip ülkeleri içeriyor ve Hırvatistan bu kümedeki en iyi sosyal performansa sahip ülke olarak görünmekte. En yüksek gelir dağılımına ve işsizlik oranına sahip ülkeler ise üçüncü kümede yer alıyor ve bu gruptaki en iyi ülke Litvanya olarak tespit edilmiş. Özkaya (2024), geri dönüşüm, döngüsel malzemelerin kullanımı, malzeme verimliliği ve atıkların toplu yönetimi gibi göstergeleri kullanarak ÇKKV teknikleri ile AB ülkelerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirdi. Değerlendirmede göstergeler kaynakların sürdürülebilirliğinin sağlanması, sosyal davranış ve operasyonel işler olarak gruplandı. Çalışmada CRITIC, MAUT ve COPRAS karar verme tekniklerine ek olarak veri madenciliği yöntemi olan küme analizi de kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarında Danimarka, Lüksemburg, Finlandiya, Avusturya, İsveç, Birleşik Krallık ve Almanya diğer uluslardan olumlu farklılık gösterdiği görüldü.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma AB üye ülkelerin döngüsel ekonomi yaklaşımını uygulamadaki verimlilik analizi için entropi ve EATWOS yöntemlerini entegre eder. Entropi yönteminden değerlendirmede kullanılacak göstergelerin döngüsel ekonomi performansına olan etki düzeylerini belirlemek amacıyla faydalanıldı. AB ülkelerinin döngüsel ekonomi verimlilik değerleri EATWOS yöntemi ile hesaplanır. Çalışmada kullanılan döngüsel ekonomi performans göstergeleri ile ilgili veriler Eurostat (2023) veri tabanından alınmıştır.

Entropi Yöntemi

Bu çalışmada değerlendirme yapmak için kullanılan performans göstergeleri Entropi yöntemi ile ağırlıklandırılır. Shannon ve Weaver (1947), enformasyondaki belirsizliğin bir ölçüsü olarak entropi kavramını önerdiler. Wang ve Lee (2009) Shannon'ın entropi kavramını, ağırlıklandırma hesaplama yöntemi olarak entropi ölçüsünü kullanacak şekilde genişlettiler. Entropi ağırlığı, farklı alternatiflerin belirli bir özellik açısından birbirine ne kadar yaklaştığını tanımlayan bir parametredir. Entropi değeri ne kadar büyükse, entropi ağırlığı o kadar küçük olur (Wang ve Lee,2009:8982). Entropi yöntemi, objektif bir ağırlıklandırma yöntemidir, karar vericilerin subjektif değerlendirmelerine ihtiyaç duymaz ve mevcut verileri dikkate

olarak hesaplamalar yapar. Entropi yöntemi aşağıdaki adımları içerir (Wang ve Lee, 2009: 8982; Shemshadi vd., 2011: 12162; Liu vd., 2019:31):

1. Her kriterin normalize edilmiş değeri bulunur.

m adet alternatifi n adet kriteri bulunan bir karar matrisinde i. alternatifi j. Kriter için P_{ij} normalize edilmiş değeri aşağıdaki gibi hesaplanır. Bir kriterin normalize edilmiş değeri, o kriterin değerinin tüm alternatiflerdeki o kriterin değerlerinin toplamına bölünmesiyle bulunur.

$$P(i, j) = \frac{x(i, j)}{\sum_{i=1}^m x(i, j)}; \forall j \quad (1)$$

2. Her kriter için E_j entropi değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n P(i, j) \ln P(i, j) \quad \text{ve } k = 1 / \ln(m) \quad (2)$$

3. Her bir kriter için ıraksaklık derecesi D_j bulunur. D_j değeri kriterin içsel kontrast yoğunluğunu temsil eder ve ne kadar yüksekse, kriter o kadar önemlidir.

$$D_j = 1 - E_j \quad (3)$$

4. Her bir kriter için entropi ağırlıkları hesaplanır. Kriterin D_j değerinin, tüm kriterlerin D_j değerlerinin toplamına oranlanmasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (4)$$

EATWOS Yöntemi

EATWOS (Efficiency Analysis Technique with Output Satisficing) Peters ve Zelewski (2006) tarafından önerilen bir verimlilik analizi tekniğidir. Giriş değerleri göz önüne alındığında, seçilen çıktılar için karşılaştırmalı sonuçlar verebilen bir tekniktir. EATWOS yönteminin çalışma aşamaları aşağıda verilmiştir (Peters ve Zelewski, 2006:3; Peters vd., 2012:306):

1. Girdiler ve çıktıların olduğu karar matrisi elemanları aşağıdaki gibi normalize edilir.

$$s(i, j) = \frac{x(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x^2(i, j)}}; \forall j \quad (5)$$

$$r(i, j) = \frac{y(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y^2(i, j)}}; \forall j \quad (6)$$

Sırasıyla $s(i, j)$, girdilerin ve $r(i, j)$ çıktılarının normalize değerini gösterir.

2. Girdi ve çıktı faktörleri için uzaklık ölçülerinin belirlenmesi: Öncelikle girdi faktörlerinin her sütununun en küçük değeri belirlenir. Devamında girdi uzaklık ölçüsü ip_{ik} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$s_k^* = \min\{\overline{s_k}\}; \forall k = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$ip_{ik} = 1 + (s_{ik} - s_k^*); \forall i = 1, \dots, k \text{ ve } \forall k = 1, \dots, j \quad (8)$$

Çıktılar için her bir sütunda en büyük çıktı değeri belirlenir. Devamında çıktılar için uzaklık ölçüsü op_{ij} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$r_j^* = \max\{\vec{r}_j\}; \forall j = 1, \dots, j \quad (9)$$

$$op_{ij} = 1 - (r_j^* - r(i, j)); \forall i = 1, \dots, i \text{ ve } \forall j = 1, \dots, j \quad (10)$$

3. Verimlilik hesaplanması: Elde edilen uzaklık ölçüleri girdi ve çıktı faktörlerinin belirlenen ağırlıkları ile çarpılarak uzaklık ölçüleri ağırlıklandırılır. İlgili kriterde ağırlıklandırılmış çıktı mesafe ölçülerinin toplamının, ağırlıklandırılmış girdi mesafe ölçülerinin toplamına oranı ilgili kriterin performans puanını verir.

$$Ej = \frac{\sum_i^j v_j * op_{ij}}{\sum_i^k w_k * ip_{ik}} \quad (11)$$

Burada v_j , çıktı değişkeninin ilgili kriterinin ağırlığı iken w_k ise girdi değişkeninin ilgili kriterinin ağırlığıdır.

BULGULAR

Bu çalışmada, Entropi ve EATWOS tekniklerinden faydalanılarak Avrupa Birliği'ne üye ülkeler döngüsel ekonomi göstergeleri üzerinden değerlendirilmektedir. Girdi göstergeleri; yıllık kişi başına düşen belediye atığı üretimi ve yıllık kişi başına düşen ambalaj atığı üretimidir. Çıktı göstergeleri ise; belediye atıklarının yıllık geri dönüşüm oranı, ambalaj türüne göre ambalaj atıklarının yıllık geri dönüşüm oranı ve ayrı toplanan elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşüm oranıdır. Bunlar aşağıdaki gibi açıklanmaktadır:

G1:Yıllık kişi başına düşen belediye atığı üretimi (kg): Gösterge, belediyelerin topladığı ve atık yönetim sistemi kullanılarak bertaraf edilen atıkları ölçmektedir. Büyük oranda hanelerden kaynaklanan atıklardan oluşsa da ticaret, ofis ve kamusal hizmetin verildiği alanların atıkları da buna dahil olabilir.

G2:Yıllık kişi başına düşen ambalaj atığı üretimi (kg): Ambalaj, ham maddeden işlenmiş mallara kadar, üreticiden tüketiciye kadar malların depolanması, korunması, taşıma ve teslim edilmesi için kullanılan malzemelerden yapılmış ürünleri tanımlar.

C1:Belediye atıklarının yıllık geri dönüşüm oranı (%): Gösterge, belediye atıklarındaki geri dönüştürülmüş miktarın belediyelerdeki atık üretiminin toplam miktarı içindeki payını ölçer.

C2: Ambalaj türüne göre ambalaj atıklarının yıllık geri dönüşüm oranı (%): Gösterge, geri dönüştürülmüş ambalaj atıklarının üretilen tüm ambalaj atıkları içindeki payı olarak tanımlanır. Ambalaj atıkları, üretim artıkları hariç olmak

üzere, üreticiden tüketiciye kadar, hammaddeden işlenmiş mallara kadar malların depolanması, korunması, taşıma, teslim edilmesi ve sunumu için kullanılan atık malzemeleri kapsar.

C3: Ayrı toplanan elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının geri dönüşüm oranı (%): Gösterge, geri dönüşüm/yeniden kullanıma hazırlama tesisine giren elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının ağırlığının ayrı olarak toplanan tüm elektrikli ve elektronik ekipman atıklarının ağırlığına bölünmesiyle hesaplanır.

Çalışmada kullanılan göstergelere ait veriler Eurostat web sitesinden alınmıştır ve Tablo 1 de gösterilmektedir. 2019 yılı verileriyle AB üye 28 ülkeyi kapsamaktadır. Çalışmada AB ülkelerinin belirlenen göstergeler üzerinden döngüsel ekonomi performansının analizi amaçlanmaktadır. Bu nedenle öncelikle performans göstergelerinin döngüsel ekonomi analizi üzerindeki önem düzeylerini bulabilmek için entropi yöntemi kullanılır.

Tablo 1: Avrupa Birliği Ülkelerinin Performans Göstergeleri

Avrupa Birliği Ülkeleri	Girdiler		Çıktılar		
	G1	G2	C1	C2	C3
Belçika	416	160,6	54,7	83,5	70,8
Bulgaristan	442	79,4	34,6	61,2	83
Çekya	500	125,0	33,3	71,2	92,6
Danimarka	844	169,1	51,5	70,4	83,7
Almanya	609	227,5	66,7	64	85,4
Estonya	369	157,6	30,8	66,2	80,6
İrlanda	625	227,9	37,4	62,5	84,9
Yunanistan	524	81,1	21,0	60,1	79
İspanya	472	170,0	38,0	69,6	79,7
Fransa	555	187,0	41,0	65,6	76,5
Hırvatistan	445	74,0	30,2	48,9	92,3
İtalya	503	215,6	51,4	69,6	82,2
Kıbrıs	648	92,3	16,6	66,8	81,4
Letonya	439	136,7	41,0	62,4	83
Litvanya	472	134,4	49,7	61,9	82,7
Lüksemburg	791	217,2	48,9	71,5	88,5
Macaristan	387	142,7	35,9	47	83,7
Malta	697	153,7	9,1	33,7	59,8
Hollanda	508	170,4	56,9	80,7	69,6
Avusturya	588	161,8	58,2	65,4	81,9
Polonya	336	172,1	34,1	55,5	82,4
Portekiz	513	172,2	28,9	62,8	78,5
Romanya	280	103,8	11,5	44,6	81,5
Slovenya	504	117,4	59,2	67,1	87,8
Slovakya	421	104,7	38,5	67,5	91,2
Finlandiya	566	131,4	43,5	70,6	87,8
İsveç	449	134,3	46,6	63,6	86,6

Birleşik Krallık	463	178,0	44,1	62,1	86,2
Toplam	14366	4197,9	1113,3	1776	2303,3

AB ülkelerinin ilgili göstergelere ait değerlerine eşitlik 1 uygulanarak Tablo 2’de sunulan normalize edilmiş karar matrisi ortaya çıkar.

Tablo 2: Entropi Yöntemi ile Normalize Karar Matrisi

	Girdiler		Çıktılar		
Avrupa Birliği Ülkeleri	G1	G2	C1	C2	C3
Belçika	0,0289572	0,038257	0,04913321	0,047016	0,030739
Bulgaristan	0,0307670	0,018914	0,03107877	0,034459	0,036035
Çekya	0,0348043	0,029777	0,02991108	0,04009	0,040203
Danimarka	0,0587498	0,040282	0,04625887	0,03964	0,036339
Almanya	0,0423917	0,054194	0,05991197	0,036036	0,037077
Estonya	0,0256856	0,037543	0,0276655	0,037275	0,034993
İrlanda	0,0435054	0,054289	0,03359382	0,035191	0,03686
Yunanistan	0,0364750	0,019319	0,01886284	0,03384	0,034299
İspanya	0,0328553	0,040496	0,03413276	0,039189	0,034603
Fransa	0,0386328	0,044546	0,03682745	0,036937	0,033213
Hırvatistan	0,0309759	0,017628	0,02712656	0,027534	0,040073
İtalya	0,0350132	0,051359	0,04616905	0,039189	0,035688
Kıbrıs	0,0451065	0,021987	0,01491063	0,037613	0,035341
Letonya	0,0305582	0,032564	0,03682745	0,035135	0,036035
Litvanya	0,0328553	0,032016	0,04464206	0,034854	0,035905
Lüksemburg	0,0550605	0,05174	0,04392347	0,040259	0,038423
Macaristan	0,0269386	0,033993	0,03224647	0,026464	0,036339
Malta	0,0485173	0,036614	0,0081739	0,018975	0,025963
Hollanda	0,0353612	0,040592	0,05110931	0,045439	0,030218
Avusturya	0,0409299	0,038543	0,05227701	0,036824	0,035558
Polonya	0,0233885	0,040997	0,03062966	0,03125	0,035775
Portekiz	0,0357093	0,041021	0,02595886	0,03536	0,034082
Romanya	0,0194904	0,024727	0,01032965	0,025113	0,035384
Slovenya	0,0350828	0,027966	0,05317524	0,037782	0,038119
Slovakya	0,0293053	0,024941	0,03458187	0,038007	0,039595
Finlandiya	0,0393985	0,031301	0,03907303	0,039752	0,038119
İsveç	0,0312543	0,031992	0,04185754	0,035811	0,037598
Birleşik Krallık	0,0322288	0,042402	0,03961196	0,034966	0,037425

Normalize edilmiş değerler üzerinden 2-3 eşitlikleri uygulanarak sırasıyla E_j ve D_j değerleri bulunur. İlgili girdi D_j değeri girdi D_j değerleri toplamına ve benzer olarak ilgili çıktı D_j değeri çıktı D_j değerleri toplamına oranlanarak herbir performans göstergesinin entropi ağırlıkları elde edilir ve Tablo 3’de gösterilir.

Tablo 3: Performans Göstergelerinin Entropi Değerleri

	Girdiler		Çıktılar		
	G1	G2	C1	C2	C3
Ej	0,9914047	0,987402	0,9788791	0,995915	0,998918
Dj	0,0085952	0,012598	0,0211208	0,004085	0,001082
Wj	0,4055692	0,594431	0,8034669	0,15539	0,041143

AB ülkelerinin Tablo 1’de gösterilen değerleri üzerinden 5-6 eşitlikleri uygulanarak Tablo 4’de sunulan normalize edilmiş karar matrisi ortaya çıkar.

Tablo 4: EATWOS Yöntemi ile Normalize Karar Matrisi

	GİRDİLER		ÇIKTILAR		
	G1	G2	C1	C2	C3
Avrupa Birliği Ülkeleri					
Belçika	0,1488816	0,194658	0,24509985	0,245679	0,16209376
Bulgaristan	0,1581867	0,096238	0,15503574	0,180066	0,19002517
Çekya	0,1789442	0,151509	0,1492107	0,209489	0,21200399
Danimarka	0,3020578	0,204961	0,23076129	0,207135	0,19162779
Almanya	0,2179540	0,275746	0,29886947	0,188305	0,19551988
Estonya	0,1320608	0,191022	0,13800869	0,194778	0,18453047
İrlanda	0,2236803	0,276231	0,16758198	0,183891	0,19437515
Yunanistan	0,1875335	0,098299	0,09409684	0,17683	0,18086733
İspanya	0,1689233	0,206052	0,17027046	0,204781	0,18246995
Fransa	0,1986281	0,226657	0,18371287	0,193012	0,17514368
Hırvatistan	0,1592603	0,089693	0,13532021	0,143877	0,21131715
İtalya	0,1800179	0,261322	0,23031321	0,204781	0,1881936
Kıbrıs	0,2319117	0,111874	0,07438131	0,196543	0,18636204
Letonya	0,1571130	0,165690	0,18371287	0,183597	0,19002517
Litvanya	0,1689233	0,162902	0,22269584	0,182126	0,18933833
Lüksemburg	0,2830897	0,263262	0,2191112	0,210372	0,2026172
Macaristan	0,1385028	0,172962	0,16086078	0,138286	0,19162779
Malta	0,2494482	0,186295	0,0407753	0,099154	0,1369097
Hollanda	0,1818073	0,206537	0,25495762	0,237441	0,15934641
Avusturya	0,2104384	0,196113	0,26078266	0,192424	0,18750677
Polonya	0,1202505	0,208597	0,15279534	0,163296	0,1886515
Portekiz	0,1835967	0,208718	0,12949517	0,184774	0,1797226
Romanya	0,1002087	0,125813	0,05152922	0,131225	0,18659098
Slovenya	0,1803757	0,142297	0,26526346	0,197426	0,20101458
Slovakya	0,1506710	0,126904	0,17251087	0,198603	0,20879874
Finlandiya	0,2025648	0,159266	0,19491487	0,207724	0,20101458
İsveç	0,1606919	0,162781	0,20880536	0,187128	0,19826723
Birleşik Krallık	0,1657023	0,215748	0,19760335	0,182714	0,19735144

Normalize edilmiş değerlere 7-10 arasındaki eşitlikler uygulanarak girdi ve çıktı değişkenlerinin uzaklık ölçüleri hesaplanır ve Tablo 5’de gösterilir.

Tablo 5: Performans Göstergelerinin Uzaklık Ölçüleri

Avrupa Birliği Ülkeleri	G1	G2	C1	C2	C3
Belçika	1,0486728	1,0984203	0,9462303	1	0,9500897
Bulgaristan	1,0579779	1	0,8561662	0,934388	0,9780211
Çekya	1,0787354	1,0552705	0,8503412	0,96381	1
Danimarka	1,2018491	1,1087229	0,9318918	0,961456	0,9796238
Almanya	1,1177453	1,179508	1	0,942626	0,9835158
Estonya	1,0318520	1,0947841	0,839139	0,949099	0,9725264
İrlanda	1,1234715	1,1799928	0,8687125	0,938212	0,9823711
Yunanistan	1,0873247	1,0020605	0,7952273	0,931151	0,9688633
İspanya	1,0687145	1,1098138	0,8714009	0,959103	0,9704659
Fransa	1,0984193	1,1304190	0,8848434	0,947334	0,9631397
Hrvatistan	1,0590516	0,9934548	0,8364507	0,898198	0,9993131
İtalya	1,0798091	1,1650843	0,9314437	0,959103	0,9761896
Kıbrıs	1,1317029	1,0156357	0,7755118	0,950864	0,9743580
Letonya	1,0569042	1,0694517	0,8848434	0,937918	0,9780211
Litvanya	1,0687145	1,0666640	0,9238263	0,936447	0,9773343
Lüksemburg	1,1828810	1,1670236	0,9202417	0,964693	0,9906132
Macaristan	1,0382940	1,0767242	0,8619913	0,892607	0,9796238
Malta	1,1492395	1,0900570	0,7419058	0,853475	0,9249057
Hollanda	1,0815985	1,1102986	0,9560881	0,991762	0,9473424
Avusturya	1,1102296	1,0998748	0,9619131	0,946745	0,9755027
Polonya	1,0200417	1,1123591	0,8539258	0,917617	0,9766475
Portekiz	1,0833880	1,1124803	0,8306257	0,939095	0,9677186
Romanya	1	1,0295745	0,7526597	0,885546	0,974587
Slovenya	1,0801670	1,0460587	0,9663939	0,951747	0,9890105
Slovakya	1,0504622	1,0306654	0,8736413	0,952924	0,9967947
Finlandiya	1,1023561	1,0630277	0,8960454	0,962045	0,9890105
İsveç	1,0604831	1,0665428	0,9099358	0,941449	0,9862632
Birleşik Krallık	1,0654935	1,1195103	0,8987338	0,937036	0,9853474

Herbir değişkenin elde edilen uzaklık ölçüsü ile Tablo 3’de görülen ağırlık değerleri (w_j) ile çarpılarak ağırlıklandırılır. Eşitlik 11 uygulanarak hesaplanan verimlilik değerleri Tablo 6’ da gösterilir. Elde edilen sonuçlara göre Slovenya en iyi verimlilik değerini gösterirken, Malta’da en düşük değer görülmüştür.

Tablo 6: AB Üye Ülkelerin Verimlilik Değerleri

<i>Avrupa Birliği Ülkeleri</i>	<i>Verimlilik</i>	<i>Sıra ma</i>	<i>Avrupa Birliği Ülkeleri</i>	<i>Verimlilik</i>	<i>Sıra ma</i>
<i>Slovenya</i>	<i>0,910516</i>	<i>1</i>	<i>Macaristan</i>	<i>0,821371</i>	<i>15</i>
<i>Belçika</i>	<i>0,885462</i>	<i>2</i>	<i>Çekya</i>	<i>0,820944</i>	<i>16</i>
<i>Hollanda</i>	<i>0,87495</i>	<i>3</i>	<i>Danimarka</i>	<i>0,81854</i>	<i>17</i>
<i>Avusturya</i>	<i>0,869611</i>	<i>4</i>	<i>İspanya</i>	<i>0,813346</i>	<i>18</i>
<i>Litvanya</i>	<i>0,869314</i>	<i>5</i>	<i>Polonya</i>	<i>0,808315</i>	<i>19</i>
<i>İsveç</i>	<i>0,862688</i>	<i>6</i>	<i>Estonya</i>	<i>0,805897</i>	<i>20</i>
<i>Almanya</i>	<i>0,857897</i>	<i>7</i>	<i>Fransa</i>	<i>0,803421</i>	<i>21</i>
<i>Slovakya</i>	<i>0,857835</i>	<i>8</i>	<i>Yunanistan</i>	<i>0,794385</i>	<i>22</i>
<i>Bulgaristan</i>	<i>0,853271</i>	<i>9</i>	<i>Lüksemburg</i>	<i>0,792569</i>	<i>23</i>
<i>Finlandiya</i>	<i>0,843507</i>	<i>10</i>	<i>Portekiz</i>	<i>0,775085</i>	<i>24</i>
<i>Letonya</i>	<i>0,842687</i>	<i>11</i>	<i>Romanya</i>	<i>0,768922</i>	<i>25</i>
<i>Hırvatistan</i>	<i>0,835977</i>	<i>12</i>	<i>İrlanda</i>	<i>0,764162</i>	<i>26</i>
<i>İtalya</i>	<i>0,829353</i>	<i>13</i>	<i>Kıbrıs</i>	<i>0,763088</i>	<i>27</i>
<i>Birleşik Krallık</i>	<i>0,827484</i>	<i>14</i>	<i>Malta</i>	<i>0,688268</i>	<i>28</i>

SONUÇ

Döngüsel ekonomi verimliliğinin ölçülmesi, sınırlı olan doğal kaynakların israfının önlenerek etkili olarak yönetilmesi ve oluşan atıkların yeniden değerlendirilmesi çabalarını desteklemek için önemlidir. Bu çalışmada, Eurostat döngüsel ekonomi göstergelerine ait veriler ile değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada Entropi ve EATWOS teknikleri uygulanmıştır. Entropi yöntemi ile değerlendirmede kullanılan göstergelerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Devamında ise EATWOS yöntemi ile Avrupa Birliği ülkelerinin döngüsel ekonomiye geçiş sürecindeki verimlilikleri belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda Slovenya, Belçika, Hollanda, Avusturya, Litvanya verimlilik puanı yüksek ülkeler arasında yerini alırken; Malta, Kıbrıs, İrlanda ve Romanya gibi ülkelerde ise verimlilik puanı düşük çıkmıştır.

Yapılan çalışma AB üye ülkelerin döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşma konusundaki ilerlemelerini daha iyi anlayabilmelerine ve bu alandaki çabalarını güçlendirmelerine katkı sağlayacaktır. Ülkelerin döngüsel ekonomi performanslarının karşılaştırmalı analizi, iyi uygulama örneklerinin belirlenmesine ve paylaşılarak artmasına rehberlik etmede yardımcıdır. Ayrıca çalışmada elde edilen bulgular, döngüsel ekonomi uygulamalarının teşvik edilmesi için etkili önerileri sunma konusunda destekleyici olacaktır.

Döngüsel ekonomi modelinin benimsenmesi ve uygulanması, doğal kaynakların varlığının daha sürdürülebilir olmasını sağlar. Döngüsel ekonomi performansının ölçülmesi, bu alandaki mevcut uygulamaların etkisini değerlendirerek iyileştirme olanaklarını belirlemek için faydalanılabilecek önemli bir araçtır. Gelecek çalışmalarda daha kapsamlı veri setlerinin

oluşturularak ve farklı yöntemler kullanılarak yeni araştırmalar yapılabilir. Bu konuda ülkeler arası iş birliğinin artırılması yönünde de yapılabilecek çalışmalar ile döngüsel ekonomi uygulamalarını zenginleştirebilecek yöntemler geliştirilebilir.

