

DIATOMİT İKAMESİNİN GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIATOMITE SUBSTITUTION ON MECHANICAL PROPERTIES AND ELEVATED TEMPERATURE RESISTANCE OF GEOPOLYMER MORTARS

Ezgi ÖRKLEMEZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
orklemezezgi@gmail.com Kayseri/Türkiye
ORCID NO: 0000-0003-0514-7370

Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
serhan@erciyes.edu.tr Kayseri/Türkiye
ORCID NO: 0000-0002-9932-2899

ÖZET

Son yıllarda gerek çevresel kaygılar gerekse uluslararası anlaşmalar (Avrupa Yeşil Mutabakatı) sebebiyle çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunun azaltılması ve daha az ekolojik ayak izine sahip alternatif ürünler geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple geopolimer bağlayıcılar çimentoya alternatif olabilecek ürünler arasında yer almaktadır. Geopolimer bağlayıcı sistemlerinde kullanılan uçucu kül, termik santrallerden atık ürün olarak oraya çıkmakta ve çevresel kaygılar oluşturmaktadır. Bu nedenle uçucu külün çimento esaslı sistemlere alternatif olabilecek geopolimer sistemlerde kullanılması, çevresel açıdan sürdürülebilir bir malzeme halini alması büyük önem taşımaktadır. Uçucu kül esaslı geopolimerlerin çeşitli yöntemlerle mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yakın zamanda önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer numunelere diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkisi araştırılmıştır. Karışımlarda uçucu küle ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ikame edilmiş ve bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) seçilmiş olup, bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 oranında Na⁺ ihtiva edecek şekilde kullanılmıştır. Üretilen geopolimer numunelere 24, 48 ve 72 saat 60°C'de ısl küre uygulanmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı, aşınma direnci tayini ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık testleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin mikroyapısını incelemek için geopolimer hamur numuneler üzerinde FESEM görüntüleri de alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre geopolimer harçlarda %1, %2, %3 diatomit ikamesi eğilme ve basınç dayanımını artırmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri (42,4 MPa) %3 oranında diatomit içeren harçlarda elde edilmiştir. FESEM görüntüleri sonucunda %3 diatomit ikamesi yapılan geopolimerin kontrol numunesine göre daha yoğun ve kompakt bir mikro yapıda olduğu görülmüştür. %3 oranında diatomit ikamesi aşınma direncini artırırken, yüksek sıcaklıklara karşı direnci artırmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Diatomit, Uçucu Kül, Geopolimer, Aşınma Direnci, Yüksek Sıcaklık Direnci

ABSTRACT

In recent years, due to both environmental concerns and international agreements (European Green Deal), it is aimed to reduce CO₂ emissions from cement production and to develop alternative products with less ecological footprints. For this reason, geopolimer binders are among the products that can be an alternative to cement. Fly ash used in geopolimer binder systems comes out as a waste product from thermal power plants and creates environmental concerns. For this reason, it is of great importance that fly ash is used in geopolimer systems, which can be an alternative to cement-based systems and become an environmentally sustainable material. Improving the mechanical properties of fly ash-based geopolymers by various methods has recently become important. This study investigated the effect of diatomite substitution on the physical and mechanical properties of geopolimer samples produced with F-class fly ash. In the mixtures, diatomite was substituted at 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% by weight of fly ash and used as a binder. Sodium

hydroxide (NaOH) was chosen as the activator, and it was used to contain 10% Na⁺ by weight according to the binder material. The thermal cure was applied to the produced geopolymer samples at 60°C for 24, 48, and 72 hours. Unit weight, flexural and compressive strength, abrasion resistance, and resistance to high temperatures were tested on geopolymer samples. In addition, FESEM images were taken of the geopolymer paste samples to examine the microstructure of the samples. According to the results obtained, 1%, 2%, and 3% diatomite substitution in geopolymer mortars increased flexural and compressive strengths. The highest compressive strength value (42.4 MPa) was obtained in mortars containing 3% diatomite. As a result of FESEM images, it was seen that the geopolymer with 3% diatomite substitution had a more dense and compact microstructure compared to the control sample. It was concluded that while 3% diatomite substitution increased wear resistance, it did not increase resistance to elevated temperatures.

Keywords: Diatomite, Fly Ash, Geopolymer, Abrasion Resistance, Elevated Temperature Resistance

