



Research Article

Exergy Analysis of Solar Radiation Based on Measurement Data: A Study in Erzurum Province

Galip Kaltakkıran¹ *

¹ Department of Electric and Electronics, Faculty of Engineering, Ardahan University, 75002 Ardahan, Türkiye

* Correspondence: galipkaltakkiran@ardahan.edu.tr

Received: 4 November 2023; Accepted: 25 December 2023; Published: 31 December 2023

Abstract: In this study, the exergy potential of solar radiation energy is investigated using real measurement data such as average temperature and global solar radiation measured by the Erzurum/Tortum meteorology station between 2010 and 2021. Three different exergy models (Jeter, Spanner and Petela) are used to determine the region's global solar radiation exergy values. As a result of the analysis, the region's monthly average global solar radiation values are calculated as lowest in December with 6.92 MJ/m²-day and highest in July with 24.36 MJ/m²-day. The model-based long-term monthly average exergy-energy ratio is determined as 0.952897, 0.937196 and 0.937198 for Jeter, Spanner and Petela models, respectively. Among all models, the highest monthly and annual average global solar radiation exergy values are obtained with the Jeter model. Solar radiation exergy values of Spanner and Petela models are calculated the same. When the monthly average global solar radiation exergy values calculated according to the Jeter model are compared with the results of other models, the difference is maximum in August with 1.75%. Similarly, when comparing the annual average global solar radiation exergy values of Jeter and other models, the largest difference is in 2010 with 1.68%.

Keywords: solar radiation, exergy analysis, Erzurum

Araştırma Makalesi

Ölçüm Verilerine Dayalı Güneş Radyasyonunun Ekserji Analizi: Erzurum İlinde Bir Çalışma

Öz: Bu çalışmada 2010-2021 yılları arasında Erzurum/Tortum meteoroloji istasyonu tarafından ölçümü gerçekleştirilen ortalama sıcaklık ve global güneş ışınımı gibi gerçek ölçüm verileri kullanılarak güneş ışınım enerjisinin ekserji potansiyeli araştırılmıştır. Bölgenin global güneş ışınım ekserji değerlerini belirlemek için üç farklı ekserji modeli (Jeter, Spanner ve Petela) kullanılmıştır. Analizler neticesinde bölgenin aylık ortalama global güneş ışınım değerleri en düşük 6,92 MJ/m²-gün ile Aralık ayında ve en yüksek 24,36 MJ/m²-gün ile Temmuz ayında hesaplanmıştır. Model bazlı uzun yılların aylık ortalama ekserji-enerji oranı Jeter, Spanner ve Petela modelleri için sırasıyla 0,952897, 0,937196 ve 0,937198 olarak tespit edilmiştir. Tüm modeller içerisinde en yüksek aylık ve yıllık ortalama global güneş ışınım ekserjisi değerleri Jeter modeli ile elde edilmiştir. Spanner ve Petela modellerinin güneş ışınım ekserji değerleri aynı hesaplanmıştır. Jeter modeline göre hesaplanan aylık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri diğer modellerin sonuçları ile mukayese edildiğinde aradaki fark en fazla %1,75 ile Ağustos ayında olmuştur. Benzer şekilde, Jeter ve diğer modellerin yıllık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri kıyaslandığında en büyük fark %1,68 ile 2010 yılında görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: güneş radyasyonu, ekserji analizi, Erzurum

Citation: G. Kaltakkıran, "Exergy Analysis of Solar Radiation Based on Measurement Data: A Study in Erzurum Province", *Journal of Studies in Advanced Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 94-104, Dec 2023, doi: 10.5281/zenodo.10445102

1. Giriş

Dünya nüfusunun hızlı artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler gibi çeşitli etmenler gündem güne enerjiye olan talebi artırmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için talep edilen bu enerjinin karşılanmasında en büyük pay sahibi fosil kökenli enerji kaynaklarıdır. Dünya genelinde olduğu üzere ülkemizde de temel enerji kaynağı geniş oranda fosil yakıtlardır [1]. Ancak bu enerji kaynaklarının yoğun bir şekilde kullanımı gelecekte erişilebilir enerji kaynaklarında bazı sınırlamaları beraberinde getireceği öngörülebilir. Öyle ki, enerji kaynağına erişim, enerjinin taşınması ve oldukça maliyetli süreçler bu problemlerden sadece bazılarıdır.