REFERANSLAR

- Candan G. ve Cengiz Toklu (2022). A comparative analysis of the circular economy performances for European Union countries. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 29:7, 653-664, DOI:10.1080/13504509.2022.2084794
- EC. (2019). Press Release-Circular Economy Package Report: Questions & Answers.http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-19-481_en.htm.
- Eurostat (2023). Circular economy indicators. *Circular economy database*, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/database> (Erişim Tarihi: Kasım-Aralık 2023).
- Fura, B., Stec, M., & Miš, T. (2020). Statistical evaluation of the level of development of circular economy in European Union member countries. *Energies*, 13(23), 6401. <https://doi.org/10.3390/en13236401>
- Homrich AS, Galvão G, Abadia LG, Carvalho MM. (2018). The circular economy umbrella: trends and gaps on integrating pathways. *J Clean Prod.* 175:525–543. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.064
- Kaya, S. K., Ayçin, E., & Pamucar, D. (2023). Evaluation of social factors within the circular economy concept for European countries. *Central European Journal of Operations Research*, 31(1), 73-108. <https://doi.org/10.1007/s10100-022-00800-w>
- Liu, P., Liu, X. ve Yang, H. (2019). Evaluation of the Marine Economic Development Quality in Qingdao Based on Entropy and Grey Relational Analysis. *Marine Economics and Management*, 2(1), 29-38.
- Marino, A. & Pariso, P. (2020). Comparing European Countries' Performances in the Transition Towards the Circular Economy. *Science of the Total Environment*, 729, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138142>
- Morone, P., Yilan, G., 2020. A paradigm shift in sustainability: from lines to circles. *Acta Innovations* 36, 17–32.
- Özkaya, G. (2024). An Analysis of the Circular Economy in Europe through Comparative Research Employing The CRITIC-Based MAUT and COPRAS Methods, *Verimlilik Dergisi*, 58(3), 337-358.
- Peters, M. L. ve Zelewski, S. (2006), Efficiency Analysis Under Consideration of Satisficing Levels for Output Quantities. In *Proceedings of the 17th Annual Conference of the Production and Operations Management Society*, 28.
- Peters, M. L., Zelewski, S. ve Bruns, A. S. (2012). Extended Version of EATWOS Concerning Satisficing Levels for Input Quantities. *Pioneering Supply Chain Design: A Comprehensive Insight into Emerging Trends. Technologies and Applications*, 10, 303.
- Robaina, M., Murillo, K., Rocha, E. & Villar, J. (2020). Circular Economy in Plastic Waste - Efficiency Analysis of European Countries. *Science of the Total Environment*, 730, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139038>

- Shannon, C. E., ve Weaver, W. (1947). The mathematical theory of communication. Urbana: The University of Illinois Press.
- Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M. ve Tarokh, M. J. (2011), A Fuzzy VIKOR Method for Supplier Selection Based on Entropy Measure for Objective Weighting. *Expert Systems with Applications*, 38 (10), 12160-12167.
- Singh, J. ve Ordonez, I. (2016). Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 134, 342-353.
- Škrinjaric, T. (2020). Empirical assessment of the circular economy of selected European Countries. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120246>
- Taddei E., Sassanelli C., Rosa P., Terzi S. (2022). Circular supply chains in the era of industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 170, 108268, 1-24, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108268>.
- Ūsas J, Balezentis T, Streimikiene D. (2021). Development and integrated assessment of the circular economy in the European Union: the outranking approach, *Journal of Enterprise Information Management*, ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0440>
- Wang, T.-C., Lee, H.-D., (2009). Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights. *Expert Syst. Appl.* 36, 8980–8985. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.035>.
- Yılmaz, V. (2022). Avrupa Birliği ülkelerinin döngüsel ekonomi performansı. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(1), 94-114.

Kauçuk Ürün İmalatında Hata Türü ve Etkileri Analizi

Erkan Sami KÖKTEN¹

Selma KAYMAZ²

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.
erkansamikokten@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3428-4534
- 2- Lisansüstü Öğrenci; Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği.
kaymazselma@outlook.com ORCID No: 0009-0002-6342-871X

ÖZET

Kauçuk, imalat sektörü için önemli bir hammadDEDİR. İzolasyon ve dayanıklılık gibi özellikleri, kauçuk kullanımını çeşitli alanlarda teşvik etmektedir. Kauçuk, doğada parçalanması uzun süren ve kimyasal içeriği nedeniyle çevreye zarar verebilen bir atık türüdür. Kauçuk atıklarının yüksek hacimli olması ve atık yönetimindeki sorunlar, çevresel problemlere neden olabilmektedir. Buna bağlı olarak kauçuk imalatında/kullanımında atık yönetimi ve atıkların azaltılması konuları önem arz etmektedir. Kauçuk atıklarının azaltılması için hammadde veya yarı mamul olarak kauçuk kullanan ve üreten firmaların, atığa/fireye neden olabilecek hataları iyi yönetmeleri gerekmektedir. Hata türü ve etkileri analizi (HTEA), ürünlerin güvenilirliğini ve performansını arttırmak için hata etkilerini tespit edip, uzun vadeli iyileştirmelere olanak sağlayan bir problem çözme tekniğidir. Bu çalışmada, daha iyi bir hata yönetimi için kauçuk ürün imalatında HTEA gerçekleştirilmiştir. Hataların nedenlerini belirlemek ve hata kaynağını tespit etmek amacıyla neden sonuç diyagramından faydalanılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Hata Türü ve Etkileri Analizi, Risk Öncelik Sıralaması, Kalite İyileştirme, Kauçuk, Neden-Sonuç Diyagramı

GİRİŞ

Kauçuk; Amerika ve Japonya başta olmak üzere pek çok ülkenin çeşitli alanlarda kullandığı önemli hammaddelerden biridir. Kauçuk endüstrisi oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Kauçuğun elastikiyet ve ısıya dayanıklılık gibi birçok özelliği, onu birçok uygulamada elverişli bir malzeme haline getirmektedir. Bu özelliklerinden dolayı kauçuk, günümüzde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Durmaz, 2008). Sentetik ve doğal kauçuk; otomotiv lastiklerinde, sismik izolatörlerde, sızdırmazlık contalarında, hortum, keçe ve mesnet gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Atık kauçuk, doğada uzun yıllar boyunca parçalanmadan kalabilmektedir ve çevresel açıdan kirliliğe yol açabilmektedir. Bu durum, kauçuk imalatında/kullanımında firmalar üzerinde önemli bir çevresel sorumluluk oluşturmaktadır. Kauçuk imalatının birçok farklı aşamaya sahip olması ve karmaşık bir süreci izlemesi hata oluşum riskini arttırmaktadır. Bu hatalar ürün kalitesini düşmesine, verimliliğin azalmasına ve maddi kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca kauçuk imalatında her bir hata ek bir işlem oluşturarak ek karbon salınımına da neden olabilmektedir. Bu çalışmada, kauçuk imalatında hataların önlenmesi, üretim süreçlerinin

iyileştirilmesi ve atıkların/firelerin azaltılması amacıyla hata türü ve etkileri analizi (HTEA) gerçekleştirilmiştir. Hataların nedenlerini belirlemek ve hata kaynağını tespit etmek amacıyla neden sonuç diyagramından faydalanılmıştır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, literatürde kauçuk sektöründe yapılmış kalite kontrol uygulamalarına değinilmiş ve kauçuk üretim süreçlerine yer verilmiştir. Ardından, vaka analizinden faydalanılarak HTEA çalışması gerçekleştirilmiştir. Son olarak, hatalara neden olan faktörlerin azaltılmasına yönelik öneriler sunulmuş ve gelecekteki çalışmalara konu olabilecek noktalar vurgulanmıştır.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, literatürde kauçuk malzeme üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalara yer verilmiştir. Daha önce kauçuk malzeme ile ilgili yapılan çalışmalar, istatistiksel deney tasarımı, kalite araçları ve yapay zekâ gibi yöntemlerden yararlanarak malzeme kalitesini iyileştirme, hataları önleme, geometri bozuklukları ve esneme problemleri gibi konular üzerine gerçekleştirilmiştir. Durmaz (2008) tarafından yapılan çalışmada, bir kauçuk işletmesinde kalite kayıplarını tespit etmek ve önlemek amacıyla vulkanizasyon sürecinde Taguchi deney tasarımı yönteminden yararlanılmıştır. Çalışma sonucunda hatalar önemli derecede azaltılmıştır. Duvar (2012) tarafından yapılan çalışmada, lastik sırt üretiminde meydana gelen lastik geometrisi bozuklukları bilgisayarlı görü ile incelenmiştir. Dört kameralı sistemde lastik sırt profiline çizgi lazer düşürülerek çift taraflı profil çıkartılmıştır. Dört kameradan alınan gerçek koordinat değerleri birleştirilerek, lastik sırt profili için optimum model oluşturulmuştur. Deney tasarımından yararlanılan bir başka çalışmada Orbak ve Cengiz (2012) kauçuk imalatında esneme problemlerini ele almıştır. Çalışmada ayrıca esneme değerine etki eden faktörler balık kılçığı diyagramı ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda üst kalıp sıcaklığının 165 °C, alt kalıp sıcaklığının 190 °C ve vulkanizasyon süresinin 400 saniye olması önerilmiştir. İşlem süresini azaltmak amacıyla yapılan bir çalışmada Şahin (2014) tarafından otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir kauçuk fabrikasında hamur hazırlama süreci izlenmiştir. Gözlem sonucunda kauçuk hamurunun taşınmasında güçlükler tespit edilmiş ve alınan önlemler ile üretim miktarı 15% arttırılmıştır. Pekin

ve Çil (2015) tarafından otomotiv yan sanayiinde faaliyet gösteren ve kauçuk ürün imalatı yapan bir firmada Poke-yoke yöntemi malzeme karıştırma sürecinde uygulanmıştır. Çalışmada tatmin edici sonuçlara ulaşıldığı vurgulanmıştır. Yıldız ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, araç termostatlarında kullanılan malzemelerin kalıcı şekil değişimleri araştırılmıştır. Çalışmada, contalarda kalıcı deformasyonun yüksek olduğu ve bu durumun etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuğun gerekliliklere uygun üretilmemesinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Uygulanan test sonucunda peroksitli kauçuk türünün daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Özkan ve Sağbaş (2021) çalışmalarında kauçuk üretiminde makine-süreç parametrelerini iyileştirmek, kalite hatalarını ve buna bağlı olarak ürün maliyetini azaltmak amacıyla istatistiksel deneysel tasarım yönteminden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda, firelerin azaltılması için enjeksiyon makinesi kalıp sıcaklığının 236,55 °C, pişirme süresinin 71,7 sn ve enjeksiyon hızının 12,9 mm/sn olması gerektiği rapor edilmiştir. Shanling ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, evrişimli sinir ağı ve uzun kısa vadeli bellek ağı modelleri ile kauçuk kalitesi tahmin modelleri oluşturulmuştur.

KAUÇUK MADDESİ

Bu bölümde, kauçuk ve kauçuk sınıflandırılması, kauçuk endüstrisi, kauçuk ürün imalat süreci ve kalite kontrol süreçlerinden bahsedilmiştir. Aynı zamanda söz konusu ürünlerde meydana gelen hata türleri ve sebeplerine değinilmiştir.

Kauçuk ve kauçuk sınıflandırılması

Kauçuk hammaddesi olarak bildiğimiz kauçuk, asıl olarak bir ağaç ismidir ve bu ağaç kendisinden ya da lateksinden elde edilen malzemelerle çeşitli sektörlerde yer edinmiştir (Durmaz, 2008). Doğal kauçuğun (NR) kökeni Brezilya'ya dayanmaktadır. Bu bitkiden verim alabildiklerini fark eden araştırmacılar 1876 yılında bölgeden getirdikleri tohumu İngiltere'de yetiştirip, Seylan ve Malezya'da kauçuk çiftlikleri kurmuşlardır. Günümüzde Dünya'daki kauçuk üretiminde önde gelen ülkeler; Malezya, Endonezya ve Sri Lanka'dır (Acıgöz, 2014).

Kauçuk ihtiyacının yeteri kadar karşılanamaması sebebi ile bilim adamları kauçuğun yapısı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. 1826'da Farada kauçuğun bir hidrokarbon bileşiği olduğunu keşfederek ilk önemli adımı atmıştır. Buna ek olarak I. Dünya Savaşı sırasında kauçuk kaynakları kesilen Alman kimyacıların araştırmaları ile sentetik kauçuk üretiminde bir diğer önemli adım atılmıştır (Acıgöz, 2014). Sentetik kauçuklar yaygın olarak Amerika, Japonya, Almanya ve Fransa'da üretilmektedir. Piyasada kloropren kauçuk (CR), viton kauçuk (FKM), etilen-propilen-dien kauçuk (EPDM), bütadien kauçuk (BR), nitril- bütadien kauçuk (NBR), stren-bütadien kauçuk (SBR), stren-izopren kauçuk (SIR) ve hidrojene nitril-bütadien kauçuk (HNBR) gibi pek çok tür sentetik kauçuk bulunmaktadır (Durmaz, 2008). Bu polimerler çeşit ve dayanıklılık açısından farklı sorumluluklar üstlenmektedir. Durmaz (2008) çalışmasında bazı kauçukların farklı görevlerine yer vermiştir. Doğal kauçuk, yüksek elastikiyet; stren-bütadien kauçuk, mükemmel aşınma; etilen-propilen-dien kauçuk, mükemmel ısı, ışık ve oksidasyon direnci; kloropren kauçuk, ısı ve hava direnci; nitril- bütadien kauçuk, normal yağ direnci; viton kauçuk mükemmel ısı ve yakıt direnci uygulamaları için tercih edilebilmektedir (Durmaz, 2008).

Kauçuk endüstrisi

Kauçuk kullanım alanı geniş olması sebebiyle pek çok sektörde yer edinmiştir. Otomotiv lastiklerinde, sismik izolatörlerde, köprü mesnetlerinde, hortum, keçe ve sızdırmazlık contalarında kullanılmaktadır. Kauçuk titreşim sönümleme özelliği, yüksek sıcaklık ve basınç dayanımı gibi özellikleri sayesinde pek çok alanda sıkça tercih edilmektedir.

Kauçuk ürün imalat süreci

Üretilen ürüne göre işlemler değişse de en genel anlamıyla bir kauçuk malzemesi üretim süreci; karıştırma, hamur ön şekillendirme, presleme, vulkanizasyon ve finisaj adımlarından oluşmaktadır. Vulkanizasyon adımı süreç açısından en kritik adım sayılmaktadır. Vulkanizasyon sürecine tabi tutulan yumuşak kauçuk sertleşir, deformasyona uğrama ihtimali azalır ve yüksek elastikiyet özelliğini geliştirir. Kauçuğun metalle birleştirilmesi vulkanizasyon adımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu adımda hamurun yapısı ve vulkanizasyon sürecindeki farklı parametreler dolayısıyla hatalar

oluşabilmektedir. Buna bağlı olarak kalite sorunları ve standart dışı ürünler üretilmektedir. Vulkanizasyon adımıyla hataya sebep olan nedenler arasında; sıcaklık, basınç, pişirme süresi, makine tipi vb. sayılabilmektedir. Vulkanize edilmemiş kauçuk, deformasyon sonucu şeklini muhafaza edemez (Orbak ve Cengiz, 2012). Aynı zamanda vulkanize edilmemiş kauçuk yapışkan ve sakızla aynı kıvamdadır. Vulkanizasyonun kalıcı deformasyonu azaltmasıyla kauçuğun plastikliği azalırken, elastikliği artmaktadır (Mark ve ark., 2005).

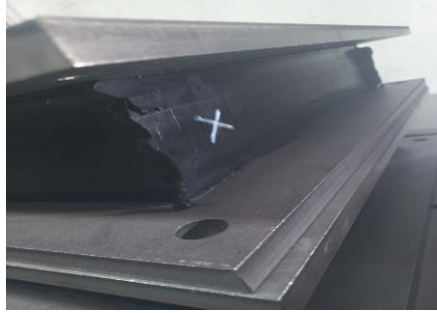
Kauçukta kalite kontrol

Kauçuk endüstrisi, geri dönüşüm, çevre ve karbon emisyonu gibi gereklilikleri yerine getirme çabası içerisinde. Buna bağlı olarak, kalite kontrol faaliyetleri her sektörde olduğu gibi kauçuk endüstrisinde de hayati öneme sahiptir. Sektördeki paydaşlar, sadece çevresel sürdürülebilirliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda üretim süreçlerindeki hataları kontrol altında tutarak karbon ayak izini azaltmaya odaklanmalıdır. Kauçuk sektöründe kalite kontrol hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliği sağlama yolunda kritik bir unsurdur.

Kauçuk ürünleri hata türleri ve sebepleri

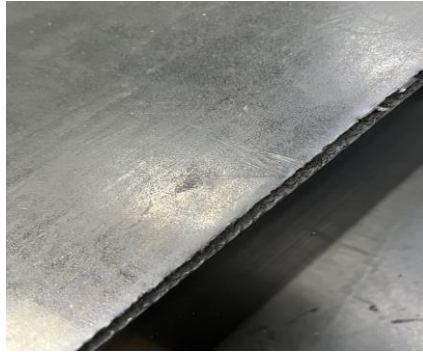
Kauçuk ürün üretim sürecinde çeşitli sebeplerden dolayı hatalar oluşmaktadır. Hamur karışım makinesine karışım oranlarının dengelenememesi, kauçuk vulkanizasyon sürecindeki basınç, sıcaklık ve zaman faktörlerinin uygun düzeyde belirlenememesi bu sebeplerden bazılarıdır. Kauçuk ürün süreçlerindeki hatalardan bazıları; hamur kesim, gramaaj, saç kayması, saç boğumu, hava kabarcığı, silikon çatlağı, çapak pim, temizlik hatası, kalın kenar, hatalı kalıp, deforme, pişme problemi ve ürüne yabancı cisim karışması olarak adlandırılmaktadır. Hataların oluşmaması için vulkanizasyon sürecindeki basınç, sıcaklık ve zaman ayarı dikkatli yapılmalıdır. Aynı zamanda hamur karışımı yaparken hammaddelerin oranlarına dikkat edilmelidir. Ölçüm hataları, ölçüm aletlerinde yanlış alınan ölçülerden meydana gelebilmektedir. Kauçuk ve metalin birbirinden ayrılması gibi ekstrüzyon birleşme hataları meydana gelebilmektedir. Otomasyon sistemi bulunmayan üretim tesislerinde çalışanın ürünü doğru yerleştirmemesinden kaynaklı hatalar da meydana gelebilmektedir. Şekil 1'de örnek olarak bir kauçuk ürün hatası verilmiştir. Saç kayması olarak

adlandırılan bu hata, çalışanın saca hamuru doğru yerleştirmemesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1: Sac Kayması

Şekil 2’de ise vulkanizasyon sürecindeki parametrelerin doğru ayarlanamamasından kaynaklı pişme problemi yaşanan bir ürün gösterilmiştir.



Şekil 1: Pişme Problemi (Kavrulma)

METODOLOJİ

Bu bölümde çalışma kapsamında yararlanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

Hata türü ve etkileri analizi

HTEA, ürünlerin güvenilirliğini ve performansını arttırmak için kullanılan tasarım sürecinde uzun vadeli iyileştirmeler amaçlayan bir problem çözme tekniğidir (Özkılınç, 2023). Bu tekniğin sektörlerde uygulanması ile müşteri tatmini, faktör tasarrufu, hata tespiti ve bunlara bağlı olarak da kalitede iyileşme sağlanmaktadır.

HTEA uygulandığı sürece göre dört kategoride ele alınmaktadır. Sistem elemanları arasında oluşan hata türlerini belirlemek amacıyla sistem

HTEA, süreçleri sınıflandırıp süreci oluşturan faktörler arasındaki potansiyel hataları belirlemek amacıyla proses HTEA, tasarımda önlenilecek hatanın tespiti için tasarım HTEA, servis hizmetinde müşteriye ulaşımındaki hataları tespit etmek amacıyla servis HTEA kullanılmaktadır (Soydinç, 2023).

HTEA uygulanabilmesi için süreci yakından takip eden kişi/ kişiler ile bir grup oluşturulur. Amaç ve sınırlar belirlenir (Aydan ve Kaya, 2017). Oluşturulan grupla süreç incelenir. Olası hatalar tespit edilir ve etkileri değerlendirilir (Çeber, 2010). Hata türleri için şiddet derecelendirilmesi yapılır. Şiddet derecesi hesaplanırken olası hatanın müşteri ve/veya sisteme etkisinin ağırlığı değerlendirilmektedir. Risk derecesi belirlenirken uzman grup, geçmiş zamanda yapılan hatalara odaklanmaktadır. Tablo 1’de hata şiddeti değer aralıkları verilmiştir.

Tablo 1: Hata Şiddeti Değer Aralıkları

Etki	Kriter	Derece
Tehlikeli	Emniyetle ve yasalarla uyumsuz bir arıza. Hata uyarısız meydana gelir.	10
Ciddi	Emniyetle ve yasalarla uyumsuz bir arıza. Hatadan öncesi uyarı gelir.	9
Çok Büyük	Ürün hurdaya çıkar.	8
Büyük	Ürünü bir bölümü hurdaya çıkar.	7
Önemli	Parçanın yeniden işlenmesi gerekir. Ürün performansı azalmıştır.	6
Orta	Müşterinin ürüne dair birkaç rahatsızlığı vardır. Bazı parçaların performansı düşüktür.	5
Küçük	Müşterinin fark edebileceği kadar proses ve ürün üzerinde küçük şiddette etki.	4
Önemsiz	Hata müşteriler tarafından fark edilir ama önemsizdir.	3
Çok Önemsiz	Hata müşteriler tarafından fark edilmez ve çok önemsizdir.	2
Etkisi yok	Hatanın hiç etkisi yok.	1

(Down ve ark., 2008)

Hatanın şiddeti tespit edilirken olası hatanın sisteme etkisinin ağırlığı veya müşteri geri dönüşleri değerlendirilmektedir. Risk derecesi belirlenirken grup, geçmiş zamanda yapılan hatalara odaklanmaktadır (Aydan ve Kaya, 2017). Ardından hata türleri için hangi hata türünün ne kadar sıklıkta yapıldığı hakkında istatistik yöntemleri veya uzman görüşüne dayanarak hataların meydana gelme derecelendirilmesi yapılmaktadır (Stamatis, 2003). Tablo 2’de hatanın oluşma sıklıklarına göre değer aralıkları verilmiştir.

Tablo 1: Hataların Oluşma Sıklıklarına Göre Değer Aralıkları

Hatanın Oluşma Sıklığı	Hatanın İhtimali	Derece
Neredeyse Kaçınılmaz	1/2'den fazla	10
Çok Yüksek	1/3	9
Yüksek	1/8	8
Kısmen Yüksek	1/20	7
Kısmen Orta	1/80	6
Orta	1/400	5
Kısmen Düşük	1/2000	4
Düşük	1/15 000	3
Çok Düşük	1/150 000	2
Çok Az	1/1 500 000'den az	1

(Down ve ark., 2008)

Firmadaki hatalı ürün müşteriye teslim edilmeden ürünün fark edilmesi önemlidir. Bu kapsamda HTEA için ürün hatası fark edilebilirlik derecesi de belirlenmektedir. Hatanın fark edilebilirlik oranlarına göre değer aralıkları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2: Hataların Fark Edilebilirlik Derecelerine Göre Değer Aralıkları

Fark Edilebilirlik	Kriter	Derece
Neredeyse İmkânsız	Tespit edilme ihtimali neredeyse yok.	10
Çok zor	Hata türünün kontroller sonucu belirlenebilmesi çok zor.	9
Zor	Hata türünün kontroller sonucu belirlenebilmesi zor.	8
Çok az	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali çok az.	7
Az	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali az.	6
Orta	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali orta.	5
Ortadan fazla	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali ortadan fazla.	4
Yüksek	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali yüksek.	3
Çok Yüksek	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali çok yüksek.	2
Neredeyse Kesin	Hata türünün kontroller sonucu belirlenme ihtimali neredeyse kesin.	1

(Down ve ark., 2008)

Hatanın şiddeti, oluşma sıklıkları ve fark edilebilirliği istatistiki hesaplamalar ve uzman ekip görüşleriyle derecelendirilir. Ardından risk öncelik sırası hesabı yapılmakta ve hatalar etkiler bazında sıralanmaktadır. Risk öncelik sıralaması (RÖS) hesabı için tüm dereceler birbiri ile çarpılmaktadır. Çarpım sonucunda değer 40'ın altında ise "HTEA sonucunda önlem almaya gerek yoktur" kanısına varılmaktadır. Eğer sonuç 40 ve 100

arasında ve bunlara eşit ise “Önlem alınabilir”, sonuç 100’ün üzerinde ise “Önlem alınması gereklidir” sonucuna varılmaktadır (Öztürk, 2016).