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve katkı maddeleri ile üretilen yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Beton üretiminde kullanılan çimento önemli bir bağlayıcı malzeme olmasına rağmen, çimento üretimi enerji yoğun bir süreç olmakla birlikte yüksek miktarda CO₂ açığa çıkmasına sebep olur [1]–[4]. Çimento üretiminin olumsuz etkileri nedeniyle, birçok araştırmacı son yıllarda Portland çimentosuna alternatif olabilecek geopolimer bağlayıcı sistemler geliştirmeye çalışmıştır. Geopolimer sistemler sadece CO₂ salınımını azaltmaz, aynı zamanda bertaraf sorunlarını da çözer. Daha önce yapılan çalışmalarda Portland çimentolu sistemler yerine geopolimer sistemlerin kullanılmasının çimento kaynaklı küresel ısınma potansiyelini %53,7 oranında azalttığı açıklanmıştır [5]. Geopolimerlerin sentezinde doğal ve endüstriyel atıklardan elde edilen bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi bazı endüstriyel atık malzemeler veya metakaolin gibi doğal malzemeler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan puzolanlar, termik santrallerin atığı olan uçucu kül ve demir çelik fabrikalarının atığı olan yüksek fırın cürufudur [6], [7]. Uçucu kül, termik santralde elektrik üretimi esnasında açığa çıkan atık bir üründür. Uçucu kül, amorf yapıda bol miktarda reaktif silika ve alümina içerdiğinden yüksek puzolanik özellik gösterir [8]. Alkali aktivatörler, geopolimerin sentezi için bağlayıcı yapıdaki silikon oksit ve alüminyum oksitin çözülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geopolimer karışımının hazırlanmasında çözelti formunda potasyum hidroksit, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve potasyum silikat gibi alkaliler kullanılır. Geopolimerlerin sentezinde kullanılan çözeltideki alkali konsantrasyonu, mekanik ve durabilite özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Ayrıca kür süresi ve kür sıcaklığında geopolimerin özelliklerini etkileyen diğer önemli faktörlerdir [9]–[12]. Uçucu kül tabanlı geopolimer sistemlere yüksek oranda silis içeren farklı malzemelerin ikame edilmesi daha önce yapılan çalışmalar arasındadır. Yüksek oranda silis içeren nano veya mikro boyuttaki malzemelerin ikame edilmesi geopolimer harçların dayanım ve durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir [13], [14]. Silis dumanı ve nano SiO₂'nin yanı sıra yapısında yüksek oranda silis ihtiva eden diatomit, tek hücreli organizmalar olan diatomların silisli iskelet kalıntılarından oluşmaktadır. Diatomit yapısında alümina, demiroksit ve silika gibi daha birçok mineral içermektedir. Bağcı ve arkadaşları [15] çalışmalarında alternatif silis kaynağı olarak diatomit kullanmışlardır. Sinsiri ve arkadaşları [16] yüksek oranda diatomiti uçucu kül bazlı geopolimere ikame etmişler ve geopolimer sisteme etkilerini incelemişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, yüksek karbon emisyonuna neden olan çimento yerine daha ekonomik ve

sürdürülebilir geopolimer bağlayıcı malzemelerin özelliklerini geliştirmeye çalışmaktadır. Uçucu kül bazlı sistemlerde diatomit ikamesinin geopolimerizasyon sürecine katkıları araştırılmıştır. Ana bağlayıcı olarak uçucu kül ve ikame malzemesi olarak alg kabuklarının çökmesiyle oluşan yüksek miktarda silis içeren diatomit kullanılmıştır. Literatürde geopolimer sistemlerde alternatif silis kaynağı olarak diatomit kullanılmasının geopolimerizasyon sürecine katkıları konusunda yayınlanmış materyalin azlığı nedeniyle daha fazla araştırılmaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle geopolimer sistemlerde diatomit ikamesinin fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüksek oranda reaktif silika içeriğine sahip diatomit, bağlayıcı olarak kullanılan uçucu külün yerine ikame edilmiştir. Uçucu kül bazlı diatomit ikameli geopolimerler, NaOH ile aktive edilmiştir. Uçucu küle diatomit ikame oranları %1, %2, %3, %4 ve %5 olarak belirlenmiştir. Geopolimer harçlar 60°C’de 24, 48 ve 72 saat ısıtılı küre tabii tutulmuştur. Geopolimer harçların birim ağırlık, eğilme ve basınç mukavemeti, aşınma direnci, yüksek sıcaklık direnci gibi özellikleri incelenmiştir. Ayrıca mikroyapı özelliklerini incelemek için FESEM görüntüleri alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Uçucu kül ve diatomit

Çalışmada, Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer harca ikame edilmek üzere kullanılan diatomit ise Kayseri Hırka diatomit yatağından temin edilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) tarafından belirlenmiştir. Bağlayıcı malzemelerin fiziksel ve kimyasal kompozisyonları Tablo 1’ de, FESEM görüntüleri, fiziksel görünüşleri ve XRD grafikleri ise Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Çatalağzı uçucu külü ve diatomitin kimyasal ve fiziksel kompozisyonu

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI
Uçucu Kül	52.60	27.02	6.98	4.55	0.74	1.59	2.85	0.23	0.0043	-	-	3.42
Diatomit	75.70	6.55	3.82	0.99	0.87	1.23	2.68	-	-	0.48	0.26	7.39



Şekil 1. Uçucu Kül (a) FESEM görüntüsü, (b) fiziksel görünüm, (c) XRD grafiği



Şekil 2. Diatomit (a) FESEM görüntüsü, (b) fiziksel görünüm, (c) XRD grafiği

2.2. Kum

Çalışmada TS EN 196-1 [17] ile uyumlu CEN standart kumu kullanılmıştır. CEN standart kumun özgül ağırlığı 2.63'tür. Kumun elek analizi sonucu TS EN 196-1[17] standart sınır değerleri ile Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEN standart kumu elek analizi ve sınır değerler

Elek Çapı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elek Üstü Kalan (%)	0.0	7.0	34.5	71.0	86.5	99.5
Sınır Değerleri (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

2.3. Aktivatör ve su

Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Geopolimer harç karışımlarının üretiminde içme suyu kullanılmıştır. Harç karışımında TS EN 1008'e göre içme suyu kullanılması tavsiye edilir.