Geniş bir ölçekte kullanılan fosil kökenli enerji kaynaklarının faydaları yanı sıra bazı zararlı etkileri de bulunmaktadır. Kirletici emisyonların çevreye salınması ile insan sağlığı ve canlıların olumsuz yönde etkilenmesi bunlardan birkaçıdır. Bu nedenle fosil yakıtların temiz bir enerji kaynağı olmaması, çevreye olan zararlı etkileri, maliyetler ve tükenme noktasına gelmesi gibi pek çok faktör, insanların daha sürdürülebilir ve daha çevreci yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimini teşvik etmektedir. Bu doğrultuda, yaşamımızdaki en temel enerji kaynağı olan güneş, bol ve sınırsız bir enerji kaynağı olması bakımından kendisine ilk sırada yer bulmaktadır [2], [3]. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli de dikkate alındığında güneş enerjisi, üzerinde çalışılması gereken öncelikli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır [1].

Güneş enerjisi dünya üzerinde bolca faydalanılan sonsuz bir enerji kaynağıdır. Bu özelliği nedeniyle herhangi bir bölge için bu enerjiden maksimum oranda yararlanılması amacıyla son yıllarda çok sayıda çalışma hazırlanmıştır. Başta güneş enerjisi sistemleri olmak üzere çeşitli enerji uygulamalarına yönelik çok sayıda çalışma için meteorolojik ve iklim verileri önemli birer veri kaynağı olmuştur [4]. Birçok iklim parametresi gibi güneş ışınım şiddeti değerleri meteoroloji istasyonları tarafından bölgesel olarak ölçülmektedir. Ölçümlerin yapılmadığı yerlerde ise ölçüm verilerine dayalı tahmin modellerinden faydalanılmaktadır [3]. Güneş ışınımının enerji uygulamalarında faydalanılan önemli bir parametre olmasından dolayı güneş enerjisinin sürdürülebilirliği, avantaj ve dezavantajlarının iyi incelenmesi ve maksimum enerji verimliliğinin sağlanması oldukça önemlidir.

Enerjinin sürdürülebilirliği temel olarak termodinamik analiz metotları ile değerlendirilebilir. Bu amaçla mevcut bir enerji sisteminin iyileştirilmesi, ekolojik, çevresel ve sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi noktasında enerji sisteminin ve süreçlerinin ekserji analizlerinin yapılması önemli bir adımdır. Ekserji, enerjinin maksimum oranda faydalı işe dönüştürülmesi şeklinde ifade edilir. Diğer bir ifadeyle, bir ortamda sisteme giren enerjinin mekanik ya da elektrik enerjisine dönüştürülebilen bölümünü göstermektedir [2]. Böylece bir enerji sisteminin çevresel etkisi ve sürdürülebilirliğinin ölçümü ekserji analizi ile desteklenebilir [5], [6]. Güneş enerjisindeki dönüşümün çevresel açıdan temiz bir enerji dönüşümü olması hem önemini ortaya koymakta hem de bu yönüyle güneş ışınımına olan talebi artırarak enerji sistemlerinin termodinamik analizlerinin yapılmasını ve yeniden tasarlanmalarını teşvik etmektedir [7].

Güneş enerjisi entropi sahibi bir enerji kaynağı olduğu için tamamen dönüştürülemez ve bu yüzden ekserji değeri %100'ün altında kalabilmektedir [2]. Hatta atmosferik koşullara bağlı olarak dünyaya ulaşan güneş ışınım enerjisinin ekserji içeriği %50 seviyesine kadar düşebilmektedir [7]. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin termodinamik analizleri yapılarak güneş ışınım enerjisinin ekserji içeriği belirlenmektedir. Bu amaçla araştırmacılar tarafından literatürde çok çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Bunlar arasında Petela [8] termal ışınım ekserjisini araştırmış ve ekserji değerlerinin belirlenmesinde kullanılan mevcut denklemleri incelemiştir. Güneş ışınım ekserjisi değerlerinin belirlenmesine yönelik olarak Arslanoğlu [2], Türkiye'nin yedi farklı ilinde küresel güneş ışınımını Angström-Preccott model ile tahmin etmeye çalışmış ve bu verilerin ekserji analizini yapmıştır. Bunun yanı sıra gerçek meteorolojik ölçüm verileri yardımıyla tahmin modellerinin sonuçlarını çeşitli istatistiksel metotlarla birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

Güneş ışınım ekserjisini araştırmak için Edalati vd. [9] çeşitli modeller geliştirmişlerdir. Yapay sinir ağı yardımıyla geliştirilen model sonuçlarını gerçek ölçüm verileriyle karşılaştırmışlardır. Önermiş oldukları modele ait korelasyon katsayılarının %97'den büyük olduğu ve bu yüksek doğruluk değerinin güneş ışınım potansiyelinin ölçüm olmaksızın büyük bir doğrulukla tahmin edilebileceğini göstermiştir. Beyazit vd. [10] tarafından yürütülen bir çalışmada, Diyarbakır ili için ölçümü yapılan güneş ışınım verileri (1999-2008) kullanılarak Jeter, Petela ve Spanner ekserji yaklaşımlarına göre ekserji analizi yapılmıştır. Global güneş