Neden-sonuç diyagramı

Balık kılıçığı diyagramı olarak da bilinen neden-sonuç diyagramı, bir problemin veya sorunun temel nedenlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Atalay ve Kılıç, 2016). Neden-sonuç diyagramlarının hazırlanmasında öncelikle problem tanımlanır ve ana başlıklar halinde temel nedenler belirlenir. Temel nedenlerin alt nedenlerinin belirlenmesinin ardından alt nedenlerin de alt nedenleri tespit edilir. Bu işlem diyagram tamamlanana ve problemin kaynağı tespit edilene kadar devam etmektedir. Neden-sonuç diyagramları, problem çözme ve kalite iyileştirme konularında kullanılan güçlü bir araçtır. Kullanım kolaylığı ve etkili olması nedeniyle imalat süreçlerinde sıklıkla tercih edilmektedir.

UYGULAMA

Kauçuk sektöründe kalite kontrol faaliyetlerini incelemek amacıyla yapılan bu çalışma, Ankara Organize Sanayi bölgesinde kauçuk ürün imalatı yapan bir firmada gerçekleştirilmiştir. Firma, yıllık 3.600 ton kauçuk işleme potansiyeline sahiptir ve ISO 14001, ISO 18001, ISO 9001 BS OHSA, imalatla kalite yeterlilik belgesi ve TS ISO 6446 belgeleri kapsamında çalışmalarını yürütmektedir. Başlıca ürünleri; sismik izolatörler, köprü mesnetleri, genleşme derzleri, titreşim takozları olan firma, 6 Şubat’ta Türkiye’de meydana gelen depremde sonra sismik izolatör üretim ve Ar-Ge çalışmalarına daha fazla ağırlık vermeye başlamıştır.

Firmada doğal kauçuk (NR) ve stren-bütadien (SBR) kauçuk olmak üzere, iki tür kauçuk kullanılmaktadır. Firmada kauçuk kullanım oranı, doğal kauçuk için %80, stren-bütadien kauçuk için ise %20’dir.

Firmada Ar-Ge sorumlusu malzemeler için numune testleri (aşınma, kopma testleri vb.) ve standartlara uygunluk kontrolü yapmaktadır. Kalite kontrol sorumlusu ise hata türlerini kontrol etmektedir. Testlerin ardından ürünler müşterilere ulaştırılmak için hazır hale gelmektedir. Şekil 3’te söz konusu firmada kalite kontrol uygunluk testini geçen kauçuk ürünleri gösterilmektedir.



Şekil 2: Kalite Kontrol Uygunluk Testini Geçen Kauçuk Ürünleri

HTEA uygulaması

Uygulama öncesinde çalışmanın amacı ve sınırları belirlenmiş ve HTEA çalışmalarını yürütebilmek için karar verici bir uzman grup oluşturulmuştur. Bu grup Ar-Ge sorumlusu ile kalite-kontrol birimi uzman ve görevlilerinden oluşmaktadır. Firmanın 2023 yılına ait hata türlerine göre hazırlanmış verileri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3: 2023 Yılına Ait Hata Verileri	
2023 Yılına Ait Hata Türlerine Göre Hata Verileri (dm ³)	
Hamur Kesim	14282
Doldurmayan	4999
Gramaj	1433
Silikon Çatlağı	3501
Saç Kayması	27341
Saç Boğumu	24198
Kalın Kenar	3795
Hatalı Kalıp	154
Temizlik	1838
Çapak Pim	27
Hava Kabarcığı	2340
Deforme	3438
Yabancı Cisim	39
Pişme Problemi	3669
Toplam Hata (dm ³)	91.054

Kalite kontrol uygulaması kapsamında hata türleri arasında, etkinin en büyük olduğu hata türünü tespit etmek ve sebeplerini belirlemek amaçlanmıştır. Hata türü ve etki analizi için oluşturulan ekiple RÖS hesaplaması yapılmıştır. Tablo 4’te verilen 14 hata için hataların oluşma sıklığı hesaplanmıştır. Hata oluşma sıklığı değer aralıklarına göre

derecelendirme yapılmıştır. Oluşma sıklığı için her hata toplam hata sayısına oranlanmıştır. Sonuçlar ve derecelendirme Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4: Hatanın Oluşma Sıklığı ve Dereceleri

	Hatanın Oluşma Sıklığı	Derecelendirme
Hamur Kesim	0,1569	8
Doldurmayan	0,0549	7
Gramaj	0,0157	6
Silikon Çatlağı	0,0384	7
Saç Kayması	0,3003	9
Saç Boğumu	0,2657	9
Kalın Kenar	0,0417	7
Hatalı Kalıp	0,0017	5
Temizlik	0,0202	6
Çapak Pim	0,0003	3
Hava Kabarcığı	0,0257	7
Deforme	0,0378	7
Yabancı Cisim	0,0004	4
Pişme Problemi	0,0403	7

Hatanın fark edilebilirliği için firma içinde oluşturulan ekiple önceliklendirme değer aralıklarına göre derecelendirme yapılmıştır. Yapılan derecelendirme sonucu ulaşılan sonuçlar Tablo 6’daki gibidir.

Tablo 5: Hata Fark Edilebilirliği Dereceleri

Hataların Fark Edilebilirliği	
Hamur Kesim	1
Doldurmayan	1
Gramaj	3
Silikon Çatlağı	1
Saç Kayması	1
Saç Boğumu	1
Kalın Kenar	1
Hatalı Kalıp	3
Temizlik	1
Çapak Pim	3
Hava Kabarcığı	1
Deforme	1
Yabancı Cisim	1
Pişme Problemi	3

Hataların şiddeti ve etkisini değerlendirebilmek amacıyla şiddet aralıkları baz alınarak hazırlanan Tablo 7 aşağıdaki gibidir.

Tablo 6: Hata Şiddeti Dereceleri

	Hata Şiddeti
Hamur Kesim	5
Doldurmayan	5
Gramaj	5
Silikon Çatlağı	1
Saç Kayması	3
Saç Boğumu	1
Kalın Kenar	1
Hatalı Kalıp	2
Temizlik	1
Çapak Pim	2
Hava Kabarcığı	2
Deforme	3
Yabancı Cisim	3
Pişme Problemi	3

Yapılan derecelendirme ve hesaplamalara göre RÖS sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

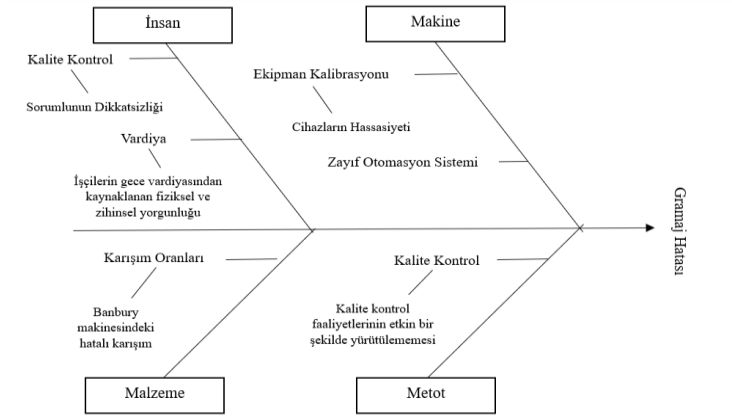
Tablo 7: Risk Önceliklendirme Sonuçları

Hata Türü	RÖS
Hamur Kesim	40
Doldurmayan	35
Gramaj	90
Silikon Çatlağı	7
Saç Kayması	27
Saç Boğumu	9
Kalın Kenar	7
Hatalı Kalıp	30
Temizlik	6
Çapak Pim	18
Hava Kabarcığı	14
Deforme	21
Yabancı Cisim	12
Pişme Problemi	63

RÖS hesabı değer aralıklarına göre öncelikli olarak gramaj hatası olmak üzere hamur kesim hatası ve pişme problemi için önlem alınabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Diğer hata türleri için HTEA değer aralıklarına göre mevcut durumda “Önlem almaya gerek yoktur” sonucuna ulaşılmıştır.

Neden Sonuç Diyagramı

HTEA sonuçlarına göre en etkili hatanın gramaj hatası olduğu belirlenmiştir. Gramaj hatasının nedenlerini irdelemek için HTEA ekibi ile beyin fırtınası yapılarak oluşturulan neden-sonuç diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: Gramaj Hatasına İlişkin Neden-Sonuç Diyagramı

Şekil 4'te verilen neden sonuç diyagramı, HTEA sonucu fabrikadaki en etkili hatanın neden olduğu sebepleri irdelemek ve hatanın önlenmesine yönelik öneriler sunabilmek amacıyla oluşturulmuştur. Diyagramdan hareketle ekipman kalibrasyonu, gece vardiyası, kalite kontrol süreçlerinin zayıf olmasının kauçuk malzemede gramaj hatalarına yol açtığı görülmüştür. Yapılan beyin fırtınasında, hataların büyük bir kısmının insan kaynaklı olduğu ve otomasyon sistemi eksikliğinin hataları arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu hatalar genelde işçi hatası bazen de kalite kontrol biriminin gözünden kaçan hatalardır. Gece vardiyasında işçinin fiziksel ve zihinsel yorgunluğu gramaj hatasına neden olan sorunlardan bir tanesidir. İki vardiya çalışılan firmada, gece vardiyasında yorgunluk sebebiyle çalışanlar önemli noktaları kaçırabilmektedir. Banbury makinesinde hamurun karıştırılması üretim sürecinin neredeyse başlangıç aşamasıdır. Bu aşamada farklı kauçuk türleri ve katkı maddeleri harmanlanmakta ve homojen hale getirilmektedir. Karışım oranında hata yapılması ilerleyen süreçlerde gramaj hatasına neden olabilmektedir. Oran hatası; gramaj hatası ile sınırlı kalmayıp, kauçuk üründe dayanıklılık, esneklik ve aşınma direncinde olumsuzluğa sebep olabilmektedir. Malzemelerin doğru oranlarda kullanıldığından emin olmak için hassas ölçüm ve tartım sistemleri kullanılmalıdır. Bu noktada fabrikanın ekipman kalibrasyonu araştırılmıştır ve gramaj hatasına neden olan sebepler arasında sayılmıştır. Ölçüm yaparken zaman zaman tartım hataları ürünün gramajında hatalara neden olmaktadır. Bir diğer gramaj hatasına neden olan faktör ise kalite kontrol süreçleridir.

Kauçuk malzemede belirlenmiş fiziksel-kimyasal özelliklere ve ağırlık standartlarına uyulması gerekmektedir. Ağırlık standartlarına uyulmaması sonucunda gramaj hatası ortaya çıkabilmektedir.

SONUÇ

Çevresel açıdan kirliliğe yol açabilen atık kauçuk, kauçuk imalatında/kullanımında firmalar üzerinde önemli bir çevresel sorumluluk oluşturmaktadır. Kauçuk imalatının karmaşık bir süreç izlemesi ise hata oluşum riskini arttırmaktadır. Verimliliği ve maddi kaybı önlemek açısından kauçuk imalatında hatalar azaltılmalıdır. Hataları önlemek amacıyla kauçuk imalatında hata türleri tespit edilmeli ve hatanın nedenleri irdelenmelidir. Bu çalışmada da bir kauçuk fabrikasında üretilen ürünlerin süreç aşamasındaki hataları gözlemlenmiş ve sebepleri irdelenmiştir. Bu kapsamda hataların etkilerini de baz alarak HTEA yapılmış ve çıkan gramaj hatasının sebepleri neden-sonuç diyagramıyla irdelenmiştir. Bulgulardan hareketle, gramaj, hamur kesim ve pişme problemleri için önlem alınması gerekmektedir. Diğer hata türleri için ise HTEA yaklaşımına göre önlem almaya gerek bulunmamaktadır. Çoğunlukla hataların, personel hatasından kaynaklandığı bilinen firmada, genel olarak gramajın yanlış ölçümü, hamur kesim hatası ve pişme probleminin sebebinin insan olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise otomasyon sistemlerinin zayıf kalması dolayısıyla işçiye çok fazla sorumluluk yüklenmesidir. HTEA sonucunda firmada en önemli etkiye sahip hata gramaj hatasıdır. Kauçukta gramaj hatası; kalite sorunlarına, müşteri memnuniyetsizliğine, üretim maliyetlerine ve bu araştırmanın ana nedeni olan atığa sebep olmaktadır. Söz konusu hataya; banbury makinesindeki karışım oranları, iki vardiyadan kaynaklı personel hataları, kalite kontrol sorumlusunun gözünden kaçan ayrıntılar, kalite kontrol standartlarının etkin uygulanamaması ve ekipman kalibrasyonu hataları sebep olabilmektedir. Gelecek çalışmalarda kauçuk malzeme hata tespiti için teknolojik iyileştirmeler ele alınabilir. Bu iyileştirmeler, görüntü işleme tekniklerini içerebilir. Görüntü işleme ile kauçuk malzeme yüzeyinde yer alan küçük ve belirsiz hataların tespiti mümkün olabilmektedir. Aynı zamanda sürdürülebilir üretim için kauçukta atık konusuna araştırmalarda yer verilmelidir.

REFERANSLAR

- Acıgöz, M. (2014). *Türkiye’de Kauçuk Sektörü ve Sorunları*. Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ, Türkiye.
- Atalay, O., ve Kılıç, Ö. (2016). Balık Kılçığı Yöntemi ile Mobil Vinç Kazası Olası Nedenlerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 73-78. doi: [10.21605/cukurovaummfd.242808](https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.242808).

- Aydan, M., ve Kaya, S. (2017). Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA): Üniversite Hastanesinde Bir Uygulama. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi* , 20(4), 475-502.
- Çeber, Y. (2010). *Hata Türü ve Etkileri Analizi Yönteminin (FMEA) Üretim Sektöründe Uygulanması*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), İzmir, Türkiye.
- Down, M., Brozowski, L., Younis, H., Benedict, D., Feghali, J., Schubert, M., Brender, R., Gruska, G., Vallance, G., Krasich, M., Haughey, W. (2008). *Potential Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Reference Manual* (4th Ed.), Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- Durmaz, S. (2008). *Taguchi Metodunun Kauçuk Vulkanizasyon Prosesine Uygulanması*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya, Türkiye.
- Duvar, R. (2012). *Araç Lastiği Sırt Profilinin Bilgisayarda Görü Yaklaşımı ile Kontrolü*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli, Türkiye.
- Mark, J. E., Abou-Hussein, R., Sen, T. Z. ve Kloczkowski, A. (2005). Some Simulations On Filler Reinforcement In Elastomers. *Polymer*, 46(21), 8894-8904. doi:10.1016/j.polymer.2005.07.043
- Orbak, A. Y., ve Cengiz, G. T. (2012). Titreşim Sönüm Elemanları Üreten Bir Firmada İstatistiksel Kalite Kontrolü ve Deney Tasarımı Yöntemleri ile Süreçlerin İyileştirilmesi. 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye.
- Özkan, N. D., ve Sağbaş, A. (2021). Tepki yüzeyi yaklaşımı uygulanarak kauçuk makine-süreç parametrelerinin optimizasyonu. *Konya Journal Engineering Sciences*, 9(2), 292-305. doi:10.36306/konjes.749209
- Özkılınç, M. Ö. (2023). *Yeni Tasarlanan Bir Buzdolabı İçin Eş Zamanlı Mühendislik Uygulamaları: DFMA, FMEA, TRIZ Entegrasyonu*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir, Türkiye.
- Öztürk, D. (2016). Fault Tolerant Control Of Rotor Swing Stabilizer System Using FMEA Method. *GİDB Dergi*, (07), 33-48.
- Pekin, E., ve Çil, İ. (2015). Kauçuk Sektörü Poke-Yoke Uygulaması. *Sakarya University Journal of Science*. 19(2), 163-170. doi:10.16984/saufenbilder.19905
- Shanling, H., Wenzheng, D., He, S., Peng, X., Shoudong, Z., Long, C. ve Yong, L. (2023). Real-time rubber quality model based on CNN-LSTM deep learning theory. *Materials Today Communications*, 35, 106110. doi:10.1016/j.mtcomm.2023.106110
- Soydınç, M. (2023). *Ürün Kalitesini İyileştirmede FMEA ve Bulanık AHP Yaklaşımları ve PAF Modeli ile Kalite Maliyetlerinin İzlenmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir, Türkiye.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis*. Quality Press.
- Şahin, A. (2014). *Kauçuk Hamur Hazırlama Sürecinin Analizi ve İyileştirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), İzmir, Türkiye.

Yıldız, R., Solmaz, E., Kutlu, A. ve Kayaci, S. (2019). Motor termostat contasında meydana gelen kalıcı şekil değışikliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(1), 13-24.

Silindirik Kabuğun Üzerindeki Basıncın Analitik İfadesi

Birkan DURAK^{1*}

Erol UZAL²

1-İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Uçak Teknolojisi Programı, birkand@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-8196-5407

2-İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, euzal@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0008-1376

Bu çalışma Birkan DURAK'ın "Kabuk Yapılarda Akışkan-Elastik Cisim Etkileşiminin Teorik İncelenmesi" adlı Doktora tezinden üretilmiştir.)

ÖZET

En az iki eğrilik yarıçapına sahip olan ve küçük kalınlığa sahip yapı elemanı olan kabuklar işlevsel, sağlam, emniyetli, hafif ve ekonomik sistemlerdir. Bu yüzden çeşitli mühendislik uygulamalarında kabuklardan farklı amaçlarla yararlanılır. Mevcut çalışmada gibi x yönünde sonsuz uzun olan ve bu yön boyunca iki ucundan basit mesnetlenmiş bir silindirik kabuğun üzerinden akışkan geçişi sırasında meydana gelen basınç analitik olarak bulunmuştur. İncelenen kabuk malzemesi lineer elastik, homojen ve izotropiktir. Silindirik kabuk rijit xy düzlemine oturmaktadır. Silindirden uzakta akışkan y yönünde sabit U hızıyla akmaktadır ve akış potansiyellidir.

Anahtar Kelimeler – Akış kaynaklı titreşim, Çarpınma hızı, Elastik boru, Özdeğer, Titreşim

GİRİŞ

En az iki eğrilik yarıçapına sahip olan ve küçük kalınlığa sahip yapı elemanıdır. Kabuklar işlevsel, sağlam, emniyetli, hafif ve ekonomik sistemlerdir. Kabukların inşaat mühendisliğinde; Büyük açıklıklı mekanların örtülmesinde, Su, akaryakıt ve gaz depolarında (silindirik, konik, küresel kabuk olarak), Büyük sanat yapılarında (paraboloid, silindir, eliptik hiperbol vb. şekillerde), Soğutma kulelerinde (hiperboloid geometride), Tahıl veya çimento silolarında, baraj gövdelerinde, uçak hangarı, stadyumlarda ve tünellerde kullanılır. Makine mühendisliğinde; sıvı veya gaz taşıyan borularda ve bunları depolamak için kullanılan tanklarda, otomobil gövdesinde ve denizaltılarda mevcuttur. Ayrıca havacılıkta ve uzay sanayinde ise roketlerde, uçak gövde ve kanatlarında kabuklar kullanılmaktadır.

Kabukları şekillerine göre sınıflandırmak genel olarak kabul görmüştür. Buna rağmen çoğu zaman kabukların sınıflandırılmasında kabuğu kesin ve yalnızca bir sınıfa sokmak mümkün ve doğru bir yaklaşım olmaz. Bunun nedeni bir kabuk, dairesel ve tam yüzeyli, tepesi kapalı, tek/çift tabakalı, ortotrop, kusurlu ve konik olabilir. Değişik kabuk tipleri arasında Dönel silindirik yüzeyli (Dairesel, Eliptik, Parabolik, Tono), Konik yüzeyli (Dairesel, Eliptik vb.), Küresel, Paraboloid, Hiperboloid, herhangi iki eğrilikli dönel kabuk, Eliptik paraboloid, Hiperbolik paraboloid, Bombeli yüzeyli, Prizmatik yüzeyli vb. yer alır.

İNCE KABUK TEORİSİ

Bir plakanın veya kabuğun hareket denkleminin kısa ve net olarak oluşturulması için aşağıdaki dört adet varsayımdan yararlanılır.

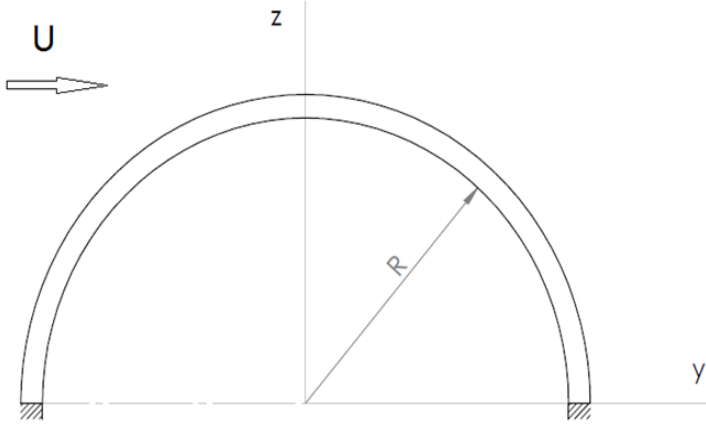
1. Kalınlık diğler boyutlara göre çok küçüktür.
2. Gerinme (birim boy uzaması) ve yer değıştirmeler yeterince küçüktür. Bu ifadelerin iki ve daha yukarındaki mertebeden terimleri ihmal edilir.
3. Enine gerilmeler diğler gerilme bileşenlerine nazaran daha küçük olduğundan göz önüne alınmazlar.
4. Kabuk orta yüzeyinin normali deformasyon sonrasında değışmez. Dolasıyla kalınlık deformasyon sonrasında değışmediğı varsayılır.

(Leissa, 1973) bahsedilen dördüncü yaklaşımın literatürde Kirchhoff hipotezi olarak bilindiğini belirtmiştir. Kirchhoff hipotezi kirişlerin basit eğilme teorisindeki ilişkilere benzemektedir. Oluşturulan plaka eğilme teorisi, klasik veya Kirchhoff'un plaka teorisi olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü ve dördüncü varsayımlar, ince elastik kabukların hareket denklemlerinin oluşturulmasında kullanılır ve kabuğun özel bir ortotropi tipine sahip bir malzeme gibi davranmasını kabul ederler. Gerinme ve yer değıştirme denklemlerinde bazı basitleştirmeler yapan araştırmacılar kendi adları ile anılan kabuk teorilerini oluşturmuşlardır. Çalışmada Donell-Mushtari-Vlasov (DMV) ince kabuk teorisinden yararlanılarak verilen hareket denklemleri göz önüne alınmıştır.

KABUK MALZEMESİ VE HAREKET DENKLEMLERİ İÇİN YAPILAN KABULLER

Mühendislikte anizotropi malzemenin elastiklik özelliklerinin yöne göre farklılık gösterdiğini belirtir. Ayrıca karşılıklı olarak birbirine dik üç düzleme göre, elastiklik özellikler ikişer ikişer simetrik ise malzeme ortotropiktir. İncelenen malzemenin elastik sabitleri koordinat eksenlerinin doğrultusundan bağımsız ise (herhangi bir noktadan geçen tüm doğrultularda aynıysa) o halde izotropdur denir. Malzeme lineer ise gerilmenin, gerinmeye oranı Elastisite modülünü vermektedir. Davranışı incelenen malzeme nonlinear ise Hooke yasası geçerli olmaz bu durumda gerilme ifadesi ile gerinmenin aralarındaki ilişki bir doğrudan ziyade bir eğri şeklinde olacaktır. Kuvvet ve deplasmanlar sürekli fonksiyonlarla ifade edilebilirler. Bu literatürde süreklilik hipotezi olarak bilinir. Kabuk malzemesi homojen, izotrop ve sürekli ortam özellikleri taşıyorsa süreklilik hipotezi sağlar denilir.

Şekil 1 deki gibi x yönünde sonsuz uzunluğla sahip olan ve bu yön boyunca iki ucundan basit mesnetlenmiş bir silindirik kabuk göz önüne alınsın. Göz önüne alınan kabuk malzemesi lineer elastik, homojen ve izotropiktir. Doğal olarak kabuk süreklilik hipotezini de sağlar. Silindirik kabuğun oturduğı zemin olan xy düzlemi rijittir. Silindirden uzakta akışkan y yönünde sabit U hızıyla akmaktadır ve akış potansiyellidir.



Şekil 1: Akışa maruz kalan silindirik kabuk

Kabukta meydana gelen x , y ve z yönlerindeki çökmeler sırasıyla $u(x, \theta, t)$, $v(x, \theta, t)$ ve $w(x, \theta, t)$ olmak üzere hareket denklemleri Donell-Mushtari-Vlasov (DMV) İnce Kabuk Teorisine göre aşağıdaki şekilde verilir. (Yao, 2016), (Blevins, 2016), (Bracewell, 2000)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + \frac{\nu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho_k \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho_k \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ R^2 \lambda \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right) + \frac{w}{R^2} + \frac{\nu}{R} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho_k \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= P \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $\lambda = \frac{h_k^2}{12R^2}$ dir. Kabuk x yönünde sonsuz uzun olduğundan içerisinde

u 'yu barındıran terimler düşer ve $\frac{\partial(\dots)}{\partial x}$ şeklindeki kısmi türevler sıfır olur.