2.4 Karışım Dizayını

Uçucu kül ile hazırlanan kontrol harcı ve diatomit ikameli harçlardan oluşan toplam 6 grup harç hazırlanmıştır. Bu harçların karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir. NaOH ile aktive edilen harçlarda çözeltideki Na⁺ oranı bağlayıcı miktarının %10'udur. Su/bağlayıcı oranı 0.31 ve kum/bağlayıcı oranı 3'tür. Uçucu küle diatomit ikameleri, toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5'i olacak şekilde yapılmıştır.

Tablo 3. Karışım Oranları

Harç Kodu	Uçucu Kül (g)	Diatomit(g)	Kum (g)	NaOH (%)	Su (g)
D0	450	–	1350	10	140
D1	445.5	4.5	1350	10	140
D2	441	9.0	1350	10	140
D3	436.5	13.5	1350	10	140
D4	432	18.0	1350	10	140
D5	427.5	22.5	1350	10	140

2.5. Deneysel program

Çalışmada bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 Na⁺ içeren NaOH çözeltileri 24 saat önce hazırlanmıştır. Uçucu kül bazlı geopolimer harçlara toplam bağlayıcının %1, %2, %3, %4 ve %5'i oranında diatomit ikame edilmiştir. Harç karışımları 40x40x160 mm ve 71x71x71 mm boyutlarındaki

çelik kalıplara sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Üretilen geopolimer numuneler 60°C'de 24, 48 ve 72 saat boyunca ısı küre tabii tutulmuştur. Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler etüvden çıkarılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık testleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin mikroyapısını incelemek için geopolimer hamur numuneleri üzerinde FESEM görüntüleri alınmıştır.

2.5.1. Birim Ağırlık

Geopolimer harçlar, 60°C'lik bir etüvde 72 saatlik ısı küre sürecini tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmuştur. Numunelerin etüv kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Birim ağırlık değerleri, numunelerin kuru ağırlıklarının hacmine bölünmesiyle hesaplanmıştır.

2.5.2. Eğilme ve basınç dayanımı

Deneysel çalışma kapsamında, TS EN 196-1[17] standardına uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarında üretilen kontrol ve diatomit ikameli geopolimer numunelere tek noktadan eğilme ve basınç testi uygulanmıştır.

2.5.3. Aşınma direnci

60°C'de 72 saat ısı küre uygulanan 71x71x71 mm boyutlarındaki geopolimer harç numunelerinin aşınma dirençleri Böhme cihazı kullanılarak TS 2824 EN 1338'e [18] göre belirlenmiştir.

2.5.4. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık

60°C'de 72 saat ısı küre uygulanan D0, D3 ve D5 kodlu numuneler yüksek sıcaklık testine tabii tutulmak üzere seçilmiştir. Geopolimer numuneler sıcaklık testi yapılırken, hedef sıcaklığa (300°C, 600°C ve 900°C) kadar sıcaklıktaki artış 5°C/dakika olarak sabit tutulmuştur. Hedef sıcaklıklara ulaşıldıktan sonra numuneler bir saat süreyle yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Ardından numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmış ve numuneler eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabii tutulmuştur.

2.5.5. FESEM

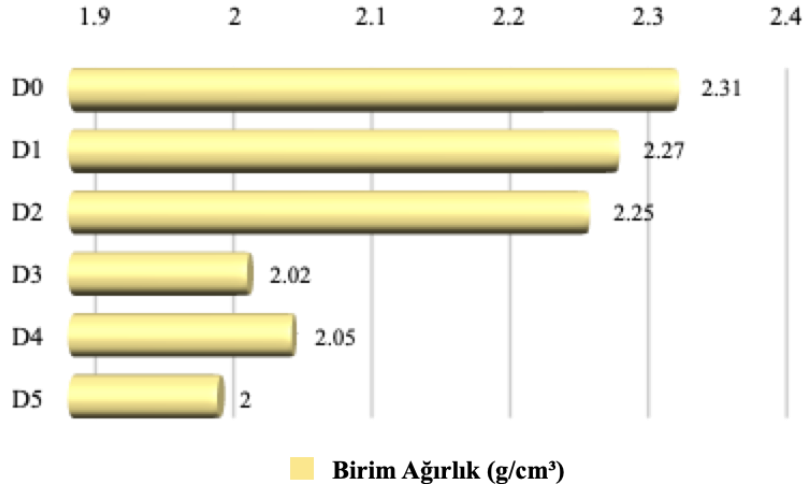
Diatomit ikamesinin geopolimer hamur numunelerinin mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmak için alan taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile incelemeler yapılmıştır. 60°C'de 72 saat ısı küre uygulanan numunelere önce vakum işlemi uygulanmış ardından altın paladyum ile kaplanmıştır. Zeiss (GeminiSEM 500) cihazı kullanılarak 1000, 20000 kez farklı büyütme yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Birim Ağırlık

Geopolimer harçların birim ağırlık değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Harçların birim ağırlık değerleri D0'dan D5'e sırasıyla 2.31 ile 2.00 g/cm³ arasında bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; diatomit ikamesi oranı arttıkça harç numunelerinin birim ağırlıklarının referans harç numunesine göre azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın nedeni, geopolimer harçlara ikame edilen diatomitin özgül ağırlığının uçucu külden daha düşük olmasıdır. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda diatomit ikamesinin

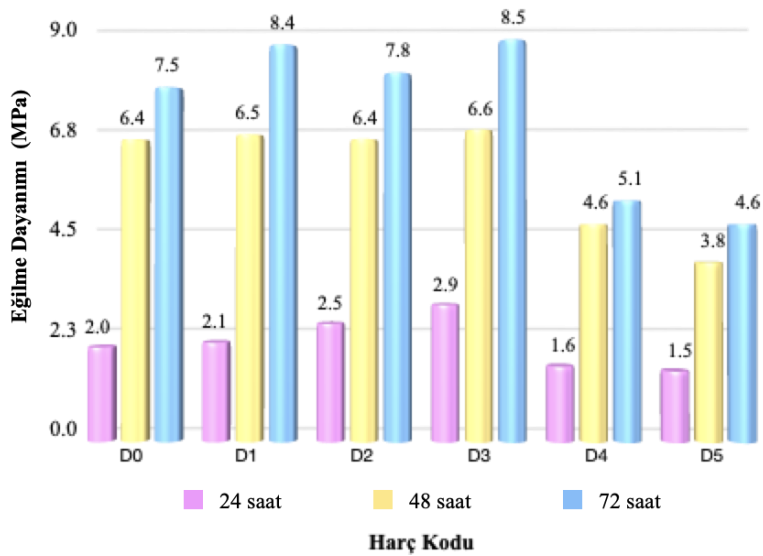
geopolimer harç karışımındaki birim ağırlığı azalttığı yayınlanmış çalışmalarla [16],[19],[20] benzerlik göstermiştir.



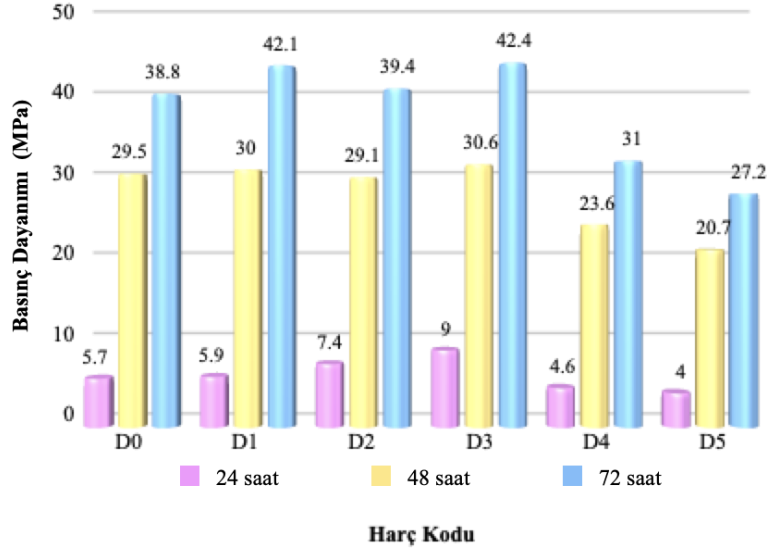
Şekil 3. Geopolimer harçların birim ağırlıkları (g/cm³)

3.2. Eğilme ve basınç dayanımı

60°C'de 24, 48 ve 72 saat ısıtma maruz bırakılan geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. %3 diatomit (D3) içeren geopolimer harç numunesine, 60°C'de 72 saat ısıtma uygulandığında en yüksek eğilme (8,5 MPa) ve basınç dayanımı (42,4 MPa) değerine ulaşmıştır. Diatomitsiz kontrol harcında aynı kuru koşullarında 7.5 MPa eğilme dayanımı ve 38,4 MPa basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarına göre uygun miktarda diatomit ikamesinin mekanik dayanımı gelişimine olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Şekil 4 ve Şekil 5'ten, ısıtma süresinin 24 saatten 72 saate çıkarılmasının hem eğilme hem de basınç dayanımı için dayanım gelişimine olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Sıcaklık artışının mekanik dayanıma etkisinin benzer bir sonucu Atis ve arkadaşları tarafından da rapor edilmiştir [21].