Verilen çökmelerden x yönünde olanı $u = 0$ olurken y ve z yönünde olanları ise $v(x, \theta, t)$ ve $w(x, \theta, t)$ olacaktır. Gerekli düzenlemeler yapılarak (1) denklemi

$$\begin{aligned} \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho_k \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{h_k^2}{12R^4} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right) + \frac{w}{R^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho_k \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= P \end{aligned} \quad (2)$$

haline gelecektir. Bu denklem sisteminin sınır şartları

$$v(0) = v(\pi)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \theta}(0) = \frac{\partial w}{\partial \theta}(\pi) = 0$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3}(0) = \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3}(\pi) = 0$$

olacaktır. Bu diferansiyel denklem sisteminin çözümü ile kabuğun akışkan geçişi sırasında üzerinde oluşan basınç için analitik bir ifade bulunabilir. Bunun için silindirik kabuğun yarıçapının zamanla değişiminin denklem (3) ve akım fonksiyonunun ise denklem (4) deki gibi olduğu varsayılın.

$$r = R + \varepsilon w(\theta, t) \quad (3)$$

Bu denklemlerdeki ε pertürbasyon parametresidir ve iki ya da daha yüksek mertebeden kuvvetlerini içeren terimler dikkate alınmayacaktır.

$$\psi(r, \theta; \varepsilon) = \psi_0(r, \theta) + \varepsilon \psi_1(r, \theta) + \dots \quad (4)$$

Akış potansiyelidir yani akım fonksiyonu Laplace denklemini sağlar.

$$\nabla^2 \psi = \nabla^2 \psi_0 + \nabla^2 \psi_1 = 0$$

Bu denklemdeki y_0 daire üzerindeki akış olarak akışkanlar mekaniği kitaplarında

$$\nabla^2 \psi_0 = 0 \quad \text{dan} \quad \psi_0 = U \left(r - \frac{R^2}{r} \right) \sin \theta \quad (5)$$

şeklinde verilir. Böylece silindirik kabuk üzerinde akım fonksiyonu

$$\psi(R + \varepsilon w(\theta, t), \theta) = \psi_0(R + \varepsilon w(\theta, t), \theta) + \varepsilon \psi_1(R + \varepsilon w(\theta, t), \theta) + \dots = 0 \quad (6)$$

haline gelir.

$$\psi(R, \theta) = \psi_0(R, \theta) + \varepsilon w(\theta, t) \frac{\partial \psi_0(R, \theta)}{\partial r} + \varepsilon \psi_1(R, \theta) + \dots = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\psi_0(R, \theta) &= 0 \\ \psi_1(R, \theta) &= -w(\theta, t) \frac{\partial \psi_0(R, \theta)}{\partial r}\end{aligned}\quad (8)$$

(5) nolu denklemdeki ψ_0 ın eşiti (8) nolu denkleme yazılırsa

$$\psi_1(R, \theta) = -w(\theta, t) U \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \sin(\theta) \quad (9)$$

ifadesine ulaşılır. Buna göre denklem (2) ile verilen ikinci denklemdeki P basınış terimini denklem (10) daki problemin çözümü verecektir.

$$\begin{aligned}\nabla^2 \psi_1 &= 0 \\ r &= R \text{ de} \\ \psi_1(R, \theta) &= f(\theta) = -w(\theta, t) U \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \sin \theta \\ r &= \infty \text{ da} \quad \psi_1 = 0\end{aligned}\quad (10)$$

Bu problemin çözümü değişkenlerin ayrıştırılması yöntemi kullanılarak bulunur. Problemin zm $\psi_1(r, \theta) = R(r) \phi(\theta)$ formunda olsun. Bu zm silindirik koordinatlarda Laplace denklemine yazılırsa

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \theta^2} &= 0 \\ \frac{r^2 R'' + r R'}{R} + \frac{\phi''}{\phi} &= 0\end{aligned}\quad (11)$$

denklemlerine ulaşılır. Burada λ bir reel sayı olmak üzere

$$\frac{r^2 R'' + r R'}{R} = \lambda \quad r^2 R'' + r R' - \lambda R = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\phi''}{\phi} = -\lambda \quad \phi'' + \lambda \phi = 0 \quad (13)$$

ifadelerine ulaşılır. Denklem (10) daki çözümün tek değerli olabilmesi için $\psi_1(r, \theta + 2\pi) = \psi_1(r, \theta)$ şartı sağlanmalıdır. Buna uygun olarak (13) denklemini sınır şartları yazılarak çözülür

$$\begin{aligned}
\phi'' + \lambda \phi &= 0 \\
\phi(0) &= \phi(2\pi) = 0 \\
\phi'(0) &= \phi'(2\pi) = 0
\end{aligned} \tag{14}$$

Bu adi diferansiyel denklemin çözümü için λ 'nın alabileceği tüm değerler incelenmelidir. Denklem (15) incelenirse

$$\begin{aligned}
\lambda < 0 \quad & \text{iken} \quad \phi(\theta) = 0 \\
\lambda = 0 \quad & \text{iken} \quad \phi(\theta) = C_2 \\
\lambda > 0 \quad & \text{iken} \quad \phi(\theta) = C_5 \cos(\sqrt{\lambda} \theta) + C_3 \sin(\sqrt{\lambda} \theta) \quad \text{ve } \lambda = n^2 \quad \text{olarak} \\
& \phi(\theta) = C_5 \cos(n\theta) + C_3 \sin(n\theta) \quad n = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned}$$

(15)

Aranan çözüm $\lambda > 0$ durumudur. Denklem (12)

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - n^2 R = 0 \tag{16}$$

haline gelir ve bu denklem Euler diferansiyel denklemdir, çözümü ise

$$R(r) = \begin{cases} C_7 r^n + C_8 r^{-n}, & n \neq 0 \text{ ise} \\ C_3 \ln r + C_4, & n = 0 \text{ ise} \end{cases} \tag{17}$$

denklem (17) deki gibidir. Bu ve denklem (15) akım fonksiyonunda yazılarak

$$\psi_1(r, \theta) = \begin{cases} [C_7 r^n + C_8 r^{-n}] [C_5 \cos(n\theta) + C_6 \sin(n\theta)] & n = 1, 2, 3, \dots \\ C_2 [C_3 \ln r + C_4] & n = 0 \text{ ise} \end{cases} \tag{18}$$

denklemini bulunur. bu denklemdeki çözümün sınırlı olarak kalması için M bir reel sayı iken $\lim_{r \rightarrow \infty} |\psi_1(r, \theta)| < M$ olmalıdır. Buna göre

$$C_7 r^n = 0 \quad \text{ve} \quad C_2 C_3 \ln r = 0 \tag{19}$$

olacaktır. Ayrıca aşağıdaki tanımlar yapılarak

$$\begin{cases} C_8 C_5 = C_9 \\ C_8 C_6 = C_{10} \end{cases}$$

(19) denklemini (18) denklemine yazılırsa

$$\psi_1(r, \theta) = \begin{cases} C_2 C_4, & n = 0 \text{ ise} \\ r^{-n} [C_9 \cos(n\theta) + C_{10} \sin(n\theta)] & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (20)$$

denkleme ulaşılır. $C_2 C_4 = \alpha_0$ kabul edilmesi halinde akım fonksiyonun formal çözümü denklem (21)

$$\psi_1(r, \theta) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} r^{-n} [\alpha_n \cos(n\theta) + \beta_n \sin(n\theta)] \quad (21)$$

ile verilir ve bu denklem sınır şartlarını sağlamalıdır.

$$\begin{aligned} \psi_1(R, \theta) = f(\theta) &= \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R^{-n} [\alpha_n \cos(n\theta) + \beta_n \sin(n\theta)] \\ \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(m\theta) d\theta &= \alpha_0 \int_0^{2\pi} \cos(m\theta) d\theta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^n} \alpha_n \underbrace{\int_0^{2\pi} \cos(n\theta) \cos(m\theta) d\theta}_{\pi \cdot \delta_{mn}} + \dots \quad (22) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^n} \beta_n \underbrace{\int_0^{2\pi} \sin(n\theta) \cos(m\theta) d\theta}_{\substack{n=m \rightarrow 0 \\ n \neq m \rightarrow 0}} \end{aligned}$$

Bu denklemdeki δ ifadesi dirac delta fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (22) deki α_n katsayısı ise

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(m\theta) d\theta &= \alpha_0 \int_0^{2\pi} \cos(m\theta) d\theta + \frac{1}{R^m} \alpha_m \pi \\ m \neq 0 &\rightarrow \alpha_m = \frac{1}{\pi R^{-m}} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(m\theta) d\theta \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (23) \\ m = 0 &\rightarrow \alpha_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \end{aligned}$$

denklemden

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(m\theta) d\theta &= \alpha_0 \int_0^{2\pi} \sin(m\theta) d\theta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^n} \alpha_n \underbrace{\int_0^{2\pi} \cos(n\theta) \sin(m\theta) d\theta}_{\substack{n=m \rightarrow 0 \\ n \neq m \rightarrow 0}} + \dots \\
&+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^n} \beta_n \underbrace{\int_0^{2\pi} \sin(n\theta) \sin(m\theta) d\theta}_{\pi \cdot \delta_{mn}}
\end{aligned} \quad (24)$$

olarak bulunur. β_n katsayısı için ise

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(m\theta) d\theta &= \alpha_0 \int_0^{2\pi} \sin(m\theta) d\theta + \frac{1}{R^m} \beta_m \pi \\
m \neq 0 \rightarrow \beta_m &= \frac{1}{\pi R^{-m}} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(m\theta) d\theta \quad (m=1, 2, 3, \dots)
\end{aligned} \quad (25)$$

ifadesi geçerlidir. (23) ve (25) nolu denklemler (21) nolu denklemde yazılır ve $m \rightarrow n$ yapılırsa denklem (26) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\psi_1(r, \theta) &= \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^n [\alpha_n \cos(n\theta) + \beta_n \sin(n\theta)] \\
\alpha_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(n\theta) d\theta \\
\beta_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(n\theta) d\theta \\
\alpha_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta
\end{aligned} \quad (26)$$

Denklem (10) ile verilen sınır şartları denklem (26) te yazılırsa silindirik kabuk üzerindeki basınç teriminde kullanılacak akım fonksiyonu hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
r &= R \quad de \\
f(\theta) &= -2U w(\theta, t) \sin \theta \\
\psi_1(r, \theta) &= \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^n [\alpha_n \cos(n\theta) + \beta_n \sin(n\theta)] = -2U w(\theta, t) \sin \theta \\
\alpha_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\xi) \cos(n\xi) d\xi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -2U w(\xi, t) \sin \xi \cos(n\xi) d\xi \\
\beta_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\xi) \sin(n\xi) d\xi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -2U w(\xi, t) \sin \xi \sin(n\xi) d\xi \\
\alpha_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\xi) d\xi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -2U w(\xi, t) \sin \xi d\xi
\end{aligned} \quad (27)$$

Akım fonksiyonunun son hali

$$\begin{aligned}\psi_1(r, \theta, \xi) &= \frac{-2U}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} w(\xi, t) \sin(\xi) d\xi \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \cos(n\theta) \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -2Uw(\xi, t) \sin(\xi) \cos(n\xi) d\xi \right] \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sin(n\theta) \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -2Uw(\xi, t) \sin(\xi) \sin(n\xi) d\xi \right]\end{aligned}\quad (28)$$

Bu denklem daha basit olarak

$$\begin{aligned}\psi_1(r, \theta, \xi) &= \frac{-2U}{\pi} \int_0^{2\pi} w(\xi, t) G(r, \theta, \xi) d\xi \\ G_1(r, \theta, \xi) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \cos(n\theta) \sin(\xi) \cos(n\xi) \\ G_2(r, \theta, \xi) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sin(n\theta) \sin(\xi) \sin(n\xi) \\ G(r, \theta, \xi) &= \frac{\sin(\xi)}{2} + G_1(r, \theta, \xi) + G_2(r, \theta, \xi)\end{aligned}\quad (29)$$

şeklinde yazılabilir. Basınç için kabuk üzerinde Lineerleştirilmiş Bernoulli denklemi yazılmalıdır

$$P = -\rho_f \left[\frac{\partial \psi_1}{\partial t} + U \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} \right] \Big|_{r=R} \quad (30)$$

denklem (30) için

$$\begin{aligned}P &= -\rho_f \left[\frac{-2U}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\partial w(\xi, t)}{\partial t} G(r, \theta, \xi) d\xi \right. \\ &\quad \left. - \frac{2U^2}{\pi} \int_0^{2\pi} w(\xi, t) \frac{\partial G(r, \theta, \xi)}{\partial \theta} d\xi \right]\end{aligned}\quad (31)$$

denklemini yazılır. $G(r, \theta, \xi)$ için denklem (32) ve (33) ile verilen eşitlikler geçerlidir.

$$\begin{aligned}G(r, \theta, \xi) \Big|_{r=R} &= G(\theta, \xi) = \frac{\sin \xi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (1)^n \cos(n\theta) \sin \xi \cos(n\xi) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} (1)^n \sin(n\theta) \sin \xi \sin(n\xi)\end{aligned}\quad (32)$$

$$\begin{aligned}
G(\theta, \xi) &= \sin \xi \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\theta) \cos(n\xi) + \sin(n\theta) \sin(n\xi) \right] \\
&= \sin \xi \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos[n(\theta - \xi)] \right]
\end{aligned} \tag{33}$$

Denklem (33) teki köşeli parantezdeki ikinci terimin hesaplanması için genelleştirilmiş Fourier Serisi, Dirac Delta ve Heaviside Fonksiyonlarının özellikleri kullanılmalıdır. Genelleştirilmiş Fourier Serisi denklem (34) ile verilir (Bracewell, 2000).

$$\begin{aligned}
f(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\theta) \\
a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx & a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \\
b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx
\end{aligned} \tag{34}$$

Denklem (34) için $f(x) = \delta(x - a)$ şeklinde bir fonksiyon göz önüne alınırsa

$$\begin{aligned}
\delta(x - a) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx) \\
a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \delta(x - a) dx = \frac{1}{\pi} H(x - a) = \frac{1}{\pi} \\
a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \delta(x - a) \cos(nx) dx = \frac{1}{\pi} \cos(na) \\
b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx = \frac{1}{\pi} \sin(na)
\end{aligned} \tag{35}$$

ifadeleri geçerlidir. Denklemde geçen $\delta(x)$ ve $H(x)$ terimleri sırasıyla Dirac delta ve Heaviside fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki özelliklere sahiptirler;

$$\begin{aligned}
\delta(x) &= \frac{dH(x)}{dx} \\
H(x - a) &= \begin{cases} 1 & , x > a \\ 0 & , x < a \end{cases}
\end{aligned} \tag{36}$$

gerekli düzenlemeler yapılarak

$$\delta(x-a) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(nx) \cos(na) + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(nx) \sin(na) \quad (37)$$

$$\delta(x-a) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \cos[n(x-a)]$$

(37) nolu denklemde $x \rightarrow \theta$ ve $a \rightarrow \xi$ yapılarak denklem

$$\sum_{n=1}^{\infty} \cos[n(\theta - \xi)] = -\frac{1}{2} + \pi \delta(\theta - \xi) \quad (38)$$

ifadesine ulaşılır. Bu denklem (33)'e yazılarak düzenlenirse

$$\begin{aligned} G(\theta, \xi) &= \sin \xi \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \pi \delta(\theta - \xi) \right] = \pi \delta(\theta - \xi) \sin \xi \\ \frac{\partial G(\theta, \xi)}{\partial \theta} &= \pi \sin(\xi) \frac{\partial \delta(\theta - \xi)}{\partial \theta} = \pi \delta'(\theta - \xi) \sin \xi \end{aligned} \quad (39)$$

olarak bulunur. (39) denklemindeki eşitlikler önce (32) ve (33) denklemlerine ve ardından (31) denkleminde yazılırsa kabuk üzerinde meydana gelen basınç için denklem (40)' a ulaşılır.

$$\begin{aligned} P &= -\rho_f \left[\frac{-2U}{\pi} \int_0^{2\pi} \pi \sin(\xi) \delta(\theta - \xi) \frac{\partial w(\xi, t)}{\partial t} d\xi \right. \\ &\quad \left. - \frac{2U^2}{\pi} \int_0^{2\pi} w(\xi, t) \pi \sin(\xi) \delta'(\theta - \xi) d\xi \right] \\ P &= 2U \rho_f \left[\int_0^{2\pi} \sin(\xi) \delta(\theta - \xi) \frac{\partial w(\xi, t)}{\partial t} d\xi + U \int_0^{2\pi} w(\xi, t) \sin(\xi) \delta'(\theta - \xi) d\xi \right] \end{aligned} \quad (40)$$

Kabuktaki y ve z yönlerindeki çökmeler sırasıyla $v(\theta, t) = v(\theta) e^{i\omega t}$ ve $w(\theta, t) = w(\theta) e^{i\omega t}$ olarak verilsin Bu çökmeler (40) denkleminde yazılırsa silindirik kabuğa etkiyen basıncı zamana bağlı olarak veren denklem

$$\begin{aligned} P &= 2U \rho_f e^{i\omega t} \left[\int_0^{2\pi} i \omega w(\xi) \sin(\xi) \delta(\theta - \xi) d\xi + U \int_0^{2\pi} w(\xi) \sin(\xi) \delta'(\theta - \xi) d\xi \right] \\ P &= 2U \rho_f e^{i\omega t} \left[i \omega w(\theta) \sin(\theta) + U \left\{ \frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} \sin(\theta) + w(\theta) \cos(\theta) \right\} \right] \end{aligned} \quad (41)$$

olacaktır.

SONUÇ

Mevcut çalışmada gibi x yönünde sonsuz uzun olan ve bu yön boyunca iki ucundan basit mesnetlenmiş bir silindirik kabuğun üzerinden akışkan geçişi sırasında meydana gelen basınç analitik olarak bulunmuştur. Göz önüne alınan kabuk malzemesi lineer elastik, homojen ve izotropiktir. Rijit olan xy düzlemine oturan kabuktan uzakta akışkan y yönünde sabit U hızıyla akmaktadır ve akış potansiyellidir. Bulunan basınç ifadesi ilerleyen çalışmalarda kabuğun akış kaynaklı titreşimi olayını incelemekte kullanılabilir.

REFERANSLAR

- Leissa, A.W., (1973), *Vibration of Shells, 1st ed.*, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. USA Library of Congress Catalogue Card Number 77-186367
- Yao, X., 2016, Exact free vibration analysis of open circular cylindrical shells by the method of reverberation-ray matrix, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 17 (4), 295-316
- Blevins, R.D., (2016), *Formulas for dynamics, acoustics and vibration*, 1st ed., John wiley & sons ltd., U.K. , ISBN: 978-1-119-03811-5
- Bracewell R.N., 2000, *The fourier transform and its applications*, 3rd ed., McGraw hill inc., Singapore, ISBN: 0-07-303938-1
- Durak, B., (2018), Kabuk yapılarda akışkan-elastik cisim etkileşiminin teorik incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul: İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gaz Sensörlerinin Sınıflandırılması ve Performans Kriterleri

Enes NAYMAN¹

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL²

- 1- Öğr. Gör. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Söğüt Meslek Yüksekokulu Moda Tasarımı Bölümü. enes.nayman@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3656-3126
- 2- Dr. Öğretim Üyesi; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Söğüt Meslek Yüksekokulu Moda Tasarımı Bölümü. fatih.gozukizil@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1719-959X

ÖZET

Bu çalışma, gaz sensörlerinin performans kriterlerini ve uygulama alanlarını incelemektedir. Algılama hassasiyeti, tepki süresi, seçicilik, kararlılık ve dayanıklılık gibi temel performans kriterleri açıklanmış; farklı gaz sensörü türleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Yarı iletken, elektrokimyasal, katalitik ve optik sensörler, spesifik uygulama gereksinimlerine göre seçilmelidir. Çevresel faktörlerin (sıcaklık, nem, basınç) sensör performansına olan etkileri vurgulanmış; bu faktörlerin dikkate alınmasının önemine değinilmiştir. Sonuç olarak, gaz sensörlerinin geliştirilmesi ve entegrasyonu, güvenilir ölçümler sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Araştırma, gaz algılama sistemlerinin etkinliğini artırmak için düzenli bakım, kalibrasyon ve malzeme bilimindeki yeniliklere yatırım yapılmasının gerekliliğini önermektedir.

Anahtar Kelimeler – Gaz sensörleri, algılama hassasiyeti, çevresel faktörler, tepki süresi, seçicilik, kararlılık

1. GİRİŞ

Gaz sensörleri, farklı çevresel, endüstriyel ve evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve gazların algılanması ile izlenmesine olanak tanıyan cihazlardır. Teknolojinin gelişmesi ile beraber önemi gün geçtikçe artan gaz sensörlerinin farklı gazları tespit etmesi amacıyla çeşitli sensör türleri geliştirilmiştir. (L. Wang vd., 2023), (Khorramifar vd., 2023), (Uma ve Shobana, 2023). Bu sensörler, genellikle çevresel güvenliği sağlamak, tehlikeli gaz sızıntılarını tespit etmek ve havadaki gazların konsantrasyonunu izlemek amacıyla kullanılır (Mathankumar vd., 2023), (Nadargi vd., 2023). Gaz sensörleri, yarı iletken, elektrokimyasal, katalitik, optik ve piezoelektrik gibi farklı çalışma prensiplerine dayanan çeşitli teknolojilerle üretilmiştir (Yurchenko vd., 2024a), (P. Li vd., 2025), (Chu vd., 2024), (Y. Wang vd., 2023), (Nagarjuna ve Hsiao, 2024). Bu sensörlerin performansı, hedef gazın türüne, algılama aralığına, tepki süresine ve çalışma şartlarındaki farklılıklara göre değişkenlik gösterir (S. H. Kim ve Yun, 2023), (Ryu vd., 2023), (Xu vd., 2023).

Sonuç olarak, gaz sensörlerinin çeşitliliği ve her bir sensör türünün kendine özgü avantajları, kullanım alanına ve spesifik ihtiyaçlara göre seçim yapılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, farklı gaz sensörlerinin özelliklerinin ve performanslarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, doğru sensör seçimi ve optimum performans için kritik öneme sahiptir. Örneğin metal oksitler ve 2D geçiş metali dikalkogenitler (TMDC'ler) gibi nanomalzemeleri kullanan gaz sensörleri, geniş yüzey alanları ve düşük gaz konsantrasyonlarını tespit etme yetenekleri nedeniyle üstün performans sergiler. Bu, onları NO₂, CO ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi

tehlikeli gazları izlemek için ideal hale getirir (Barzegar ve Tudu, 2018), (X. Zhang vd., 2020), (Kumar vd., 2020), (Goswami ve Gupta, 2022), (Chen vd., 2019).

Bu çalışmanın amacı, gaz sensörlerinin farklı türlerini tanımlamak ve bu sensörlerin performanslarını değerlendirmektir. Başta metal oksit sensörler, elektrokimyasal sensörler, optik sensörler ve nanomalzemelere dayalı sensörler olmak üzere çeşitli gaz sensörü türleri incelenecek, her birinin avantajları ve sınırlamaları ele alınacaktır. Ayrıca, bu sensörlerin performansını etkileyen faktörler, duyarlılık, seçicilik ve çevresel koşullara dayanıklılık açısından değerlendirilecektir. Bu değerlendirmenin, gelecekteki sensör geliştirme çalışmalarına yön vermesi; daha güvenilir, ekonomik ve enerji verimi sağlayacak sensörlerin geliştirilmesine katkı sağlaması düşünülmektedir.

2. GAZ SENSÖRLERİNİN GENEL SINIFLANDIRILMASI

Gaz sensörleri, algıladıkları gazların türüne, çalışma prensiplerine ve kullanıldıkları yerlerin durumuna göre çeşitli kategorilere ayrılır. Her bir gaz sensörü türü, farklı fiziksel ve kimyasal mekanizmalara dayalı olarak geliştirilmiş olup, belirli gazların tespitine yönelik farklı özelliklere sahiptir. Gaz sensörlerinin sınıflandırılması, genellikle hedef gazın kimyasal yapısı, sensörün çalışma prensibi ve uygulamanın gereksinimleri gibi faktörlere göre yapılır. Bu sınıflandırma, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre doğru sensör türünü seçmelerine imkân sağlar. Farklı çalışma prensiplerine dayalı sensörler, ölçüm hassasiyeti, algılama aralığı, tepki süresi ve çevresel dayanıklılık gibi kriterler açısından da önemli farklılıklar gösterir. Bazı gaz sensörleri, oksitleyici gazların algılanması için tasarlanırken, diğerleri yanıcı, patlayıcı veya toksik gazların tespiti için tasarlanmıştır. Sensörlerin çalışma ortamı ve uygulama koşulları, özellikle endüstriyel tesisler, çevresel izleme sistemleri, otomotiv uygulamaları ve taşınabilir cihazlar gibi çeşitli faaliyet grupları içerisinde önem taşır. Bu nedenle, gaz sensörlerinin sınıflandırılmasında kullanılan başlıca kategoriler, farklı sensör türlerinin avantajlarını, zorluklarını ve kullanım örneklerini ortaya koyarak doğru sensör seçimini kolaylaştırır (Zamansky vd., 2024), (Cui vd., 2024), (Hemalatha ve Gopalakrishnan, 2024), (Sihag vd., 2024).



Şekil 1. Gaz sensörlerinin genel sınıflandırılması

Gaz sensörleri üretim süreçlerine göre, kullanım alanlarına göre, tepkime materyallerinin özelliklerine farklı şekillerde

sınıflandırılabilir. Gaz sensörlerinin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan başlıca kategoriler Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu sensörlere ait açıklamalar şu şekildedir:

2.1. Yarı İletken Gaz Sensörleri

Yarı iletken gaz sensörleri, gazların algılanması için sıklıkla tercih edilen ve çoğunlukla metal oksit yarı iletken malzemeler (örneğin, ZnO, CuO, WO₃) içeren sensörlerdir. Yarı iletken gaz sensörleri, özellikle düşük maliyetleri, yüksek hassasiyetleri ve hızlı tepki süreleri ile dikkat çeker. Ancak, çevresel faktörlerden etkilenmeleri ve belirli bir sıcaklık aralığında çalışmaları gerekmektedir (T vd., 2024), (Xiao vd., 2024), (Gui vd., 2024).

Yarı iletken gaz sensörlerinin çalışma prensibi, gazların yüzeye adsorpsiyonu ve bu süreç sonucunda yarı iletken malzemenin elektriksel iletkenliğinde meydana gelen değişikliklere dayanır. Hedef gaz, sensör yüzeyine adsorbe olduğunda, malzemedeki yük taşıyıcılarının konsantrasyonu değişir ve bu değişim, sensörün çıkışında bir sinyal olarak ölçülür. Bu sinyal, gazın konsantrasyonu ile orantılıdır (Taha vd., 2023), (Nie vd., 2024), (B. Li vd., 2023).

Yarı iletken gaz sensörlerinin avantajları içerisinde düşük maliyet, etkin hassasiyet ve hızlı yanıt süresi yer alır. Düşük konsantrasyonlardaki gazların tespitinde yüksek hassasiyet sunarken, gazların algılanması hızlı gerçekleşir, bu da anlık yanıt gerektiren uygulamalar için büyük bir avantaj sağlar. Dezavantajları ise çevresel faktörlerden etkilenme, yüksek çalışma sıcaklıkları ve kısa ömür gibi unsurları içerir. Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar bu sensörlerin ölçüm doğruluğunu etkileyebilir. Genellikle belirli bir sıcaklık aralığında çalışmaları gerektiğinden enerji tüketimi yüksek olabilir ve malzeme yıpranması nedeniyle uzun süreli kullanımlarda performans kaybı yaşanabilir (Ahmed ve Sinha, 2023), (To vd., 2023).

Bu sensörler ortamdaki zararlı gazların izlenmesi, gaz sızıntılarının tespiti ve akıllı telefonlar gibi taşınabilir cihazlarda hava kalitesinin izlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2. Elektrokimyasal Gaz Sensörleri

Elektrokimyasal gaz sensörleri, gazların algılanması için kimyasal reaksiyonları kullanan sensörlerdir. Bu sensörler, hedef gazın elektrotlar üzerinde meydana getirdiği elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bir elektrik sinyali üretir. Genellikle düşük güç tüketimleri ve yüksek seçicilikleri ile bilinirler, bu da onları özellikle taşınabilir cihazlar ve kişisel güvenlik uygulamaları için uygun hale getirir. Elektrokimyasal sensörler, içinde genellikle iki elektrot ve ayrıca bir elektrolit çözeltisi bulunduran bir hücre yapısına sahiptir. Hedef gaz, elektrotlarla etkileşime geçtiğinde, bu etkileşim sonucunda bir akım oluşturur ve bu akım, gazın konsantrasyonu ile orantılı olarak ölçülür (Y. Zhang vd., 2024), (W. Zhang vd., 2023), (Zhu vd., 2023).

Elektrokimyasal gaz sensörlerinin avantajları arasında yüksek hassasiyet, seçicilik ve düşük enerji tüketimi bulunmaktadır. Bu sensörler,

zehirli gazların (örneğin, karbon monoksit, amonyak ve hidrojen sülfür) tespitinde son derece etkilidir ve bu nedenle endüstriyel alanlarda, güvenlik uygulamalarında ve çevresel izleme sistemlerinde sıklıkla kullanılır. Dezavantajları ise sınırlı ömür, sıcaklık ve nem etkilerine duyarlılık gibi unsurları içermektedir. Elektrokimyasal sensörlerin belirli bir çalışma ömrü vardır ve bu süre, çevresel koşullara bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, aşırı sıcaklık ve nem, sensörlerin performansını olumsuz etkileyebilir (Cowen vd., 2024), (Farquhar vd., 2023), (Serafini vd., 2021).

2.3. Katalitik Gaz Sensörleri

Katalitik gaz sensörleri, genellikle yanıcı ve patlayıcı gazların tespiti için kullanılan bir sensör türüdür. Bu sensörler, hedef gazın katalizör kaplı bir yüzeyde yanması sonucu ortaya çıkan ısıyı algılar. Sensör, iki ana bileşen içerir: bir katalizör ve bir ısı algılama elemanı. Hedef gaz, katalizör yüzeyine adsorbe olduğunda, belirli bir sıcaklıkta yanma reaksiyonu gerçekleşir ve bu yanma süreci sonucunda ısı açığa çıkar. Isı algılama elemanı, bu sıcaklık değişimini ölçerek gazın konsantrasyonunu belirler (Yurchenko vd., 2024b), (R. Wu vd., 2021).

Yüksek hassasiyet, geniş algılama aralığı ve dayanıklılık bu gaz sensörlerinin avantajları arasında yer almaktadır. Özellikle metan, propan ve hidrojeni algılamak için oldukça etkilidir ve çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Düşük maliyetli olmaları ve hızlı tepki süreleri ile de göze çarparlar. Belirli gaz konsantrasyonlarının altında çalışmaması, oksijen seviyesine bağımlılık ve yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymaları gibi özellikleri ise bu sensörlerin dezavantajlarındandır. Ayrıca, sensörlerin kullanıldığı ortamlardaki gaz karışımları, algılama performansını etkileyebilir. Bu sebeple uzun süreli kullanımda, katalizör yüzeyinin kirlenmesi veya yıpranması nedeniyle performans kaybı yaşanabilir (Lyu vd., 2023).

2.4. Optik Gaz Sensörleri

Optik gaz sensörleri, gazların ışık ile etkileşimleri temelinde çalışan sensörlerdir. Bu sensörler, gazların belirli dalga boylarında ışığı absorbe etme veya yayma özelliklerinden faydalanarak, gaz konsantrasyonunu belirler. Optik gaz sensörleri, genellikle absorpsiyon, saçılma veya floresans yöntemlerini kullanarak çalışır. Gaz, ışık kaynağından çıkan ışığı absorbe ettiğinde veya dağıttığında, bu etkileşimlerin analiziyle gazın konsantrasyonu tespit edilir. Optik gaz sensörleri, özellikle yüksek hassasiyet ve doğruluk sunmaları nedeniyle çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir (J. Wu vd., 2020), (Tsizh ve Aksimentyeva, 2020).

Bu sensörler yüksek hassasiyet ve geniş algılama aralığına sahiptirler. Ayrıca çevresel faktörlerden minimum düzeyde etkilenmektedirler. Atmosferik gazların, sera gazlarının ve zararlı emisyonların izlenmesi için oldukça etkili olup, uzun süreli stabilite sağlama kapasitesine sahiptir. Optik gaz sensörleri, çeşitli gazların tespiti için çok sayıda dalga boyu kullanarak çoklu gaz algılama yeteneği sunabilir. Yüksek maliyet, karmaşık yapılar

sahip olmaları ve belirli sıcaklık aralıklarında çalışma gereksinimleri bu sensörlerin negatif yönlerini oluşturmaktadır. Optik sistemler, çevresel koşullardan etkilenebileceğinden, bazı durumlarda kalibrasyon gereksinimleri daha sık olabilir. Ayrıca, geniş bir alanda gaz algılamak için daha fazla ekipman ve teknolojik alt yapı gerektirebilir (Hui Lou vd., 2020), (Deb vd., 2024), (Guglielmi ve Martucci, 2020).

2.5. Piezoelektrik Gaz Sensörleri

Gazların tespitinde piezoelektrik etki prensibine dayanan bir sensör türüdür. Bu sensörler, piezoelektrik malzemelerin mekanik stres altında elektrik yükü üretme özelliklerinden yararlanarak, gazların konsantrasyonunu ölçerler. Temel çalışma prensibi, gaz moleküllerinin sensör yüzeyine adsorbe olması ile başlar. Hedef gazın yüzeye yapışması, malzeme üzerinde bir kütle değişimi oluşturur. Bu kütle değişikliği, piezoelektrik malzemenin mekanik yapısında gerilim oluşturur. Ortaya çıkan bu gerilim, piezoelektrik malzeme üzerinden bir elektrik sinyali olarak ölçülür. Böylece, sensör, gazın konsantrasyonunu belirlemek için bu elektriksel yanıtı kullanır (Verma vd., 2024), (Panda vd., 2024).

Piezoelektrik gaz sensörleri etkin hassasiyet, hızlı cevap süresi ve düşük maliyet bulunur. Tepki süreleri genellikle milisaniyeler düzeyindedir, bu da bu sensörlerin dinamik uygulamalar için uygun olmasını sağlar. Düşük maliyet, piezoelektrik gaz sensörlerini geniş bir uygulama yelpazesine taşıyarak, hem endüstriyel hem de ticari kullanımlar için cazip hale getirir. Ayrıca, bu sensörler, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilme yeteneğine sahiptir, bu da onları farklı çevresel koşullarda kullanılabilir hale getirir. Bazı piezoelektrik sensörler belirli gaz türleri için sınırlı seçici olmakta ve düşük performans sergilemektedir. Çevresel koşullar, özellikle sıcaklık ve nem, sensörün performansını etkileyebilir. Bu nedenle, piezoelektrik gaz sensörlerinin kullanıldığı uygulamalarda kalibrasyon ve ortam koşullarının kontrolü önemlidir. Ayrıca, uzun süreli kullanımlarda piezoelektrik malzemelerin özelliklerinde deformasyonlar yaşanabilir, bu da zamanla performans kaybına neden olabilir (Y. Sun vd., 2024).

3. GAZ SENSÖRLERİNİN GENEL SINIFLANDIRILMASI

Gaz sensörlerinin performans kriterleri, sensörlerin etkinliğini, doğruluğunu ve güvenilirliğini belirleyen temel özelliklerdir. Bu kriterler, gaz sensörlerinin tasarımından uygulama alanına kadar birçok faktörü etkileyebilir ve seçilen sensör tipinin uygulama için uygunluğunu belirlemede hayati bir öneme sahiptir.

3.1. Algılama Hassasiyeti

Algılama hassasiyeti, gaz sensörlerinin belirli bir gazın konsantrasyonundaki değişiklikleri ne ölçüde doğru bir şekilde algıladığını tanımlayan önemli bir performans kriteridir. Bu kavram, sensörlerin gerçek uygulama senaryolarında güvenilirliğini ve etkinliğini belirleyen önemli bir

ölçüttür. Yüksek hassasiyet, sensörlerin çok düşük gaz konsantrasyonlarını bile etkili bir şekilde tespit edebilme yeteneğini ifade eder. Özellikle insan hayatı için düşük konsantrasyonu bile zararlı olan gazların hızlı bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple algılama hassasiyeti yüksek olan sensörlerin kullanılması bazı potansiyel risklerin azaltılması ya da önüne geçilmesini sağlayacaktır.

Algılama hassasiyeti, gaz sensörlerinin malzeme ve yapı özellikleri ile yakından ilişkilidir. Sensör yüzeyinde bulunan aktif bölgelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, hedef gaz moleküllerinin adsorpsiyonunu ve etkileşimini doğrudan etkiler. Örneğin, yarı iletken sensörlerde kullanılan malzemelerin yüzey alanı ve yüzey yapısı, gaz moleküllerinin sensörle etkileşimini artırarak hassasiyeti yükseltebilir. Bunun yanı sıra, sensörlerin çalışma sıcaklıkları, çevresel koşullar ve kalibrasyon süreci de algılama hassasiyetini etkileyen faktörler arasında yer alır.

Gaz sensörlerinin algılama hassasiyetini artırmak için çeşitli teknikler ve yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında, sensör yüzeyinin modifikasyonu, katmanlı yapıların kullanımı ve nanomateriallerin entegrasyonu gibi yenilikçi yaklaşımlar bulunmaktadır. Örneğin, nanomaterialler, büyük yüzey alanları ve yüksek reaktivite özellikleri sayesinde gazların sensör yüzeyine daha etkin bir şekilde adsorbe olmasını sağlar, bu da algılama hassasiyetini artırır. Ayrıca, duyarlılığı artırmak için sensörlerin çalışma koşullarının iyileştirilmesi de önemlidir. Örneğin, çalışma sıcaklığı, hedef gazın özelliklerine göre ayarlanarak algılama hassasiyeti artırılabilir.

Algılama hassasiyeti, sensörlerin performansını değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli bir parametre olmasının yanı sıra, uygulama spesifikasyonlarına da doğrudan etki eder. Farklı uygulamalar, farklı hassasiyet gereksinimlerine sahip olabilir; örneğin, endüstriyel gaz sızıntı tespiti, çevresel hava kalitesi izleme gibi alanlarda yüksek hassasiyet şartken, bazı uygulamalarda daha düşük hassasiyet kabul edilebilir olabilir. Bu nedenle, sensörlerin seçimi sırasında algılama hassasiyetinin belirlenmesi ve ihtiyaçlara uygun bir sensör tipinin seçilmesi kritik bir adım olarak öne çıkar. Yüksek hassasiyetli gaz sensörleri, hedef gazların doğru ve güvenilir bir şekilde algılanmasını sağlayarak, hem insan sağlığını hem de çevre güvenliğini korumaya yardımcı olur (Zamansky vd., 2023), (Krishna vd., 2023), (Sultana vd., 2024), (Odebowale vd., 2024), (Wei vd., 2024).

3.2. Tepki Süresi

Gaz sensörlerinin belirli bir gazın konsantrasyonundaki değişikliklere ne kadar hızlı yanıt verdiğini tanımlayan önemli bir performans kriteridir. Bu kavram, sensörün çevresel değişikliklere karşı ne ölçüde hızlı tepki verebildiğini ve dolayısıyla gerçek zamanlı izleme uygulamalarında ne kadar etkin olabileceğini belirler. Tepki süresi, genellikle sensörün belirli bir gazın konsantrasyonundaki değişimi algılaması ile bu değişikliğe uygun bir çıkış sinyali üretmesi arasındaki süre olarak ifade edilir. Kısa tepki süresi, gaz

sızıntıları gibi acil vakaların tespiti ve önlenmesi için önem taşır; bu, hem insan güvenliğini sağlamak için hem de çevresel koruma için hayati bir faktördür.

Tepki süresinin belirlenmesinde etkili olan birçok faktör bulunmaktadır. Sensör malzemesi, tepki süresine direkt olarak etki eder. Farklı gazların adsorpsiyon ve desorpsiyon hızları, sensörün tepki süresini doğrudan etkiler. Örneğin, yarı iletken sensörlerde kullanılan malzemelerin yüzey özellikleri, gazların yüzeye ne derece seri bir şekilde bağlandığını ve ayrıldığını belirler. Ayrıca, sensör tasarımı ve yapı özellikleri de tepki süresini etkileyen diğer önemli unsurlardır. Örneğin, ince film veya nanomaterial kullanımı, gazın sensörle etkileşimini hızlandırarak tepki süresini kısaltabilir.

Çalışma sıcaklığı, sensörün tepki süresini belirleyen bir diğer faktördür. Genellikle, sensörler yüksek sıcaklıklarda daha hızlı tepki verme eğilimindedir, çünkü sıcaklık arttıkça gaz moleküllerinin kinetik enerjisi de artar, bu da adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini hızlandırır. Ancak, yüksek sıcaklıkların bazı sensörler üzerindeki etkileri dikkatlice değerlendirilmelidir; aşırı sıcaklıklar, bazı malzemelerin yapısında bozulmaya yol açabilir.

Kalibrasyon süreci de tepki süresi üzerinde etkili olabilir. Düzenli kalibrasyon, sensörlerin doğru ve güvenilir ölçümler yapabilmesi için gereklidir. Kalibrasyon sırasında sensörün yanıt süresi ve hassasiyeti iyileştirilebilir. Böylece uzun süreli kullanımda performansın korunmasına yardımcı olur. Bunun yanı sıra, çevresel faktörler de tepki süresini etkileyebilir. Sıcaklık, nem ve gaz karışımı gibi dış etmenler, sensörün performansını ve tepki süresini belirlemede önemli rol oynar (Molina vd., 2020), (C. Sun vd., 2023), (Afsharmanesh vd., 2024).

3.3. Seçicilik

Seçicilik, gaz sensörlerinin belirli bir gazı diğer gazlardan ayırt etme yeteneğini tanımlayan önemli bir performans kriteridir. Bu kavram, sensörün hedef gazın varlığında doğru ve güvenilir ölçümler yapabilme kapasitesini ifade eder. Yüksek seçiciliğe sahip bir sensör, hedef gazın yanı sıra, çevrede bulunan diğer gazların etkisi altında yanlış alarmlar vermeden doğru ölçümler yapabilir. Bu özellik, özellikle karmaşık gaz karışımlarının bulunduğu ortamlarda, örneğin endüstriyel tesislerde veya atmosferik hava analizlerinde kritik öneme sahiptir. Seçicilik, sensör tasarımının birçok yönünden etkilenir. Sensör malzemesi, seçiciliği belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Kullanılan malzeme, belirli gaz molekülleriyle etkileşim kurma yeteneği açısından farklılık gösterir. Örneğin, bazı yarı iletken malzemeler, belirli gazları algılayabilen yüzey özelliklerine sahip olabilir. Bu malzemeler, hedef gazın yanı sıra diğer gazlarla da etkileşimde bulunabilir, bu da sensörün seçiciliğini azaltabilir. Bu nedenle, seçilecek malzeme, hedef gazın moleküler yapısına ve özelliklerine uygun olarak seçilmelidir.

Sensör yüzeyinin modifikasyonu, seçiciliği artırmanın bir başka yoludur. Yüzey modifikasyonu, sensör yüzeyine belirli kimyasal grupların veya kaplamaların eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bu tür modifikasyonlar, belirli gaz moleküllerinin sensör yüzeyine daha etkili bir şekilde adsorbe olmasını sağlayarak, diğer gazlarla olan etkileşimlerini azaltabilir. Ayrıca, çalışma koşulları, sensörün seçiciliği üzerinde etkili olabilir. Çalışma sıcaklığı, nem seviyesi ve gaz akış hızı gibi faktörler, sensörün hedef gazı algılama yeteneğini etkileyebilir.

Çevresel faktörler, sensörün seçiciliğini etkileyen bir diğer önemli unsurdur. Farklı gazların bulunduğu karmaşık ortamlarda, sensörlerin doğru ölçüm yapabilmesi için çevresel koşulların gerekli şartları sağlamalıdır. Aksi halde, hedef gazın algılanması zorlaşabilir veya yanlış alarmlar meydana gelebilir. Seçicilik, ayrıca sensörün yanıt süresi ile de ilişkilidir; hızlı yanıt veren bir sensör, çevredeki gazların değişimlerine daha çabuk adapte olarak, doğru ölçümler yapma yeteneğini artırabilir (J. Li vd., 2024), (Saruhan vd., 2023), (Wawrzyniak, 2023), (Chowdhury ve Bhowmik, 2021), (Walker vd., 2022).

3.4. Kararlılık ve Dayanıklılık

Kararlılık ve dayanıklılık, gaz sensörlerinin uzun süreli ve güvenilir performans sergileyebilmesi ifade eden önemli özelliklerdendir. Kararlılık, sensörün belirli bir zaman diliminde performansını koruyabilme yeteneğini ifade eder. Yüksek kararlılığa sahip bir sensör, zamanla ölçüm hassasiyetini ve tepki süresini koruyarak, sürekli ve doğru veriler sağlamalıdır. Özellikle madencilik, petrol rafineleri, solunum cihazları gibi gaz hassasiyetlerindeki küçük değişimlerin bile hayati tehlikelerinin büyük boyutlara ulaşabileceği alanlarda sensör kararlılığının ne derece bir önem ihtiva ettiği anlaşılmaktadır. Gaz sensörlerinin tepki verdiği gazlara karşı tepki süresi içerisinde doğru oranlarda bir uyarı vermesi ve gazların tahliye edilmesi sonrasında eski haline geri dönmesi gerekmektedir. Kararlılık bu sürecin bir döngü halinde devam etmesi halinde bile sensör hassasiyetlerinin algılama kapasitesi bozulmayacak şekilde çalışmasına devam etmesini bir anlamda ifade eder. Yani kararlılık kısaca gaz sensörü sürekli çalışsa bile ürün ömrü dolmadan uzun bir zaman diliminde hala doğru karar verebilecek seviyede olmasıdır.

Dayanıklılık, sensörün çevresel faktörlere karşı gösterdiği dirençtir. Gaz sensörleri, genellikle zorlu koşullarda çalışmak zorunda kalır; sıcaklık, nem, basınç gibi değişken çevresel etmenler, sensör performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Dayanıklı sensörler, bu tür koşullara dayanarak, doğru ölçümler yapabilme yeteneğini sürdürür. Gaz sensörlerinin dayanıklılığı, malzeme seçiminden tasarım özelliklerine kadar birçok faktörden etkilenir. Örneğin, yüksek sıcaklık ve kimyasal etkilere dayanıklı malzemelerin kullanımı, sensörün dayanıklılığını artırabilir. Kullanıldıkları sanayi faaliyetleri ve coğrafi koşullar gibi farklı etmenler sebebiyle sensörlerin maruz kaldığı etkiler gerek elektronik bileşenlerine gerekse sensör tepkime

malzemelerine zarar verebilmektedir. Bu etkiler bir ya da daha fazla etmenin bir araya gelmesiyle gerçekleşebilir. Bu sebeple sensörlerin dayanıklılık özelliği kullanılacak alanlara bağlı olarak geliştirilmeli ve bu amaçlara yönelik üretimleri yapılmalıdır.

Uzun ömür, sensörün dayanıklılığı ile doğrudan ilişkilidir. Uzun ömürlü sensörler, çalışma koşullarında minimum performans kaybı yaşar ve sık sık kalibrasyon gerektirmeden uzun süre kullanılabilir. Bu durum, hem ekonomik açıdan avantaj sağlar hem de bakım maliyetlerini azaltır. Sensörlerin uzun ömürlü olması, geniş bir kitleye hitap eden bireysel uygulamalar, kamu alanlarında ve askeri faaliyetlerin olduğu alanlar içinde ayrıca önem arz etmektedir.

Kararlılık, dayanıklılık ve uzun ömürlülük özellikleri, sensörlerin performansını artırmak için gerekli olan özelliklerdir ve bunlar bir sensörde ideal bir ölçüm için en iyi seviyede olmalıdır. Örneğin, metal oksit yarıiletken bir gaz sensörü birkaç farklı alternatif metal oksitten üretilebiliyorsa, burada sensörün kullanılacağı yerlere göre en dayanıklı metal oksitin kullanılması sensör dayanımı ve ömrünü pozitif yönde etkileyecektir. Ya da bir sensörün tepki malzemesi haricinde sensörü koruyan dış kapak ve diğer yardımcı bileşenlerin de üretildiği malzemenin türü bu özellikleri etkileyecektir. Sensör tasarımında, çalışma koşullarının ve çevresel etkilerin dikkate alınması, bu iki parametreyi iyileştirebilir. Ayrıca, sensörlerin üretim sürecinde kalite kontrol ve test süreçleri, kararlılık ve dayanıklılık açısından büyük bir rol oynar. Bu nedenle, üretim aşamasında malzeme kalitesi, üretim teknikleri ve tasarım özellikleri, sensörlerin genel performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Zheng vd., 2024), (K.-H. Kim vd., 2024), (Ansari vd., 2023), (X. D. Li ve Huang, 2024).

3.5. Çevresel Faktörlerin Etkisi

Çevresel faktörler, sensörlerin algılama hassasiyetini, tepki süresini, seçiciliğini ve genel güvenilirliğini doğrudan etkileyerek gaz sensörlerinin ölçüm performansına zarar verebilmektedirler. Bazı ortam koşulları bu durumun aksine pozitif yönde de etki edebilmektedir. Sıcaklık, gaz sensörlerinin en önemli çevresel faktörlerinden biridir. Sensörlerin çalışma sıcaklığı, gaz moleküllerinin kinetik enerjisini etkileyerek adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini hızlandırabilir. Ancak, aşırı sıcaklıklar bazı sensörlerin malzemelerini bozabilir veya performanslarını olumsuz yönde etkileyebilir, bu nedenle uygun çalışma sıcaklıklarının belirlenmesi gereklidir.

Nem, gaz sensörlerinin performansını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yüksek nem seviyeleri, sensör yüzeyinde su buharı birikmesine neden olarak, gaz moleküllerinin sensörle etkileşimini engelleyebilir veya yanlış alarmlara yol açabilir. Özellikle elektrokimyasal sensörler, nemin etkisine karşı duyarlıdır ve bu nedenle nem seviyesinin kontrol edilmesi gerekebilir. Diğer taraftan, bazı sensörler, nemin varlığında daha iyi performans gösterirken, diğerleri için nemin etkisi olumsuz olabilir.