Şekil 4. Geopolimer harçların eğilme dayanımları

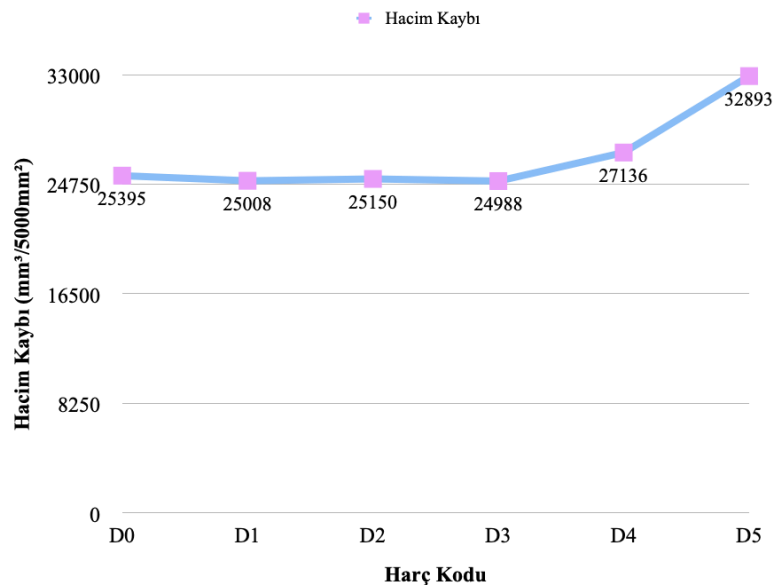


Şekil 5. Geopolimer harçların basınç dayanımları

D4 ve D5 harç karışımları gibi yüksek miktarda diatomit içeren karışımlar daha düşük mukavemet gelişimi göstermiştir. Bu durum diatomit parçacıklarının aglomerasyonu ile açıklanmaktadır. Önceki yapılan çalışmalara benzer şekilde [14], [22], [23] geopolimer harçta artan silis dumanı veya nano SiO₂ miktarının mikro yapıda aglomerasyona veya kısmen tıkanmaya neden olduğu bildirilmiştir. Dolayısıyla bu etki D4 ve D5 harç karışımlarında gözlemlendiği gibi dayanım gelişiminde bir miktar azalmaya neden olmuştur.

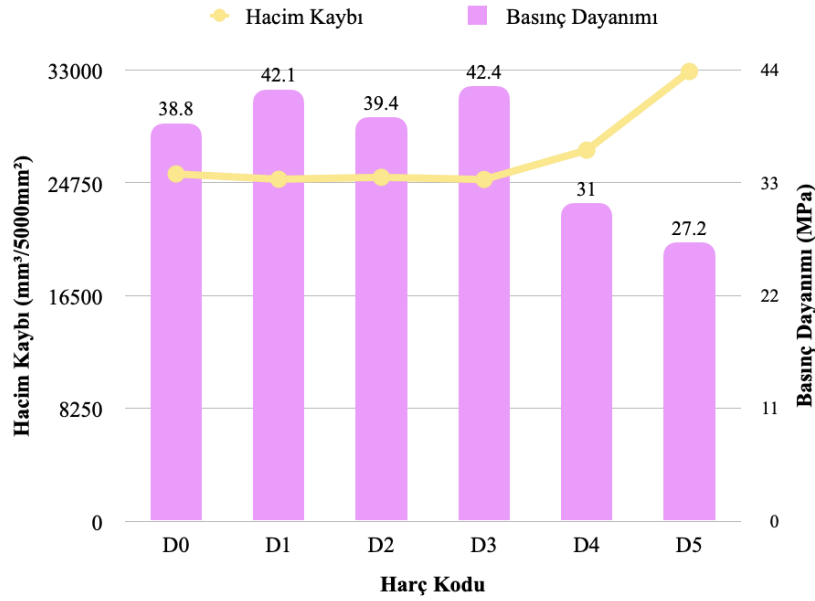
3.3. Aşınma direnci

Geopolimer harç numunelerin aşınma testi sonrası hacim kayıpları Şekil 6'da gösterilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla (25395mm³/5000mm²) en düşük hacim kaybı (24988mm³/5000mm²) %3 oranında diatomit ikamesi yapılan D3 numunesinde gerçekleşmiştir. En yüksek hacim kaybı ise (32893mm³/5000mm²) %5 diatomit ikamesi yapılan D5 numunesinde gerçekleşmiştir. D4 ve D5 numunelerinin aşınmaya karşı gösterdikleri dirençler azalmıştır.