Farklı gaz konsantrasyonları ve karışımlarında, basınç değişiklikleri sensörlerin algılama yeteneğini etkileyebilir. Yüksek basınç altında, gaz moleküllerinin yoğunluğu artar ve bu durum, sensörlerin algılama hassasiyetini değiştirebilir. Bunun yanı sıra, gaz karışımları içinde bulunan diğer bileşenlerin varlığı da sensörlerin algılama yeteneğini etkileyebilir. Özellikle, karmaşık gaz karışımlarında, hedef gazın algılanması zorlaşabilir, bu nedenle sensörlerin seçiciliği ve tepki süreleri dikkate alınmalıdır. Bu nedenle yine gaz sensörlerinin kullanılacağı alanların mevcut ortam şartlarının detaylı olarak bilinmesi hedef gazın doğru ve verimli bir şekilde algılanmasını sağlar.

Kimyasal etkileşimler, çevresel faktörler arasında önemli bir yer tutar. Gaz sensörleri, çevredeki diğer gazlarla etkileşime girdiğinde, hedef gazların algılanmasında zorluklar yaşayabilir. Örneğin, bazı gazlar, sensör yüzeyinde bulunan malzemelerle reaksiyona girerek, ölçüm hassasiyetini azaltabilir veya yanlış sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, sensörlerin tasarımında kullanılan malzemelerin kimyasal dayanıklılığı ve seçiciliği göz önünde bulundurulmalıdır.

Son olarak, çevresel kirlilik de gaz sensörlerinin performansını etkileyen bir faktördür. Hava kalitesinin kötüleşmesi, sensörlerin algılama yeteneklerini olumsuz etkileyebilir ve bu durum, yanlış alarmlara veya düşük hassasiyetli ölçümlere yol açabilir. Bu tür durumlarda, sensörlerin kalibrasyon gereksinimleri artar ve bu da daha fazla bakım ve kontrol gerektirir.

Sonuç olarak, çevresel faktörlerin gaz sensörleri üzerindeki etkileri, performanslarını ve güvenilirliklerini belirleyen önemli unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Sensör tasarımında ve uygulamalarında, bu faktörlerin dikkate alınması, doğru ve güvenilir ölçümlerin elde edilmesi için gereklidir. Uygulama alanlarına göre çevresel koşulların sensörlerin adaptasyon sağlayabileceği şekilde değiştirilmesi veya sensörlerin mevcut şartlara uyum sağlayabilecek şekilde üretilmeleri gerekir. Bu durum genellikle sensörleri açık veya kapalı alanlarda kullanımına bağlıdır ve karşılıklı olarak değiştirilebilir (Hooshmand vd., 2023), (Y. Li vd., 2024), (Najafi ve Ghaemi, 2024).

4. GAZ SENSÖRLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Gaz sensörlerinin performanslarını anlayabilmek için; farklı sensör türlerinin algılama özelliklerini, hassasiyetlerini, tepki sürelerini ve çevresel faktörlere karşı dayanıklılıklarını analiz edilmelidir. Sonrasında seçenekleri bulunan bu sensörlerin uygulama yerlerine göre en uygun olanı seçilmelidir. Her sensörün, avantajları ya da dezavantajları bulunmaktadır, bu da belirli uygulamalarda hangi sensörün en iyi performansı göstereceğini etkiler.

Yarı iletken sensörler, genellikle yüksek hassasiyet ve hızlı tepki süreleri sunarken, elektrokimyasal sensörler daha yüksek seçicilik ve dayanıklılık sağlar. Katalitik sensörler, özellikle yanıcı gazların algılanmasında etkilidir, ancak çevresel koşullara karşı hassasiyetleri nedeniyle sınırlı kullanım alanlarına sahiptir. Optik sensörler, gaz algılamada düşük konsantrasyonlarda yüksek hassasiyet sunar, ancak genellikle daha yüksek maliyet ve karmaşık tasarım gereksinimleri ile ilişkilidir.

Performans değerlendirmesi, sadece sensörlerin teknik niteliklerini değil, aynı zamanda kullanım koşullarını da göz önünde bulundurmalıdır. Farklı sensörlerin çevresel koşullara yanıt verme yetenekleri, uzun ömürleri ve bakım gereksinimleri, değerlendirme aşamasında kritik rol alır. Bu karşılaştırma, sensör seçiminde daha doğru kararlar alınmasını sağlar, böylece hem ekonomik verimlilik hem de uygulama başarısı artırılabilir.

Spesifik uygulamalar için en ideal gaz sensör türleri, algılanacak gazın doğasına, ortam koşullarına ve gerekli hassasiyet düzeyine bağlı olarak değişiklik gösterir. Endüstriyel gaz algılama uygulamaları için, genellikle katalitik gaz sensörleri tercih edilir. Bu sensörler, yanıcı gazların algılanmasında yüksek performans sunar ve genellikle patlama riskinin yüksek olduğu ortamlarda kullanılır. Katalitik sensörler, gazların varlığını tespit etmekte etkili olmaları nedeniyle güvenlik sistemlerinde yaygın olarak yer alır.

Toksik gazların algılanmasında, özellikle elektrokimyasal sensörler öne çıkar. Bu sensörler, yüksek seçicilik ve doğruluk sunarak, karbondioksit, karbonmonoksit, amonyak gibi zararlı gazları etkin olarak belirler. Elektrokimyasal sensörler, genellikle düşük enerji tüketimi ile çalıştıkları için, sürekli izleme sistemlerinde ideal bir seçimdir.

Hava kalitesi izleme için ise yarı iletken gaz sensörleri sıkça kullanılır. Bu sensörler, çeşitli gazları algılayabilme yetenekleri ve uygun maliyetleri ile dikkat çeker. Hava kalitesi uygulamalarında, genellikle birkaç farklı gazın aynı anda izlenmesi gerektiği için, yarı iletken sensörlerin çok yönlülüğü önemli bir avantaj sağlar.

Düşük konsantrasyonlu gazların algılanmasında, optik gaz sensörleri en ideal seçimdir. Bu sensörler, özellikle çevresel hava analizlerinde ve laboratuvar uygulamalarında kullanılır. Optik sensörler, gazların absorpsiyon özelliklerine dayanarak çalıştıkları için, düşük konsantrasyonlarda bile yüksek hassasiyet sunarlar.

Sonuç olarak, her bir gaz sensör türü, spesifik uygulama ihtiyaçlarına göre seçilmelidir. Uygulama koşulları, algılanacak gazın özellikleri ve gereksinim duyulan hassasiyet düzeyi, sensör seçiminde dikkate alınması gereken temel unsurlardır. Doğru sensör seçimi, hem güvenilir ölçümler sağlamak hem de uygulamanın etkinliğini artırmakta kritik bir rol oynamaktadır.

5. SONUÇ

Gaz sensörlerinin iyileştirilmesi ve modernizasyonu, verimliliklerinin değerlendirmesi ve uygulama işlevselliği itibarıyla mühim bir temel oluşturur. Gaz sensörleri, çeşitli endüstriyel, çevresel ve sağlık uygulamalarında hayati bir rol oynayarak güvenlik ve izleme sistemlerinin etkinliğini artırmaktadır. Farklı sensör türleri, algılama kriterleri, malzeme nitelikleri ve çalışma şartları bakımından çeşitlilik göstermektedir. Yarı iletken, elektrokimyasal, katalitik, optik ve piezoelektrik gaz sensörleri, belirli gazların tespiti için özel olarak tasarlanmış çeşitli performans kriterlerine sahiptir. Her bir sensör tipinin avantajları ve dezavantajları, uygulama alanlarına göre belirli bir öncelik sırası gerektirmektedir. Örneğin, endüstriyel alanlarda genellikle yanıcı gazların algılanmasında katalitik sensörler tercih edilirken, toksik gazların tespitinde elektrokimyasal sensörler daha fazla tercih edilmektedir.

Çevresel faktörlerin sensör performansı üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. Sıcaklık, nem, basınç ve kimyasal etkileşimler, sensörlerin algılama hassasiyetini, tepki süresini ve seçiciliğini doğrudan etkileyebilir. Bu etkenlerin göz önünde bulundurulması, özellikle sürekli izleme uygulamalarında sensörlerin güvenilirliğini artırmak için kritik bir unsurdur. Ayrıca, gaz algılama sistemlerinin kararlılığı ve dayanıklılığı, uzun süreli performanslarını sürdürebilmeleri açısından önemlidir. Yüksek kararlılık, sensörlerin kalibrasyon gereksinimlerini azaltırken, uzun ömürleri de uygulama maliyetlerini düşürmektedir.

Gaz sensörlerinin geliştirilmesi sürecinde performans kriterleri iyileştirilmekte ve yeni teknolojilerin entegrasyonu sağlanmaktadır. Özellikle malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler, sensörlerin hem duyarlılığını hem de dayanıklılığını artırarak daha geniş bir uygulama yelpazesine ulaşmalarını sağlayabilir. Ayrıca, çoklu gaz algılama yeteneklerine sahip entegre sensör sistemlerinin geliştirilmesi birçok faaliyet alanında büyük bir avantaj sunacaktır.

Sonuç olarak, gaz sensörleri seçiminde uygulama gereksinimlerinin net bir şekilde belirlenmesi, çevresel koşulların dikkate alınması ve düzenli bakım ile kalibrasyon süreçlerinin uygulanması gerektiği vurgulanmalıdır.

REFERANSLAR

- Afsharmanesh, E., Haratizadeh, H., Bagheri, F. 2024. "Self-powered, highly selective and fast response time ammonia gas sensors based on an rGO/SnO₂ nanocomposite". *Sensors and Actuators A: Physical*, 379, 115963.
- Ahmed, S., Sinha, S. K. 2023. "Studies on nanomaterial-based p-type semiconductor gas sensors". *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 24975–24986.
- Ansari, H. R., Mirzaei, A., Shokrollahi, H., Kumar, R., Kim, J. Y., Kim, H. W., ... Kim, S. S. 2023. "Flexible/wearable resistive gas sensors based on 2D materials". *Journal of Materials Chemistry C*, 11(20), 6528–6549.
- Barzegar, M., Tudu, B. 2018. "Two-dimensional materials for gas sensors: From first discovery to future possibilities". *Surface Innovations*, 6(4–5), 205–230.
- Chen, W. Y., Yen, C. C., Xue, S., Wang, H., Stanciu, L. A. 2019. "Surface Functionalization of Layered Molybdenum Disulfide for the Selective Detection of Volatile Organic Compounds at Room Temperature". *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(37), 34135–34143.
- Chowdhury, N. K., Bhowmik, B. 2021. "Micro/nanostructured gas sensors: the physics behind the nanostructure growth, sensing and selectivity mechanisms". *Nanoscale Advances*, 3(1), 73–93.
- Chu, Y. L., Ji, L. W., Xie, J. H., Chu, T. Te. 2024. "High-Sensitivity of Self-Powered Gas Sensors Based on Piezoelectric Nanogenerators with Y-Doped 1-D ZnO Nanostructures". *IEEE Sensors Journal*, 24(12), 18731–18739.
- Cowen, T., Grammatikos, S., Cheffena, M. 2024. "Molecularly imprinted polymer nanoparticle-carbon nanotube composite electrochemical gas sensor for highly selective and sensitive detection of methanol vapour". *Analyst*, 149(8), 2428–2435.
- Cui, Z., Wang, H., Yang, K., Shen, Y., Qin, K., Yuan, P., Li, E. 2024. "Highly Sensitive and Selective Defect WS₂ Chemical Sensor for Detecting HCHO Toxic Gases". *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 762, 24(3), 762.
- Deb, S., Mondal, A., Ashok Kumar Reddy, Y. 2024. "Review on development of metal-oxide and 2-D material based gas sensors under light-activation". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 30, 101160.
- Farquhar, A. K., Henshaw, G. S., Williams, D. E. 2023. "Errors in ambient gas concentration measurement caused by acoustic response of electrochemical gas sensors". *Sensors and Actuators A: Physical*, 354, 114254.
- Goswami, P., Gupta, G. 2022. "Recent progress of flexible NO₂ and NH₃ gas sensors based on transition metal dichalcogenides for room temperature sensing". *Materials Today Chemistry*, 23, 100726.
- Guglielmi, M., Martucci, A. 2020. "Optical gas sensors". *Sol-Gel Derived Optical and Photonic Materials*, 271–292.
- Gui, Y. H., Tu, Y. S., Guo, H. S., Qin, X. Y., Tian, K., Qin, X. M., ... Guo, X. 2024. "Microwave-assisted efficient synthesis of ZnO nanospheres for low temperature NO₂ gas sensor". *Materials Science and Engineering: B*, 299, 117031.
- Hemalatha, E., Gopalakrishnan, N. 2024. "Study of doping effect of Cd on ZrO₂ nanostructures for gas sensing applications". *Physica Scripta*, 99(11), 115923.
- Hooshmand, S., Kassanos, P., Keshavarz, M., Duru, P., Kayalan, C. I., Kale, İ., Bayazit, M. K. 2023. "Wearable Nano-Based Gas Sensors for Environmental

- Monitoring and Encountered Challenges in Optimization". *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 8648, 23(20), 8648.
- Hui Lou, Q., Hai Niu, H., Chen, J., -, al, Sharma, N., Li, Z., ... R Heck, M. J. 2020. "Opportunities for photonic integrated circuits in optical gas sensors". *Journal of Physics: Photonics*, 2(1), 012002.
- Khorramifar, A., Karami, H., Lvova, L., Kolouri, A., Łazuka, E., Piłat-Rożek, M., ... Darvishi, Y. 2023. "Environmental Engineering Applications of Electronic Nose Systems Based on MOX Gas Sensors". *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 5716, 23(12), 5716.
- Kim, K.-H., Jo, M.-S., Kim, S.-H., Kim, B., Kang, J., Yoon, J.-B., Seo, M.-H. 2024. "Long-term reliable wireless H₂ gas sensor via repeatable thermal refreshing of palladium nanowire". *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 1–9.
- Kim, S. H., Yun, K. S. 2023. "Room-temperature hydrogen gas sensor composed of palladium thin film deposited on NiCo₂O₄ nanoneedle forest". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 376, 132958.
- Krishna, K. G., Umadevi, G., Parne, S., Pothukanuri, N. 2023. "Zinc oxide based gas sensors and their derivatives: a critical review". *Journal of Materials Chemistry C*, 11(12), 3906–3925.
- Kumar, R., Goel, N., Hojamberdiev, M., Kumar, M. 2020. "Transition metal dichalcogenides-based flexible gas sensors". *Sensors and Actuators A: Physical*, 303, 111875.
- Li, B., Liu, H., Zeng, Q., Dong, S., Feng, W. 2023. "Hierarchical porous NiO doped ZnO nanocomposite for formaldehyde gas sensor with high sensitivity, fast response/recovery and good selectivity". *Surfaces and Interfaces*, 36, 102502.
- Li, J., Zhao, H., Wang, Y., Zhou, Y. 2024. "Approaches for selectivity improvement of conductometric gas sensors: an overview". *Sensors & Diagnostics*, 3(3), 336–353.
- Li, P., Li, J., Song, S., Chen, J., Zhong, N., Xie, Q., ... Karimi-Maleh, H. 2025. "Recent advances in optical gas sensors for carbon dioxide detection". *Measurement*, 239, 115445.
- Li, X. D., Huang, H. X. 2024. "Flexible and Multifunctional Pressure/Gas Sensors with Polypyrrole-Coated TPU Hierarchical Array". *ACS applied materials & interfaces*, 16(39), 53072–53082.
- Li, Y., Yuan, Z., Ji, H., Meng, F., Wang, H. 2024. "Response Surface Method Analysis of Gas-Sensitive Properties: Investigating the Influence of External Environment on the Performance of Semiconductor Gas Sensors". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(9), 11661–11670.
- Lyu, X., Gao, H., Diehle, P., Altmann, F., Schmitt, K., Tarantik, K., Wöllenstein, J. 2023. "Towards Low Temperature Operation of Catalytic Gas Sensors: Mesoporous Co₃O₄-Supported Au–Pd Nanoparticles as Functional Material". *Nanomaterials* 2023, Vol. 13, Page 2192, 13(15), 2192.
- Mathankumar, G., Harish, S., Mohan, M. K., Bharathi, P., Kannan, S. K., Archana, J., Navaneethan, M. 2023. "Enhanced selectivity and ultra-fast detection of NO₂ gas sensor via Ag modified WO₃ nanostructures for gas sensing applications". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 381, 133374.
- Molina, A., Escobar-Barrios, V., Oliva, J. 2020. "A review on hybrid and flexible CO₂ gas sensors". *Synthetic Metals*, 270, 116602.
- Nadargi, D. Y., Umar, A., Nadargi, J. D., Lokare, S. A., Akbar, S., Mulla, I. S., ...

- Chaskar, M. G. 2023. "Gas sensors and factors influencing sensing mechanism with a special focus on MOS sensors". *Journal of Materials Science* 2022 58:2, 58(2), 559–582.
- Nagarjuna, Y., Hsiao, Y. J. 2024. "TeO₂ doped ZnO nanostructure for the enhanced NO₂ gas sensing on MEMS sensor device". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 401, 134891.
- Najafi, P., Ghaemi, A. 2024. "Chemiresistor gas sensors: Design, Challenges, and Strategies: A comprehensive review". *Chemical Engineering Journal*, 498, 154999.
- Nie, S., Tao, L., Li, J., Wang, W., Poldorn, P., He, Y., ... Wu, M. 2024. "A single response to reducing gases by NiO-TiO₂ heterojunction nanocrystals". *Applied Surface Science*, 644, 158821.
- Odebowale, A. A., Abdulghani, A., Berhe, A. M., Somaweera, D., Akter, S., Abdo, S., ... Hattori, H. T. 2024. "Emerging Low Detection Limit of Optically Activated Gas Sensors Based on 2D and Hybrid Nanostructures". *Nanomaterials* 2024, Vol. 14, Page 1521, 14(18), 1521.
- Panda, S., Mehlawat, S., Dhariwal, N., Sanger, A., Kumar, A. 2024. "Comprehensive review on gas sensors: Unveiling recent developments and addressing challenges". *Materials Science and Engineering: B*, 308, 117616.
- Ryu, J., Shim, S., Song, J., Park, J., Kim, H. S., Lee, S. K., ... Kang, S. W. 2023. "Effect of Measurement System Configuration and Operating Conditions on 2D Material-Based Gas Sensor Sensitivity". *Nanomaterials*, 13(3), 573.
- Saruhan, B., Fomekong, R. L., Nahiriak, S. 2023. "High-Sensitivity and -Selectivity Gas Sensors with Nanoparticles, Nanostructures, and Thin Films". *Chemosensors* 2023, Vol. 11, Page 81, 11(2), 81.
- Serafini, M., Mariani, F., Gualandi, I., Decataldo, F., Possanzini, L., Tessarolo, M., ... Scavetta, E. 2021. "A wearable electrochemical gas sensor for ammonia detection". *Sensors*, 21(23), 7905.
- Sihag, S., Dahiya, R., Rani, S., Berwal, P., Jatrana, A., Sisodiya, A. K., ... Kumar, V. 2024. "Low ppm NO₂ detection through advanced ultrasensitive copper oxide gas sensor". *Discover Nano*, 19(1), 1–14.
- Sultana, R., Wang, S., Abbasi, M. S., Shah, K. A., Mubeen, M., Yang, L., ... Han, Y. 2024. "Enhancing sensitivity, selectivity, and intelligence of gas detection based on field-effect transistors: Principle, process, and materials". *Journal of Environmental Sciences*.
- Sun, C., Liu, H., Shao, J., Pan, G., Yang, X., Wang, M., ... Qi, Y. 2023. "Au-loaded Zn₂SnO₄/SnO₂/ZnO nanosheets for fast response and highly sensitive TEA gas sensors". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 376, 132951.
- Sun, Y., Zhao, Y., Zhang, Y. 2024. "Cadmium Sulfide Coated Micro-Nano Fiber Optic Sensor for Ammonia Gas Sensing". 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks, ICOCN 2024.
- T, R. B., Yadav, P. V. K., Mondal, A., Ramakrishnan, K., Jarugala, J., Liu, C., Reddy, Y. A. K. 2024. "Enhanced response of WO₃ thin film through Ag loading towards room temperature hydrogen gas sensor". *Chemosphere*, 353, 141545.
- Taha, T. A., Saad, R., Zayed, M., Shaban, M., Ahmed, A. M. 2023. "Tuning the surface morphologies of ZnO nanofilms for enhanced sensitivity and selectivity of CO₂ gas sensor". *Applied Physics A: Materials Science and*

- Processing, *129*(2), 1–18.
- To, D. T. H., Park, J. Y., Yang, B., Myung, N. V., Choa, Y. H. 2023. "Nanocrystalline ZnO quantum dot-based chemiresistive gas sensors: Improving sensing performance towards NO₂ and H₂S by optimizing operating temperature". *Sensors and Actuators Reports*, *6*, 100166.
- Tsizh, B., Aksimentyeva, O. 2020. "Ways to improve the parameters of optical gas sensors of ammonia based on polyaniline". *Sensors and Actuators A: Physical*, *315*, 112273.
- Uma, S., Shobana, M. K. 2023. "Metal oxide semiconductor gas sensors in clinical diagnosis and environmental monitoring". *Sensors and Actuators A: Physical*, *349*, 114044.
- Verma, A., Kumar, P., Yadav, B. C. 2024. "Fundamentals of electrical gas sensors". *Complex and Composite Metal Oxides for Gas VOC and Humidity Sensors Volume 1*, 27–50.
- Walker, J., Karnati, P., Akbar, S. A., Morris, P. A. 2022. "Selectivity mechanisms in resistive-type metal oxide heterostructural gas sensors". *Sensors and Actuators B: Chemical*, *355*, 131242.
- Wang, L., Cheng, Y., Gopalan, S., Luo, F., Amreen, K., Singh, R. K., ... Naidu, R. 2023. "Review and Perspective: Gas Separation and Discrimination Technologies for Current Gas Sensors in Environmental Applications". *ACS Sensors*, *8*(4), 1373–1390.
- Wang, Y., Pan, Y., Jiang, Y., Xu, M., Jiang, J. 2023. "Wearable electrochemical gas sensor for methanol leakage detection". *Microchemical Journal*, *190*, 108715.
- Wawrzyniak, J. 2023. "Advancements in Improving Selectivity of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors Opening New Perspectives for Their Application in Food Industry". *Sensors 2023*, Vol. 23, Page 9548, *23*(23), 9548.
- Wei, J., Yi, Z., Yang, L., Zhang, L., Yang, J., Qin, M., Cao, S. 2024. "Photonic crystal gas sensors based on metal–organic frameworks and polymers". *Analytical Methods*, *16*(29), 4901–4916.
- Wu, J., Yue, G., Chen, W., Xing, Z., Wang, J., Wong, W. R., ... Liu, T. 2020. "On-Chip Optical Gas Sensors Based on Group-IV Materials". *ACS Photonics*, *7*(11), 2923–2940.
- Wu, R., Tian, X., Hua, Z., Lu, N., Wang, P. 2021. "A low temperature catalytic combustible gas sensor based on Ru supported zeolite catalyst films". *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, *49*(11), 63–68.
- Xiao, D., Wang, Y., Zhang, D., Liu, Y., Wang, H., Li, Y., ... Sun, M. 2024. "CuO/ZnO hollow nanocages derived from metal–organic frameworks for ultra-high and rapid response H₂S gas sensor". *Ceramics International*, *50*(9), 15767–15779.
- Xu, C., Ma, S., Liu, M., Cai, Y., Wei, J., Liu, J., Jiang, H. 2023. "High performance detection of ethanol based on HoFeO₃ microsphere gas sensor". *Vacuum*, *217*, 112537.
- Yurchenko, O., Diehle, P., Altmann, F., Schmitt, K., Wöllenstein, J. 2024a. "Co₃O₄-Based Materials as Potential Catalysts for Methane Detection in Catalytic Gas Sensors †". *Sensors*, *24*(8), 2599.
- Yurchenko, O., Diehle, P., Altmann, F., Schmitt, K., Wöllenstein, J. 2024b. "Co₃O₄-Based Materials as Potential Catalysts for Methane Detection in Catalytic Gas Sensors †". *Sensors*, *24*(8), 2599.

- Zamansky, K. K., Fedorov, F. S., Shandakov, S. D., Chetyrkina, M., Nasibulin, A. G. 2024. "A gas sensor based on free-standing SWCNT film for selective recognition of toxic and flammable gases under thermal cycling protocols". *Sensors and Actuators B: Chemical*, *417*, 136116.
- Zamansky, K. K., Osipova, A. A., Fedorov, F. S., Kopylova, D. S., Shunaev, V., Alekseeva, A., ... Nasibulin, A. G. 2023. "Sensitivity enhancement of SWCNT gas sensors by nitrogen plasma treatment". *Applied Surface Science*, *640*, 158334.
- Zhang, W., Chen, X., Xing, Y., Chen, J., Guo, L., Huang, Q., ... Liu, H. 2023. "Design and Construction of Enzyme-Based Electrochemical Gas Sensors". *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 5, 29(1), 5.
- Zhang, X., Teng, S. Y., Loy, A. C. M., How, B. S., Leong, W. D., Tao, X. 2020. "Transition Metal Dichalcogenides for the Application of Pollution Reduction: A Review". *Nanomaterials* 2020, Vol. 10, Page 1012, *10*(6), 1012.
- Zhang, Y., Lin, Y., Yang, Z., Rong, Q., Yao, D., Li, K., ... Guo, Y. 2024. "An Affordable Amperometric Gas Sensor Based on Polyvinylidene Fluoride Solid-State Electrolyte for Highly Selective Detection of ppm-Level H₂ at Room Temperature". *ACS Applied Polymer Materials*.
- Zheng, F., Jiang, H. Y., Yang, X. T., Guo, J. H., Sun, L., Guo, Y. Y., ... Yao, M. S. 2024. "Reviews of wearable healthcare systems based on flexible gas sensors". *Chemical Engineering Journal*, *490*, 151874.
- Zhu, L., Rong, Q., Tong, Y., Yang, Z., Li, R., Zheng, J., ... Guo, Y. 2023. "Effect of calcination temperature on sensing performance of YSZ based electrochemical H₂S gas sensor with a NiFe₂O₄ electrode". *Sensors and Actuators A: Physical*, *353*, 114204.

Fonksiyonel Gıdalar

Emine Hülya İLKAY^{1*}

Hamza BOZKIR²

1-Gastronomi ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, e_hulyailkay@hotmail.com

2-Gastronomi ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

ÖZET

Teknoloji ilerledikçe ve tüketicilerin hayat standartları yükseldikçe insanların yedikleri yiyecekler ve beslenme alışkanlıkları değişime uğramış ve insanlar daha bilinçlenmeye ve duyarlı olmaya başlamıştır. Böylece sağlığa faydası olan gıdalara yönelimi arttırmış ve sadece lezzete odaklanma değil aynı zamanda sağlık arayışında olmaya da başlamıştır. Fonksiyonel gıdalar vücut için faydaları olan, hastalık riskini azaltan, beslenme açısından faydalı olan ve tüm dünyada üretim ve tüketimi artan gıdalardır. Fonksiyonel gıdaların Akdeniz tipi beslenme denilen diyetle tercih edildiği için son yıllarda önemli hale gelmiştir. Yapılan bu çalışma ile fonksiyonel süt ürünleri, et ürünleri, tahıl ürünleri, meyve ve sebze ürünleri, içecekler hakkında bilgi verilecektir.

Anahtar Kelimeler – Fonksiyonel gıda, süt ürünleri, et ürünleri, tahıl ürünleri.

I. GİRİŞ

İnsanlar yaşam süreleri ve kalitelerini arttırmak için, artan bilgileriyle sağlık konularında oluşan sıkıntılarda önleyici yöntem olarak yeme içme alışkanlıklarında değişiklikler yapmaktadır. Bu değiştirdikleri alışkanlıklardan biri de fonksiyonel gıdalarla beslenmektir. İnsanlar normal beslenme dışında daha fazla fayda sağlayan, normal halimizi koruyup onu geliştiren gıdalara son yıllarda yönelmeye başlamıştır. Yapılarında bulunan protein, lipitler, vitaminler, omega 3 yağ asitleri, çeşitli mineral maddeler ve enzimlerden herhangi bir bileşenle fonksiyonel gıdalar fayda sağlamaktadır.

II. FONKSİYONEL GIDALAR

2.1.Fonksiyonel gıdaların tanımı

Son yıllarda artan obezite ve hastalıkla mücadelede, aynı zamanda besleyici değerinin sağlığa faydalarından dolayı fonksiyonel gıdalar trend olmaya başlamıştır. Fonksiyonel gıda; Amerikan Diyetisyen Derneğine göre geleneksel besinlerin ötesinde daha sağlıklı olan ve herkesi tatmin edecek potansiyele sahip gıda ve gıda bileşenleridir. Fonksiyonel gıdalar 1980 yıllarında ilk Japonya’da çıkmış olsa da insanların beslenmesinde çok eskiye dayanır. Ancak faydaları ve sağlığı korumasındaki araştırmaları geç olduğu için 1980 yılı baz alınmaktadır. Sağlık ve Gıda mühendisliği gibi çeşitli disiplinlerin geliştirdiği fonksiyonel gıdalar için yapılan ilk tanım 1984 yılında Japonya’da çeşitli özel bileşenler ile zenginleştirilmiş yararlı fizyolojik etkiler sağlayan besin maddeleri olarak ifade edilmiştir. Japonya’da bu konuda bir komite kurulmuş ve komitenin raporuna göre de fonksiyonel gıda da Sağlık Bakanlığı “sağlık için spesifik gıda” terimini FOSHU (Food for Specific Health Use) olarak adlandırılmıştır.

Japonya’da yaşlı nüfus daha çok olduğu için onların hastalığını azaltıp yaşam kalitelerini yükseltmek için araştırmalar yapılmış ve gıdanın yaşam kalitesine sağladığı faydalar da düşünülerek fonksiyonel gıdalar kavramı karşımıza çıkmıştır.

Bir gıdanın fonksiyonellik özelliği kazanabilmesi için probiyotik ve prebiyotikleri, antioksidanları, biyoaktif bileşikler, fitokimyasallar içermeli ve vücudun savunma mekanizmasını arttırarak hastalık riskini azaltması gerekir. Fonksiyonel gıdalar kalp damar rahatsızlıkları, kanser, hipertansiyon, kolesterol, şeker, ülser ve ishal gibi hastalıklar açısından da hastalık riziko azaltıcı özellik taşırlar (Erbaş, 2006). Fonksiyonel gıdalar hastalıkların tekrar etmesini azaltan ve sağlığı koruyucu etkisinden dolayı daha da önemli hale gelmiştir. Sağlık üzerine potansiyel faydalarının yanında önleyici katkıları da vardır. Tıp biliminin babası olarak bilinen Hipokrat 2500 yıl önce söylediği “İlacınız besinleriniz, besinleriniz ilacınız olsun” sözü ile fonksiyonel gıdaların önemini vurgulamıştır. İnsanlar bilinçlendikçe mutfaklarında daha fazla fonksiyonel ürünleri bulundurmaya başlamışlardır. Yaban mersini, Kırmızı reishi mantarı, karabuğday, shiitake mantarı, avakado, camu camu, chia tohumu, kinoa, keten tohumu gibi fonksiyonel gıdalar artık birçok ülke mutfağında yer almakta ve bu gıdalar trend olarak pazarlanma potansiyeli artmaktadır (Ercan, 2015).

2.2.Fonksiyonel Gıda Özellikleri

Fonksiyonel gıdaların dünyada Pazar payı artarak, trend olmaya devam etmektedir. Fonksiyonel gıdaların pazar payı 1995 yılında 30 milyon dolarken her yıl % 5lik artışla yaklaşık 48 milyon dolara çıkmıştır(Seçim, 2018; Son, 2019). Pazarda en büyük pay Amerika Birleşik Devletleri birinci sırayı, peşinden Avrupa ülkeleri ve Japonya takip etmektedir (Seçim, 2018). Pazarda fonksiyonel gıda olarak en çok meyve sebze grubu tercih edilirken, onu ekmek ve çeşitleri takip etmekte, arkasından özel olarak işlenmiş tahıl ve taneleri yer almaktadır. Bugün 300’ün üzerinde fonksiyonel gıda bulunmaktadır(Sloan, 2002; Andlauer ve Fürst, 2002). Fonksiyonel gıdalar; domatesin içindeki likopenden dolayı doğal fonksiyonel olabileceği gibi omega 3 yağ asiti veya iyotlu tuz ilavesi yapılarak veya zararlı bileşenler içerisinden çıkarılarak da olabilir. Gıda içerisinde biyoyararlılığı arttırılarak veya bazı bileşikleri değişikliğe uğratarak da fonksiyonel gıdalar üretilir bilinir.

Fonksiyonel Gıdalarda Bulunması Gereken Özellikler; (Son, 2019)

1. Fonksiyonel gıda olabilmesi için sağlık konusunda iyileştirme yapmalıdır.
2. Fonksiyonel gıdanın içindeki bileşenlerin oranları ve medikal dayanağı olmalıdır.
3. Fonksiyonel gıdadaki bileşenler sağlığı tehdit etmemelidir.

4. Fonksiyonel gıda içerisinde bulunan bileşenlerin kalitatif ve kantitatif özellikleri belirlenerek fiziko kimyasal özellikleri iyi araştırılmalıdır.
5. Fonksiyonel gıdaların benzerleriyle karşılaştırma yapılmalıdır.
6. Sıradan diyetlerde de bulunabilir olmalıdır.
7. Fonksiyonel gıdalar ilaç niyetiyle tüketilmemelidir.

2.3.En Çok Tüketilen Fonksiyonel Gıda Çeşitleri



Resim 1:Fonksiyonel gıdalar (Erişim Tarihi:09.10.2024) <https://tr.pinterest.com/>

2.3.1.Probiyotikler

Tüketiciler yedikleri gıdaları sadece fizyolojik ihtiyacı karşılamak için değil sağlık açısından fayda sağlaması için de tüketmektedir. Gıda sanayide fonksiyonel gıdalar hızla gelişmektedir. Bunlardan biri de probiyotiklerdir.

Probiyotikler fermente süt ve türevlerinde ve fermente olmuş gıdalarda doğal olarak bulunmaktadır. Ayrıca yoğurt, tereyağı, süttozu, ekşi krema, yayık altı, dondurma, tatlı, meyve suyu, mayonez, bebek sütü ve mamasına, et ve yulafli ürünlere dışarıdan probiyotik ilave edilmektedir (Gülbandılar vd.,2017). Fonksiyonel gıdaların kalp damar hastalıklarını, yüksek tansiyonu, kanseri, şekeri ve ülseri, ishali azaltma özellikleri vardır. Gıdalara kalsiyum ve vitamin ilavesi yapılarak faydası görüldüğü için fonksiyonel gıda olarak ilk ortaya çıkmış, probiyotiklerin gıdalara takviyesiyle bağırsak florasına yararları nedeniyle fonksiyonel gıda olarak kabul görmüştür. Fonksiyonel gıda bileşenlerinden probiyotikler; belirli oranlarda tüketilince konakçı üzerinde olumlu etkileri olan mikrobiyal kaynaklı gıda katkılarıdır (Uymaz , 2010) . Probiyotik olarak kullanılan mikroorganizmalar insan orjinli olup patojen olmayıp ve patojenleri engelleyen, zehir üretmeyen, asit ve tuzlara

dayanabilen, bağırsakta tutunup antimikrobiyal etki gösterenlerdir (Ray ve Joshi,2015).

Probiyotik Mikroorganizmalarda olması gereken özellikler (Gülbandılar vd.,2017);

1. İnsan ve hayvanlarda yan etki oluşturmayan ve güvenilir olmalıdır.
2. Patojenlere ve kanserojen maddelere karşı yok edici etki göstermelidir.
3. Mikroorganizmaları önleyici maddeler üretmelidir.
4. Konakçı kişilerde direnç oluşturmamalıdır.
5. Antibiyotiklere karşı direnç göstermelidir.
6. Bağırsak mikro florasını düzenleyerek bağırsaklardaki antibiyotiklerden etkilenmemelidir.
7. Gıda üretiminde ve depolanmasında canlılığını sürdürüp aktivitesini kaybetmemelidir.
8. Probiyotik mikroorganizmalar toksin üretmeyen ve patojenik olmamalıdır.
9. Değişik preparatların hazırlanmasına uygun olmalıdır.
10. Stabil olmalıdır.
11. Safra tuzları ve düşük pH'a dayanabilen özelliklerde olmalıdır.
12. Bağırsak hücrelerine probiyotikler tutunabilmelidir (Başyigit ,2004).

Probiyotiklerin; İshallerin önlenmesinde, Kanserin önlenmesinde, Laktozun neden olduğu bağırsak sorunlarının giderilmesinde, kalp ve kan damarları hastalıklarının önlenmesinde, obezitenin önlenmesinde, alerjik hastalıkların önlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca antibakteriyal etkileri vardır. Probiyotik ürünlerden olan kefir, değişik bakteri ve maya ile farklı bir kimyasal bileşime sahiptir. Fermente bir ürün olan kefir sindirimi kolay, kalsiyum ve proteince de zengin bir gıdadır.

2.3.2.Prebiyotikler



Resim 2:Fonksiyonel gıdalar (Erişim Tarihi:09.10.2024) <https://tr.pinterest.com/>

Tüketildiğinde bağırsaktaki bakterilerin harekete geçmesini sağlayan, sindirilmesi zor olan, kalsiyum emilimini artırıp kemiklerdeki mineral yoğunluğunu arttıran fonksiyonel gıdalara denir (Şengün ve Yahşi, 2021). Prebiyotikler, yarar sağlaması için konakçı mikroorganizmaların kullandığı seçici substratlar da denilmektedir (Zhou vd., 2023). Fonksiyonel gıdaların üretiminde prebiyotikler ve probiyotikler çok sık kullanılmaktadır (Sirini vd., 2020). Fonksiyonel etlerin besleyici değerlerini arttırmak için probiyotik ve prebiyotikleri tek bir matriste toplayarak simbiyotikleri oluşturmuşlardır (Manassi vd., 2022).

2.3.3. Süt Ürünleri

İçerisinde bulunan yararlı bileşenlere laktaz, omega 3 yağ asiti, galaktozidaz ve konjuge linoleik asit gibi maddelerin ilavesi ile süt fonksiyonel özellik kazanmıştır. Bu şekilde süt daha yararlı hale getirilerek fonksiyonel gıdaya dönüştürülmüştür.

Günlük beslenmede de mühim bir yere sahip fonksiyonel gıda olan yoğurt, içerdiği probiyotik mikroorganizmalar sayesinde bağırsak florasını düzenleyerek kolon kanserini de önlemektedir. Son yıllarda meyveli probiyotikli yoğurtlar daha geniş kitleye hitap ederek kullanımı artmıştır (Kocaadam ve Acar, 2016). Bunun yanında kolesterolün düşmesini, kemir erimesini önlemede, sindirim sistemi rahatsızlıklarını önlemede faydası vardır. Vitaminler ve mineral maddeler bakımından zengin olan yoğurt yüksek besleyici özelliği ile de fonksiyonel özellik taşımaktadır. Ayrıca Türk mutfağında oldukça fazla kullanılmaktadır. Mayaların ve bakterilerin aynı ortamda birlikte yaşayarak ürettikleri fermente süt ürününe kefir denir. Kefirin besinsel içeriği kullanılan kefir danelerinin mikrobiyolojik yapısına, sütün kimyasal yapısına, inkübasyon süre ve sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Damiana ve ark., 2017). İlk olarak Kafkasya ve Tibet'te üretilen kefire son zamanlarda sağlık üzerine çok faydası olduğu için ilgi arttı. Kefir tanelerinin uygun şartları sağlayan süte katılarak 22 C'de 24 saat inkübasyonda bekletilerek elde edilir. Diğer süt ürünlerinden ayrılan özelliklerinden biri de kefir danelerinin tekrar uygun koşullarda muhafazasıyla kullanılıyor olmasıdır (Güzel vd.,2011; Altay vd.,2013). Anti bakteriyel etki göstermesi, anti kanserojen olması, hipertansiyonu önlemesi, diyetle kullanılması, sindirimi iyileştirmesinden dolayı fazlasıyla tüketilmektedir. Evde kolay üretilen probiyotik içecek olarak da ifade edilebilmektedir. Sadece kefir ve yoğurtta bulunmayan probiyotikler fırıncılık ürünleri ve badem sütü, soya sütü vb. gibi bitki bazlı sütlerde de bulunmaktadır (Gökırmak vd., 2021). Kefir, fermentasyon sonucu karbondioksit üretimi, asetaldehit, hafif düzeyde alkol üretiminden dolayı ile kendine has bir aroması ve ferahlatıcı özelliği vardır (Güzel vd.,2011). Kefir antimikrobiyal özellikleriyle, antikanserojenik özellikleri, probiyotik ve prebiyotik özellikleri, kolesterolü düşürücü etkileri, laktoz toleransını

geliştirici, gastrointestinal sistemin iyileşmesi ve bağışıklık sistemini güçlendirici olmasından dolayı fonksiyonellik özellik kazanmıştır. Fonksiyonel süt bileşenleri ilavesi ile oluşmuş süt ürünleridir (Seçkin ve Baladura, 2011). İnsanların beslenmesinde süt ve süt ürünleri önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle genç nesillerin ihtiyacı olan besin öğelerini fonksiyonel özellikleri arttırılmış sütle birlikte alması beslenme açısından önemlidir. Probiyotik ve prebiyotik içeren laktozsuz ve laktozlu sütler gastrointestinal üzerine olumlu etki sağlamaktadır. Bir diğer fonksiyonel süt ürünleri tansiyon hastalıklarını kontrol altında tutan Omega-3 yağ asitlerini içeren ürünlerdir. Finlandiya’da tüketilen fermente süt içeceği olan Evolus ile Japonya’da tüketilen Calpis ve Ameil fermente süt içecekleri fareler üzerinde test edilerek hipertansiyona karşı etkisi olduğu test edilmiştir (Seçkin ve Baladura, 2011).

Genel olarak süt ve ürünlerinde Lactobacillus ve Bifidobacterium bakteri suşları probiyotik ve prebiyotik olarak kullanılmaktadır. Probiyotikler mayalanma öncesinde eklenmektedir. Dünyada en yaygın olarak kullanılan fonksiyonel süt ürünleri; fermente sütler, çeşitli laktik asit bakterilerini içeren kefir gibi probiyotik süt karışımlarıdır. Gıdalarda fonksiyonel özelliği arttırmak için galaktooligosakkaritler kullanılmaktadır (Bayöz,2021). Sütteki laktozdan elde edilen galaktooligosakkarit prebiyotik olarak kullanılmakta ve Japonya’da laktointoleransın neden olduğu mide ağrısını giderdiği için tercih edilmektedir (Seçkin ve Baladura, 2011).

Bitki sterollerini fermente süt ürünlerine katılarak da fonksiyonel özellik kazandırılmaktadır. Kalsiyum ilavesi yapılmış süt ürünleri kemik hastalığını engellemekte, bağışıklığı güçlendirmektedir. Uykusuzluğu düzene sokan melatonin hormonunun süt kaynaklı ürünlerde çok kullanıldığından uykusuzluğu giderdiği bilinmektedir. Süte ayrıca kalsiyum, magnezyum, fosfor gibi mineraller ile yağda eriyen vitaminler karışım halinde katılmaktadır.

2.3.4.Fonksiyonel tahıl ürünleri



Resim 3:Fonksiyonel gıdalar (Erişim Tarihi:09.10.2024) <https://tr.pinterest.com/>

Betaglukan eklenerek bağışıklık sistemini güçlendirip kolesterolü düşürücü etkisiyle fonksiyonel gıda haline dönüşmüş tahıllardır. Bazı ekmek unlarına omega -3 yağ asiti ilavesi ile fonksiyonel hale getirilmiştir (Öncebe, 2019). Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanarak ürünlerin yapı, lezzet, çeşitlilik bakımından iyileştirmeler yapılarak ürün özellikleri geliştirilmiştir. Yapılan yeni çalışmalar ile her yaş grubuna hitap edecek fonksiyonel tahıl ürünleri geliştirmişlerdir. Bunlardan biri de maraş tarhanası cipsi fonksiyonel özelliklere sahip geleneksel tahıl ürünlerinden bir tanesidir (Özçam vd., 2014; Şimşekli ve Doğan,2015). Hububat esaslı fonksiyonel gıdaların özellikle diyet lifi kaynağı olarak fizyolojik açıdan sağladığı faydalardan dolayı bu ürünlerin üretimi ve tüketimi artmaya başlamıştır (Dülger ve Şahan, 2011; Yörükoğlu, 2012; Şimşekli ve Doğan,2015).

Günümüzde, antioksidanlar en fazla tercih edilen fonksiyonel gıda bileşenlerindendir. Fonelik bileşiklerinin ilavesiyle çeşitli fonksiyonel özellik kazanmış ürünlerin yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Mormiks, kırmızı ve mor renkli meyve ve sebzelerde bulunan antosiyanin bileşiklerden elde edilen toz karışımın makarna ve farklı unlu mamullerde kullanılmasıyla gıdalara ek olarak fonksiyonellik kazandırmıştır (Yeşilyurt vd.,2024).

2.3.5.Fonksiyonel etler



Resim 4:Fonksiyonel etler (Erişim Tarihi:09.10.2024) <https://tr.pinterest.com/>

Et ürünlerine antioksidanlar, yağ asitleri ve probiyotikler eklenerek fonksiyonel gıda haline gelmiştir (Öncebe, 2019). Fonksiyonel et ürünleri; vitaminlerden A, C, E vitaminleri, minerallerden kalsiyum, potasyum, magnezyum; probiyotikler, prebiyotikleri, simbiyotikler, lineleik asit, diyet lifi, antioksidanlar gibi fonksiyonel bileşenlerin ilave edilmesiyle üretilmektedir (Budak Bağdatlı ve Kundakçı, 2013). Probiyotikler,

prebiyotikler ve simbiyotiklerin ilavesiyle üretilen et ve et ürünleri ile geleneksel yöntemlerle elde edilen et ve et ürünlerine kıyaslandığında fonksiyonel et ve et ürünleri daha az yağ içermesi kronik hastalıkların yaygınlığını azaltmaktadır (Dong vd., 2023; Nuriler ve Uyarcan, 2024).

2.3.6.Fonksiyonel yumurta

Yapısında yüksek oranda protein, aktif bileşen, vitamin ve mineral içermesinden dolayı fonksiyonel gıda olarak tanımlanmaktadır. En yaygın bulunan hayvansal kaynaklı fonksiyonel gıdadır. Tüketici talepleri doğrultusunda tüketimi artan yumurta, ülkemizde pazar payı artarak trend haline gelmiştir. Embriyonun gelişiminde tüm gelişmeye etki eden faktörleri yapısında bulunduran tek gıda yumurtadır (Yüccer vd., 2012).

Yumurta sarısında yağda eriyen vitaminlerden A vitamini, D vitamini, E vitamini ve K vitamini, B2 ve B9 vitaminleri; akında ise B1, B2, B9 ve B12 vitaminler bulunmaktadır. Yumurtada yüksek oranda biyoyararlı protein içerdiği için kilo kontrolünde, kas gelişiminde, yaşlılığa bağlı hafızayı güçlendirmede arttırıcı etkisi olduğu; içerdiği ksantofil pigmenti ile kanser ve katarakt riskini azaltmaktadır (Alaşalvar ve Pelvan, 2009).

2.3.7.Fonksiyonel meyve ve sebze grubu ürünler

Domates ve domates ürünleri fitokimyasallardan tokoferoller ve flavonoidleri içerdiği için fonksiyonel gıda olarak adlandırılmaktadır. Fonksiyonel gıda olan domates ve domatesten yapılan salça Türk mutfığında çok fazla kullanılmaktadır. Sarımsak geleneksel şifalı bitkilerden biridir. Dünyada yaygın olarak kullanılan sarımsağın fonksiyonel özelliğinin yanında antioksidan, kolesterolü düşürücü, kansere karşı engelleyici özelliği bulunmaktadır. İçerdiği Allium'un koruyucu özelliği olduğu düşünülmektedir (Shandilya ve Sharma, 2017).

Turplar C vitamini bakımından zengin olmasının yanında tıbbi amaçlarla da kullanılmaktadır. Dünyada ülkeden ülkeye üretim, hasat, saklama koşulları ve tüketimi çeşitlilik göstermektedir. Siyah turp Meksika'da birçok yemekte kullanılıp tıbbi amaçla da kullanılmaktadır. Siyah turpların köklerinde antioksidan maddeler bulunmakta, beyaz ve kırmızı turplarda da karotenoidler olduğu biliniyor. C vitamini bakımından verimli olan kızılçık, idrar yolları enfeksiyonlarında, özellikle şeker ilavesiz kullanıldığında diyabet hastalarında fonksiyonel gıda olarak tüketilmektedir. Sudan sonra içeceklerden en fazla tüketilen çay özellikle yeşil çay, yüksek oranda polifenolik bileşik içerdiği için antikanserojenik, antibakteriyal ve antioksidan özelliklerinden dolayı fonksiyonel gıda olarak tüketilmektedir. Fonksiyonel gıda olarak kullanılan alıç, kolesterolü düşürüp, kan akışını düzenlediği, hipertansiyonu düzenlediği için çok tüketilmektedir (Nizamlioğlu ve Nas, 2010).

2.3.8.Fonksiyonel içecekler

Kemiklerin sağlığı için inulin ve kalsiyum ilaveli içecekler, A, C, E vitamini ilaveli alkolsüz içecekler; göz rahatsızlıklarını önlemek için lutein ilavesi yapılmış içecekler, kolesterolü düşürmek için soya veya omega-3 eklenmiş içecekler, çözünebilir lifle zenginleştirilmiş içecekler fonksiyonel içeceklerdir (Öncebe, 2019).