Şekil 6. Geopolimer harçların hacim kayıpları

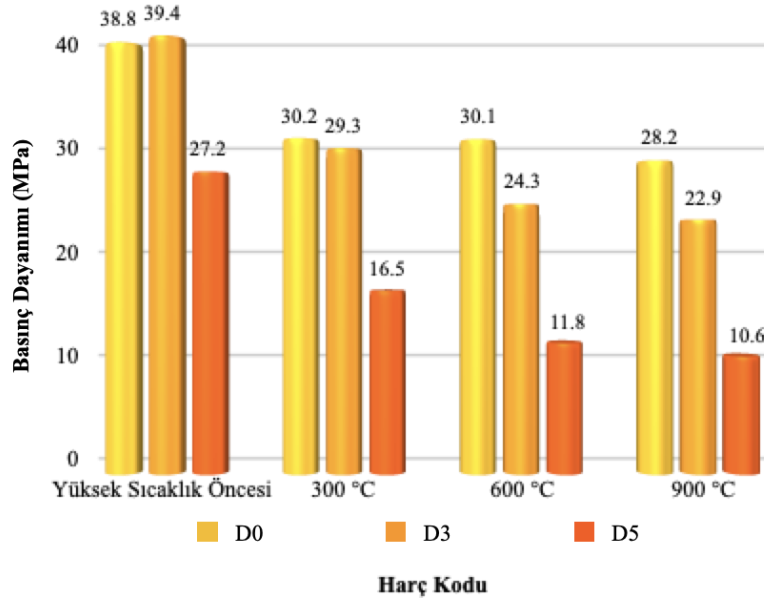
Geopolimer harç numunelerinde artan dayanımla hacim kaybı Şekil 7’de görüldüğü gibi azalmıştır. Dayanımın artmasıyla aşınma kaybının azaldığı literatürde açıklanmıştır [24], [25] Mevcut aşınma sonucu literatürde daha önceki çalışmalarla uyumludur.



Şekil 7. Geopolimer harçların hacim kayıpları ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

3.4. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık

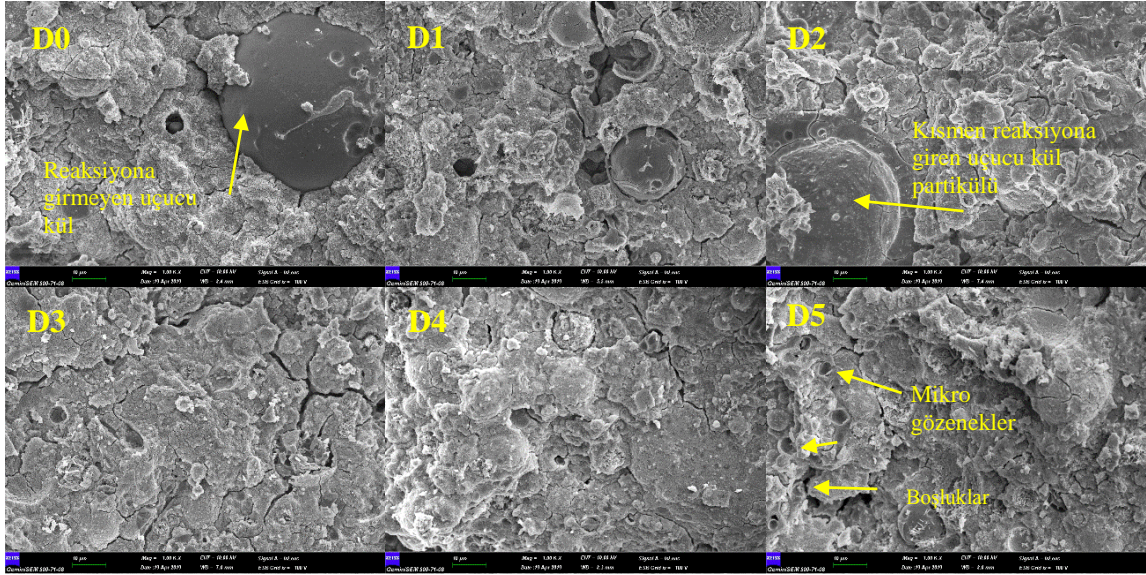
Geopolimer numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası (300°C, 600°C, 900°C) basınç dayanımı sonuçları Şekil 8’de sunulmuştur. Sıcaklıkların tamamında diatomit ikame oranı arttıkça yüksek sıcaklığa karşı direnç azalmış ve basınç dayanımı kaybı daha yüksek olmuştur. Geopolimer numunelerin basınç dayanımı kaybının büyük bir kısmı 300°C sıcaklıkta meydana gelmiştir. Sıcaklığın 300°C’den 600 ve 900°C’ye yükseltilmesi, basınç dayanımında ek kayıplara neden olmuştur, ancak 300°C’de gözlenen kadar fazla değildir. Uzun süre (72 saat) ısı kuru uygulanması geopolimer harçların yüksek sıcaklığa dirençlerini olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuz durum diatomit oranı arttıkça daha fazla artmıştır. Ayrıca Şekil 9’daki FESEM görüntülerinde de görülen aglomer diatomit, yüksek sıcaklıklarda su buharı kaçışını önleyen bir doldurma etkisine sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda, özellikle 900°C’de çıkamayan su buharı, yüksek basınç oluşturmuştur. Bu basınç yapısal değişikliklere, mikro çatlaklara ve mukavemet kaybına neden olmuştur. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda, silis dumanı (yüksek oranda reaktif silika içeren) ikameli geopolimer yapılarında benzer etkiler rapor edilmiştir [26], [27].