2.4.Fonksiyonel gıda tipleri

Takviye yapılmış gıdalar: Besleyiciliği artsın diye vitamin ve mineral madde ilavesi yapılmış gıdalardır. Meyve suyuna C vitamini katkısı ilave edilerek elde edilen ürün örnek verilebilir. Zenginleştirilmiş gıdalar: Gıdaların içine yeni bir besin maddesi ilavesi yapılarak elde edilen ürünlerdir. Yoğurtlara dışarıdan probiyotik ilavesi yapılarak elde edilmesi örnek verilebilir. Değiştirilmiş gıdalar: İçerisinden istenmeyen maddenin uzaklaştırılıp yerine yeni bir maddenin ilavesi ile üretilmiş gıdalardır. Örnek olarak yağsız süt verilebilir. Geliştirilmiş gıdalar: Özel koşullarda yetiştirilerek ve geliştirilerek üretilen ürünlerdir. Omega 3 katkılı yumurta örnek verilebilir (Öncebe,2019).

2.5.Fonksiyonel gıdaların gelişimi

Japonyada fonksiyonel gıdaların gelişimi

1980 li yıllarda Japonya’da başlangıcı olan fonksiyonel gıda oradan tüm Dünya’ya yayılmıştır. 2001 yılında da Japonya’da fonksiyonel gıdaları kapsül ve hap formunda olabileceği kabul edilmiştir (Sevilmiş, 2008).

Amerikada fonksiyonel gıdaların gelişimi

2008 verilerine göre pazardaki en büyük pay %33 ile ABD, onu AB ülkeleri ve Japonya izlemektedir. Fonksiyonel gıda pazarında Türkiye ise çok küçük yer işgal etmektedir. Avrupa pazarı hâlâ az gelişme göstermiştir (Sevilmiş, 2008).

Avrupada fonksiyonel gıdaların gelişimi

Avrupa’daki başlıca önemli pazarlar içerisinde Almanya, Fransa ve İtalya bulunmaktadır. Pazar payı Rusya, Macaristan ve Polonya’nın büyümektedir (Gok ve Ulu ,2019). Heterojen bir yapıya sahip olan Avrupa pazarı Orta ve Kuzey kısımları Akdeniz ülkelerine göre fonksiyonel gıdaya ilgisi daha fazladır (Annunziata ve Vecchio, 2011). Kellogg Co., General Mills Inc.,

Coca Cola, Nestle, Pepsi, Dean Foods ve Kraft Foods gıda firmaları %75'lik pazar payına sahiptir (Bogue, Collins, ve Troy, 2017).

Türkiyede fonksiyonel gıdaların gelişimi

Son yıllarda Türkiye'de, fonksiyonel gıda Pazar payı gelişme göstermiştir. İnsanların sağlık konusunda bilinçlenmesi insanların fonksiyonel gıdalara yönelimini arttırmıştır. Sağlıklı beslenme düşük kalorili ürünlerle beslenme şeklinde başlamış, probiyotik yoğurt, çocuklar için kalsiyum ilavesi yapılmış bisküvi, meyveli yoğurtlar şeklinde fonksiyonel gıdalara doğru yönelim olmuştur. Birçok firmada bu talebi karşılamak için piyasaya fonksiyonel gıdalar sunmaya başlamıştır. Türkiye'de fonksiyonel gıda pazar payı 2009 yılı verilerine göre, 2.2 milyon \$ bir hacme sahipken şimdi yükselen bir eğilim göstermektedir. Amerika, Japonya ve Avrupa'ya göre fonksiyonel gıda pazarlarında Türkiye daha yeni gelişme göstermeye başlamıştır (Hacıoğlu ve Kurt, 2012). Türkiye'deki büyük firmalardan birçoğu fonksiyonel gıdalar üretip piyasaya sunmaktadır. Unilever, Hero gibi yabancı firmalar da Türkiye'de fonksiyonel gıdaların üretimini yapmaya başlamıştır. Tüketicinin bilinçlenmesi arttıkça fonksiyonel gıda pazarı da büyüme göstermeye başlamıştır.

Çizelge 1: Gıda Şirketlerinin Pazardaki Konumu ve Gelecek Planları (Erişim

Tarihi:09 Nisan 2023)

Şirket	Pazardaki Konumu	Gelecek Planları
Danone	Activia ürünü ile Türkiye'de 1 milyonu aşkın tüketildiği için % 80 pazar payı ile öncü konumuna geçmiştir.	Taze süt ürünlerindeki payını 5 yıl süre zarfında %10'un üzerine çıkarmayı hedeflemişlerdir.
Dimes	Dimes'in %10 paya sahip olan ilk ürünü Karışık Meyveli "enriched" kategorisindeki ürünüdür.	Türkiye'de bulunmayan Dimes Life markası ile yeni ürünler çıkarmayı planlamaktadırlar.
Doğadan	1998 yılında pazara giren Doğadan firması doğadan form, relax, active ve doğadan mini'yi çıkardı.	Müşteri talepleri doğrultusunda ürün kalemlerini genişletmeyi hedeflemişlerdir.
GıdaSA	Form Active ve bayanlar için 3 özel bitkisel çayla 2005 Şubat da piyasaya girmiştir.	Bayanlar için çıkardığı bitkisel çay serisinde 8 farklı ürün çıkartmıştır.
Hero	ActiPro ve ActaVitale'yi piyasaya sunmuştur.	Cirolarının %50'sini fonksiyonel gıdaya ayırmayı hedeflemişlerdir.
Otacı	Lunch çabuk çorba ve Otacı Brunc ile iddialı olan Otacı fonksiyonel gıda payını %50'ye çıkarmıştır.	Fonksiyonel Ürün çeşitliliğini arttırıp pazardaki yerini güçlendirmeyi planlamıştır.
Pınar	Yoğurt ve süt ürünleri gamı ile fonksiyonel ürün pazar payı %5'tir.	Pazar payını %10'a çıkarmayı planlamışlardır.

Sütaş	Yovita probiyotik yoğurt ile 2005’de piyasaya girmiştir.	Probiyotik yoğurt Pazar payını arttırıp,yeni ürünler çıkarmayı planlamışlardır.
Unilever Türkiye	Becel’in %35 pazar payı, bardak poşetli yeşil çay sunumu ile lider konumdadır.	Yeni ürünler üzerinde çalışmaktadır.

Fonksiyonel Gıda Pazarında Tür Bazlı Üretim Oranları (Sevilmiş, 2008)

Süt ve Süt Ürünleri üretim oranı	% 33,5
Bisküvi ve Unlu Mamuller üretim oranı	% 25,9
Gazlı ve Bitkisel Çay İçecekleri üretim oranı	% 14,4
Margarin ve Diğer Yağ Üretim oranı	% 8,1
Hayvansal Ürünleri üretim oranı	% 7,2
Soya Ürünleri üretim oranı	% 5,1
Diğer Gıda Ürünleri üretim oranı	% 5,8

2.6.Fonksiyonel Gıdaların Gastronomideki Yeri

Günümüzde dışarıda yemek yeme alışkanlığı arttığından restoran menülerinde fonksiyonel gıdalara yer vererek yeme içme sektörü açısından önemlidir. Geçmiş çok eski tarihlere dayanan fonksiyonel gıdalar, gastronomi ve mutfak sanatlarında yeni bir yaklaşımdır. Gastronomide yeni trendler arasında olan fonksiyonel gıdaların menülerde yer verilerek önemi vurgulanmalıdır. Yıllardır tüketilen fonksiyonel gıdaların Türk Yemek kültürünün bir parçası olması bilincinin yerleştirilmesi Türk Gastronomisine katkı sağlayacaktır. Coğrafi işaretli fonksiyonel gıdaların belirlenip mutfaklarda kullanılması gastronomideki yerine katkıda bulunacaktır.



Resim 5:Fonksiyonel gıdalardan mercimek köftesi (Erişim

Tarihi:09.10.2024) <https://tr.pinterest.com/>

Mercimek köftesi; Dünyada kanserle savaşan 7 gıda arasına girmiştir. Proteince zengin kırmızı mercimeğın ve lifçe zengin bulgurun kanser riskini azalttığđ belirtilmiştir (T.C. Kùltür ve Turizm Bakanlığı, 2013).



Resim 6:Fonksiyonel gıdalardan zeytinyağı (Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

Zeytinyağı; kalp sağlığını korumasından, antioksidan özellik taşımasından, kolesterolü düşürücü etkisinden, vitamin açısından zengin olduğundan diğer yağlardan ayırarak fonksiyonel gıda kategorisinde yer almaktadır (Bayram ve Özçelik, 2012; Çirişoğlu ve Olum, 2013).



Resim 7:Fonksiyonel gıdalardan maviyemiş (Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

Mavi Yemiş; Sağlığa faydasından dolayı gastronomide daha çok kullanılmaktadır. Ana yemeklerde ana malzeme, garnitür ve sos yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca reçeli yapılıp, çeşitli unlu mamuller, içecek sektöründe ve süt ürünlerinde kullanılmaktadır. Meyvenin mutfaklarda kullanımı arttırılmalı ve pazar payı arttırılmalıdır. Türk Kahvesi; Zihni güçlendirip, kalp sağlığını geliştirip ve Sindirim sistemini rahatlatan özelliğe sahip fonksiyonel içeceklerden biridir (Küçükkömürler ve Özgen, 2009). Diyabet riskinin azalttığı bilinmektedir.



Resim 8:Fonksiyonel gıdalardan tokat yaprağı (Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

Tokat yaprağı; Asma yapraklarının yapısında bulunan minerallerden fosfor ve kalsiyum, vitamin ve diyet lifi içeriği ile sağlığa faydasından dolayı fonksiyonel gıda olarak değerlendirilmektedir. Tokat'ın Erbaa bağlarında yetiştirilen Narince bağı asma yaprağı coğrafi işaretli bir fonksiyonel gıdadır (Çirişoğlu ve Olum,2013).



Resim 9:Fonksiyonel gıdalardan siyez bulguru (Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

Siyez Buğdayı; Buğday taneleri, protein oranı yüksek olduğu için fonksiyonel özellikler göstermektedir. İçerisinde yüksek protein, manganez, kükürt ve kalsiyum gibi mineral maddeler, karotenoid bulunmaktadır. Türk mutfağında siyez bulguru çoğunlukla ekşili bulgur pilavı olarak değerlendirilir (Slow Food Foundation, 2018). Siyez buğdayı un, ekmek, erişte, tarhana ve ezme üretiminde de kullanılmaktadır (T.C. Kastamonu Valiliği, 2016).

Mormiks; ahududu, yaban mersini, nar, böğürtlen, siyah havuç, vişne gibi kırmızı tonlara sahip gıdalardan elde edilen bir üründür. Özellikle yurt dışında yaygın kullanılmaktadır. Ülkemizde yeni tanınan bu ürünün ana fonksiyonel bileşeni antosiyaninlerdir. Katıldığı ürünlere fonksiyonel özellik kazandırır. Bu bakımdan antikanserojen, oksidasyon önleyici, antimikrobiyal, prebiyotik, kalp sağlığını koruyucu özellikte olduğundan fonksiyonel bir gıdadır (Çirişoğlu ve Olum, 2013).



Resim 10:Fonksiyonel gıdalardan mormiksli ekmek(Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

Kinoa ve amaranth; Oldukça yüksek proteine sahip bu tahıllar, tohum veya toz halinde gıdaya katılarak fonksiyonel özellik kazandırılır. Her iki tohum direkt tüketilmekte ayrıca serotonin hormonu salgılayarak fonksiyonel etki göstermektedir (Boz, 2013).

Brezilya cevizi veya fıındığı olarak bilinen kuruyemiş de son zamanlarda fonksiyonel gıda olarak kullanılmaktadır. Küçük parçalar haline getirilerek veya toz halinde gıdaya katılarak gıdaya fonksiyonel özellik kazandırır (Karacaoğlu vd.,2020).

Mavi-yeşil algalardan üretilen Spirulina tozu, ülkemizde bilen az kişi olsa da yurt dışında bilinmektedir. Birçok faydası bulunan spirulinanın tatlı, tuzlu, sıcak, soğuk birçok üründe yeşil renk vermek için kullanılıp hem de fonksiyonel özelliği arttırmaktadır (Alçay vd., 2017).

Kamboçya ayı dünyada en popüler fermente bir içecek olup fonksiyonel gıda pazarında da payı büyümektedir (Anonim 7, 2024)



Resim 11:Fonksiyonel gıdalardan kambucha ayı (Erişim Tarihi:09.10.2024)

<https://tr.pinterest.com/>

2.7.Fonksiyonel Gıdaların sağlık üzerine etkisi

Fonksiyonel Gıdalar Anti-Kanser etkisi, antioksidan etkisi, antienflamatuvar etkisi, kan lipid profili üzerinde pozitif etkisi, osteogenetik veya kemik koruyucu etkisi, antimikrobiyal ve antifungal, antiviral, kardiovasküler etki sağlamaktadır (şengün ve Yahşi, 2021).

2.8.Fonksiyonel gıdaları trend yapan zellikleri

İnsan sağlığı üzerine katkısı olduğu, sağlığı koruyucu olduğu ve belirli hastalıklara yakalanma olasılığını düşürdüğü için gastronomi trendleri arasında yerini aldı.

Toplumdaki sosyoekonomik değişiklikler, nüfus yapısındaki demografik değişikliklerden dolayı sağlığa faydası olan gıdalara yönelimi arttırmış ve sadece lezzete odaklanma değil aynı zamanda sağlık arayışında olmaya da başlanmıştır. Fonksiyonel gıdaların Akdeniz tipi beslenme denilen diyetle tercih edildiği için trend haline gelmiştir. Kaliteli yaşam arzusu ve bazı fonksiyonel gıdaların serotonin hormonu salgıladığı için trend olma sebeplerinden biridir.

III. SONUÇ

Artan sağlık sorunlarına karşı tek başına savaşma özelliği olan fonksiyonel gıdalar artan bir trende sahiptir. Yıllar geçtikçe de artacağı gzlmektedir. İnsanların faydalı besinlere yönelimi arttıkça fonksiyonel gıdalara talebin artacağı, restoran menülerinde de daha fazla yer alacağı görülmektedir.

Çalışmayı yaparken kullanılan materyalleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklayın. Farklı kaynaklardan yaptığınız alıntılar referanslarda verilmeli ve kaynak gösterilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Alaşalvar, C., Pelvan, E. (2009). Günümüzün ve Geleceğin Gıdaları Fonksiyonel Gıdalar. *Bilim ve Teknik*, 26-29.
- [2] Alçay,A.,Bostan,K.,Dinçel,E.,Varlık,C.(2017). Alglerin İnsan Gıdası Olarak Kullanımı. *Aydın Gastronomy*, 1 (1):47-59, 2017.
- [3] Altay, F., Karbancioglu-Güler, F., Daskaya-Dikmen, C., & Heperkan, D. (2013). A review on traditional Turkish fermented non-alcoholic beverages: microbiota, fermentation process and quality characteristics. *International Journal of Food Microbiology*, 167 (1), 44–56. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.016
- [4] Andlauer, W. and Fürst, P., (2002). Nutraceuticals-A Piçe of History Present Status and Outlook. *Food Research International*, 35, 171-176.
- [5] Başığit G. (2004). Bazı Laktik Asit Bakterilerinin Probiyotik Olarak Kullanılma Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96 s, Isparta.
- [6] Bayöz, G. (2021). Plaza çalışanlarının fonksiyonel gıda bilgi ve tutumlarının, beslenme durumlarının ve beslenme bilgi düzeylerinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans/ Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Bayram, B. ve Özçelik, B. (2012). Zeytinyağının Biyoaktif Bileşenleri ve Sağlık Üzerine Yararları, *Akademik Gıda*, 10(1): 77-84.
- [8] Bogue, Joe, Orla Collins, and Amy Jane Troy. 2017. “Market Analysis and Concept Development of Functional Foods.” *Developing New Functional Food and Nutraceutical Products*: 29–45.
- [9] Boz, H.(2013). *Amaranthus Spp: Kimyasal Bileşimi ve Fırın Ürünlerinde Kullanımı* ,U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt 27, Sayı 2, 147-153.
- [10] Budak Bağdatlı, A., Kundakçı, A. (2013). Fermente et ürünlerinde probiyotik mikroorganizmaların kullanımı. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1): 31-37.
- [11] Ceyhan N, Alıç H. (2012). Bağırsak mikroflorası ve probiyotikler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 5(1): 107-113.
- [12] Çirişoğlu, E. ve Olum, E. (2019). Türk Mutfağındaki Fonksiyonel Gıdaların Gastronomi Turizmi Açısından Önemi, *Türk Turizm Araştırmaları Dergisi*, 3(4): 1659-1680.
- [13] Dong, S., Li, L., Hao, F., Fang, Z., Zhong, R., Wu, J., Fang, X. (2023). Improving quality of poultry and its meat products with probiotics, prebiotics, and phytoextracts. *Poultry Science*, 22: 103287, doi: 10.1016/j.psj.2023.103287.

- [14] Dülger D, Şahan Y, 2011. Diyet lifin özellikleri ve sağlık üzerindeki etkileri. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 25(2): 147-157.
- [15] Erbaş, M., 2006. Yeni Bir Gıda Grubu Olarak Fonksiyonel Gıdalar, Türkiye 9. Gıda Kongresi, Bolu, 791-794.Erişim tarihi:09.04.2023
- [16] Ercan, A. (2015). Doğal Süper Gıdalar. (2.Basım), İstanbul: Hayy Kitap
- [17] Gok, Ilkay, and Efe Kaan Ulu. (2019). "Functional Foods in Turkey: Marketing, Consumer Awareness and Regulatory Aspects." Nutrition and Food Science 49(4): 668–86.
- [18] Gökırmaklı, Ç., Üçgül, B., Güzel-Seydim, Z.B. (2021). Fonksiyonel gıda kavramına yeni bir bakış: Postbiyotikler. Gıda Teknolojisi Dergisi, 46 (4) 872-882 doi: 10.15237/gıda.
- [19] Gülbandır, A., Okur, M., Dönmez, M. (2017). Fonksiyonel Gıda Olarak Kullanılan Probiyotikler ve Özellikleri. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 10(1):44-47.
- [20] Hacıoğlu G, Kurt G. 2012. Tüketicilerin Fonksiyonel Gıdalara Yönelik Farkındalığı, Kabulü ve Tutumları: İzmir ili Örneği. J Business Econ Res, 3 (1), 161-171.
- [21] Anonim 1. <https://academic.oup.com/qjmed/article/95/9/639/1574682> .(Erişim tarihi:09.10.2024)
- [22] Anonim 2. <https://engingvn.wordpress.com/2018/04/26/sektor-analizi-fonksiyonel-gıdalar/> (Erişim Tarihi:09.10.2024)
- [23] Anonim 3. <https://www.hurriyet.com.tr/yazarlar/idil-yazar/besinler-ilaciniz-ilaciniz-besininiz-olsun-40602621> .(Erişim tarihi:09.10.2024)
- [24] Anonim 4. <https://www.karmalt.com/dunyada-ve-turkiyede-fonksiyonel-gida-pazari/> (Erişim tarihi:09.10.2024)
- [25] Anonim 5. <http://www.kimyaevi.org/TR/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFF7E1F1486EE5030E07B4BDB15D6B60D5> (Erişim tarihi:09.10.2024)
- [26] Anonim 6. <https://www.nfds.com.tr/fonksiyonel-gıdalar-ve-fonksiyonel-gıda-trendleri/> (Erişim Tarihi:09.10.2024)
- [27] Anonim 7. <https://www.fermentemutfagim.com/kombuayiydolari#:~:text=Kobucha%2C%20fonksiyonel%2C%20probiyotik%20bir%20g%C4%B1da,kaynaklar%20olu%C5%9Fan%20fermente%20br%20i%C3%A7ecektir> (Erişim tarihi:21.10.2024)
- [28] Karacaoğlu, M., İleri, H.K. ve saltan İşcan, G. (2020). Gündemde Bir Bitki: Brezilya Fındığına Bilimsel Yaklaşım, FABAD J. Pharm. Sci., 45, 1, 65-75, 2020.
- [29] Karaduman, Yaşar (2011) Uluslararası Katılımlı I. Ali Numan Kırarç Tarım Kongresi ve Fuarı, Fonksiyonel Gıdalar.
- [30] Kocaadam, B. ve Acar-Tek, N. (2016). Ekmek, bira, şarap ve yoğurdun orijinleri ve tarihsel süreçleri. Beslenme ve Diyet Dergisi, 44 (3), 272–279.
- [31] Küçükkömürler, S. and Özgen, L. (2009). Coffee and Turkish Coffee Culture, Pakistan Journal of Nutrition, 8(10): 1693-1700

- [32] M. Yüccer, R. Temizkan, C. Caner(2012). Fonksiyonel Gıda Olarak Yumurta: Bileşenleri ve Fonksiyonel Özellikleri . Akademik Gıda Dergisi, 10(4): 70-76
- [33] Nizamlioğlu, N.M., Nas, S., 2010. Meyve ve sebzelerde bulunan fenolik bileşikler; yapıları ve önemleri. Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi 5(1): 20-35.
- [34] N. ERENOĞLU SON, "Fonksiyonel Gıdalar," In Beslenme Obezite ve Toplum Sağlığı , İstanbul: Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, 2019, pp.114-144.
- [35] Nuriler, T., Uyarcan, M. (2024). Fonksiyonel et ürünlerinin üretiminde probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotik kullanımına yönelik yeni eğilimler GIDA (2024) 49 (1) 25-38 doi: 10.15237/ gida.GD23111
- [36] Öncebe, S. (2019). Tüketicilerin fonksiyonel gıda tüketimini etkileyen faktörlerin belirlenmesi: Isparta İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- [37] Özçam, M., Obuz, E., Tosun, H., 2014. Aflatoxin M1 in Tarhana chips. Food Additives & Contaminants: Part B: Surveillance, 7(3): 182-185.
- [38] Q J Med 2002; 95:639–640 ,Association of Physicians 2002 Sloan, E., (2002). The Top 10 Functional Food Trends-The Next Generation. Food Technology. 56(4), 32-57
- [39] Ray, R. C. & Joshi, V. (2015). Fermented foods: past, present, and future. In R. C. Ray & D. Montet. Microorganisms and fermentation of traditional foods. Vol. 369, (pp. 1689–1699), CRC pres Taylor & Francis Group. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- [40] Seçim, Y. (2018) Türk Mutfağında Kullanılan bazı fonksiyonel gıdalar ve özellikleri. Uluslararası Global Turizm Araştırmaları Dergisi ,2(1):1-9.
- [41] Seçkin, A.K.ve Baladura,E.(2011).Süt ve Süt ürünlerinin Fonksiyonel özellikleri. C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi ISSN 1305-1385 C.B.U. Journal of Science 7.1 :27–38.
- [42] Sevilmiş, G. (2008). Bazı fonksiyonel gıdalarda tüketici kararları ve bunları etkileyen faktörlerin belirlenmesi üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans tezi/ Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [43] Slow Food Foundation (2018). Siyez Wheat Bulgur. [Online] <https://www.fondazioneSlowFood.com/en/slow-food-presidia/siyez-wheat-bulgur/> [Erişim Tarihi: 09.04.2024]
- [44] Son Erenoğlu, N. (2019). Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları. Şu kitapta: Çetin Yaman, Nazan Erenoğlu Son. Beslenme, obezite ve toplum sağlığı, İstanbul, 112-144.
- [45] Shandilya, U. K., & Sharma, A. (2017). Functional foods and their benefits: an overview. J. Nutr. Health Food Eng, 7, 247.
- [46] Şengün, İ.Y. ve Yahşi,Y.(2021). Probiyotiklerin Meyve ve Sebze Bazlı İçeceklerde Kullanımı. Akademik Gıda ,19(2) : 208-220, DOI: 10.24323.
- [47] Şimşekli,N. DOĞAN,İ.S.(2015). Geleneksel ve Fonksiyonel Ürün Olarak Maraş Tarhanası Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 5(4): 33-40, 2015

- [48] T.C. Kastamonu Valiliği (2016). Siyez Bulguru. [<https://kastamonu.tarimorman.gov.tr/Belgeler/Kutu%20Men%C3%BC/Siyez%20Bu%C4%9Fday%C4%B1%20ve%20Bulguru.pdf>] (Erişim Tarihi:09 Nisan 2023)
- [49] Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi , E-ISSN: 2146-0132, 10 (1): 44-47, 2017.
- [50] Türk Turizm Araştırmaları Dergisi 2019, 3(4): 1659-1680.
- [51] Uymaz B. 2010. Probiyotikler ve Kullanım Alanları. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 16(1): 95-104.
- [52] Various fruit and/or probiotic-added yogurts produced recently have made yogurt appeal to a wider audience (Kocaadam ve Acar, 2016).
- [53] Yeşilyurt,U., Bilgin,M.F. ve Beyoğlu,B.(2024). fonksiyonel gıdalar: antosiyanin makarna. Bıngöl 2nd international conference on social sciences. ISBN NR: 978-625-6283-42-8.
- [54] Yörükoğlu T, 2012. Maraş tarhanasının bazı özelliklerinin belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, Türkiye, 70 s.
- [55] Zeynep B. Guzel-Seydim , Tugba Kok-Tas , Annel K. Greene & Atif C. Seydim(2011) Review: Functional Properties of Kefir, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 51:3,261-268, DOI: 10.1080/10408390903579029
- [56] Zhou, L., Han, F., Lu, K., Qiao, Y., Li E. (2023) Comparative study on prebiotic effects of different types of prebiotics in an in vitro fermentation by gut microbiota of shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture, 574: 739687, doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.739687.