Şekil 8. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları

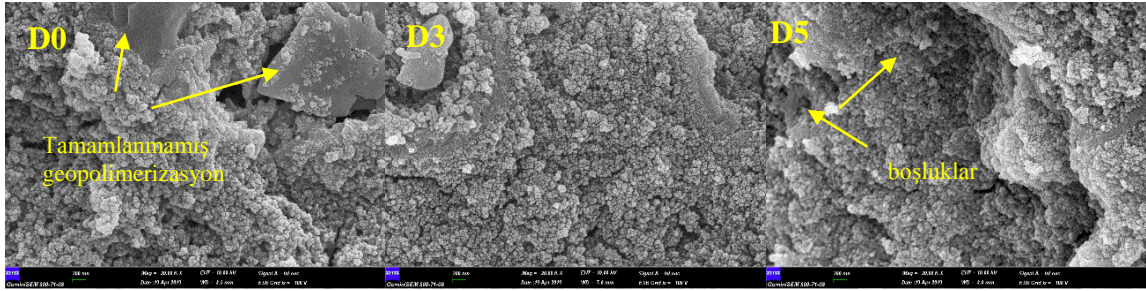
3.5. FESEM

Kontrol ve diatomit ikameli geopolimer hamur numunelerin FESEM görüntüleri Şekil 9'da gösterilmiştir. FESEM görüntülerinde, sodyum alumina silikat jel oluşumu, reaksiyona girmemiş, kısmen reaksiyona girmiş ve tamamen reaksiyona girmiş uçucu kül parçacıkları, boşluklar, gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumu açıkça gözlemlenmiştir. Bu morfolojik yapı literatürdeki önceki çalışmalarla uyumludur [14], [28]–[30]. Şekil 9'da D0 numunesinde küresel şekle sahip reaksiyona girmemiş uçucu kül partikülü açıkça görülmüştür. D1, D2 ve D3'e ait FESEM görüntüleri, diatomit ikamesinin geopolimerik reaksiyonu iyileştirdiğini ve reaksiyona girmemiş uçucu kül partikülünü azalttığını göstermektedir. FESEM görüntülerine göre, kontrol karışımı ile diatomit içeren karışımlar arasındaki temel fark, diatomitli geopolimer hamur matrislerinin kontrol hamura göre daha yoğun mikro yapılara sahip olmasıdır. En yoğun mikro yapı, D3'ün FESEM görüntüsünde gözlemlenmiştir. Öte yandan D5 hamur numunesinin FESEM görüntüsünde mikro gözenekler ve boşluklar açıkça gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Geopolimer harçların FESEM görüntüleri (1000 büyütme)

Şekil 10 da kontrol numunesi (D0) ve diatomit içeren geopolimer hamur numunelerinin (D3, D5) 20000 kat büyütülmüş FESEM görüntüleri gösterilmektedir. D0'ın FESEM görüntüsü, tamamlanmamış geopolimerik reaksiyonu göstermiştir. %3 diatomit ikamesi ile yapılan D3 hamur numunesi, kontrol numunesine kıyasla daha yoğun mikroyapı göstermiştir. D5 numunesi FESEM görüntüsü ise hamur numunenin boşluklarını ve gözenekliliğini göstermiştir.



Şekil 10. Geopolimer harçların FESEM görüntüleri (20000 büyütme)

4.SONUÇ

Bu deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1-Uçucu küle göre diatomitin özgül ağırlığı daha düşük olduğundan, diatomitli harçların birim ağırlıkları daha düşüktür.

2-Sabit solusyonda (aktivatör ve su) genel olarak uçucu kül bazlı geopolimere %3'e kadar diatomit ikame edilmesi, kontrol numunesine kıyasla geopolimer harcın eğilme ve basınç mukavemetini artırmıştır. %3'ten fazla diatomit ikamesi daha düşük mukavemet özelliklerine neden olmuştur.

3-Kontrol numunesine kıyasla %3 oranında diatomit ikamesine kadar numuneler aşınmaya karşı daha iyi direnç göstermiştir. Yüksek aşınma direnci, yüksek mukavemetli geopolimere karşılık gelmiştir.

4-Diatomit ikamesi, yüksek sıcaklığa karşı direnci artırmamıştır.

5-FESEM mikrografları %3'e kadar diatomit ikamesinin, kontrol numunesine kıyasla daha yoğun kompakt bir yapı oluşturduğu için geopolimer hamur numunelerinin mikroyapısını iyileştirdiğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından **FLY-2019-9195** kodlu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] C. L. Sabine *et al.*, “The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂,” *Science* (1979), vol. 305, no. July, pp. 5–12, 2004, doi: DOI: 10.1126/science.1097403.
- [2] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies,” *J Clean Prod*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.007.
- [3] H. Li *et al.*, “Sustainable resource opportunity for cane molasses: Use of cane molasses as a grinding aid in the production of Portland cement,” *J Clean Prod*, vol. 93, pp. 56–64, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.027.
- [4] R. A. Feely *et al.*, “Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans,” *Science* (1979), vol. 305, no. 5682, pp. 362–366, Jul. 2004, doi: 10.1126/SCIENCE.1097329.
- [5] L. Imtiaz *et al.*, “Life cycle impact assessment of recycled aggregate concrete, geopolymer concrete, and recycled aggregate-based geopolymer concrete,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 24, 2021, doi: 10.3390/su132413515.
- [6] S. K. John, Y. Nadir, and K. Giriya, “Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review,” *Constr Build Mater*, vol. 280, p. 122443, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122443.
- [7] S. Saha and C. Rajasekaran, “Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag,” *Constr Build Mater*, vol. 146, pp. 615–620, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.139.
- [8] A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, and K. Pimraksa, “Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar,” *J Hazard Mater*, vol. 168, no. 1, pp. 44–50, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120.
- [9] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindapasirt, “NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature,” *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118–2124, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.FUEL.2011.01.018.
- [10] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, “Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture,” *Constr Build Mater*, vol. 22, no. 7, pp. 1315–1322, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019.
- [11] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future,” *Cem Concr Res*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- [12] J. C. Swanepoel and C. A. Strydom, “Utilisation of fly ash in a geopolymeric material,” *Applied Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0883-2927(02)00005-7.

- [13] N. Toniolo and A. R. Boccaccini, "Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review," *Ceram Int*, vol. 43, no. 17, pp. 14545–14551, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2017.07.221.
- [14] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atiş, "Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer," *Structural Concrete*, vol. 22, no. S1, pp. E352–E367, Jan. 2021, doi: 10.1002/SUCO.201900479.
- [15] C. Bagci, G. P. Kutyla, and W. M. Kriven, "Fully reacted high strength geopolymer made with diatomite as a fumed silica alternative," *Ceram Int*, vol. 43, no. 17, pp. 14784–14790, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.222.
- [16] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, N. Ratchasima, and V. Sata, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Computers and Concrete*, vol. 9, no. 6, pp. 427–439, 2012, doi: 10.12989/cac.2012.9.6.427.
- [17] TS EN 196-1, *Methods of testing cement—part:1 determination of strength*. TSE, 2016.
- [18] T. Standard, "Turkish Standard Ts 2824 En 1338," no. 112, 2005.
- [19] M. Sciences, T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, and T. Sinsiri, "High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 20, no. August, pp. 310–318, 2013.
- [20] S. İlkentapar, E. Örklemmez, E. Üniversitesi, M. Fakültesi, İ. Mühendisliği, and İ. Yazar, "Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçlara Diatomit İkamesinin Isı İletkenliğe Etkisi The Effect of Diatomite Addition on Fly Ash Based Geopolymer Mortars on Thermal Conductivity Values," *Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology*, vol. 36, p. 2020, 2020.
- [21] C. D. Atiş, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. İlkentapar, and E. Luga, "Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration," *Constr Build Mater*, vol. 96, pp. 673–678, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.089.
- [22] Messina, Ferone, F. Colangelo, Roviello, and Cioffi, "Alkali activated waste fly ash as sustainable composite: Influence of curing and pozzolanic admixtures on the early-age physico-mechanical properties and residual strength after exposure at elevated temperature," *Compos B Eng*, vol. 132, pp. 161–169, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2017.08.012.
- [23] E. ÖRKLEMEZ, "Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkamesinin Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri Üzeri Etkilerinin Araştırılması," Erciyes University, 2019.
- [24] A. M. Neville, *Properties of Concrete Fifth Edition*. 2011. doi: 10.4135/9781412975704.n88.
- [25] S. İlkentapar, C. D. Atiş, O. Karahan, and E. B. Görür Avşaroğlu, "Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar," *Constr Build Mater*, vol. 151, pp. 363–369, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.041.
- [26] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N. P. Rajamane, and R. Jose, "Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites," *J Non Cryst Solids*, vol. 499, no. March, pp. 117–130, 2018, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027.

- [27] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, and N. P. Rajamane, "Fly ash geopolymer mortar: Impact of the substitution of river sand by copper slag as a fine aggregate on its thermal resistance properties," *J Clean Prod*, vol. 279, p. 123766, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123766.
- [28] E. D. Rodríguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, "Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder," *Cem Concr Compos*, vol. 35, no. 1, pp. 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025.
- [29] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, "Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature," *Constr Build Mater*, vol. 101, pp. 675–683, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044.
- [30] J. E. Oh, P. J. M. Monteiro, S. S. Jun, S. Choi, and S. M. Clark, "The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers," *Cem Concr Res*, vol. 40, no. 2, pp. 189–196, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.10.010.