ışınımının ekserji/enerji oranının belirlenmesinin yanı sıra güneş ışıını enerji analizini yapılmıştır. Petela ve Spanner modellerinde en yüksek uzun dönem aylık ortalama güneş ışıını ekserji değeri 26,66 MJ/m² olarak hesaplanmıştır. Jeter modeline göre ise en yüksek uzun dönem aylık ortalama güneş ışıını değerin 27,13 MJ/m² ile Haziran ayında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Petela ve Spanner modellerinde güneş ışıını ekserji-enerji oranı 0,932 ile 0,939 arasında değişirken, Jeter modelinde bu değişkenlik 0,949-0,954 aralığında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar ışığında güneş ışıını ekserjisi tahminine yönelik korelasyon geliştirilmiştir.

Türkiye özelinde güneş ışıını ekserjisi değerlerinin hesaplanması amacıyla Kurtgöz vd. [11] güneş ışıını ekserji-enerji oranlarını Petela, Spanner ve Jeter yaklaşımları ile hesaplamışlardır. Türkiye için ekserji-enerji oranları ve ekserji değerleri haritalar yardımıyla sunulmuş çevresel ekonomik analizler yapılmıştır. Benzer şekilde Uçkan [12], Van ili için 1993-2007 yılları arası ölçüm verilerine dayalı güneş ışıını ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Öyle ki, farklı ekserji modelleri yardımıyla ekserji/enerji oranlarını ve ekserji değerlerini hesaplamıştır. Spanner ve Petela ekserji modelleri ile en büyük aylık ortalama güneş radyasyonu ekserji değerin 26,85 MJ/m² ile Haziran ayında olduğunu gözlerken, Jeter modeli sonuçlarının diğer modellere göre yaklaşık %1,7 kadar yüksek olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Petela ve Spanner modellerinde güneş ışıını ekserjisinin ışıını enerjisine oranının 0,934-0,939 arasında değiştiğini belirlemiştir. Yıllık güneş ışıını ekserjisinin en yüksek 19,68 MJ/m² ile 2000 yılında ve en düşük 16,50 MJ/m² ile 1993 yılında olduğunu tespit etmiştir.

Türkiye’de 8 farklı ilin güneş ışıını enerji ve ekserji değerlerinin araştırılması amacıyla Çevik [5], meteoroloji istasyonları tarafından ölçümü yapılan gerçek verilere dayalı istatistiksel modeller yardımıyla bölgelere ait yeni küresel güneş ışıını tahmin modelleri oluşturmuştur. Tahmin sonuçları gerçek ölçüm sonuçlarıyla mukayese edilerek doğruluğu incelenmiş ve Jeter, Petela ve Onyegegbu-Morhenne ekserji modellerine göre illerin ekserji analizleri yapılmıştır. Yeşilbudak vd. [13] tarafından yapılan bir çalışmada, Ankara iline yönelik uzun dönem ölçüm verilerine dayalı global güneş ışıını, güneşlenme süresi ve hava sıcaklığı gibi parametrelerin detaylı analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için üç ayrı ampirik metot yardımıyla modeller geliştirilmiş ve bu modellerin performansları istatistiksel olarak kıyaslanmıştır. En iyi istatistiksel sonuçları sergileyen modellerin ilin güneş karakteristiklerinin modellenmesinde başarılı olduğu ve bu modellerin benzer iklim şartlarına uygun farklı bölgeler için de önemli bir kaynak olacağı belirtilmiştir.

Küresel güneş ışıını doğru bir şekilde tahmin edilmesi güneş enerjisi sistemlerinin verimliliklerinin iyileştirilmesi noktasında oldukça önemlidir. Buna istinaden araştırmacılar gerçek ölçüm verileri yardımıyla global güneş ışıını şiddetinin olabildiğince doğru tahmin edilmesi amacıyla çeşitli yazılımlardan yararlanmaktadır. Bu amaçla, Kurtgöz ve Deniz [14] tarafından yürütülen bir çalışmada, güneş ışıını etkileyen meteorolojik ve coğrafi faktörler de dikkate alınarak yapay sinir ağları ile Türkiye’deki Göksun İstasyonu için global güneş ışıını tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte tahmin metodolojisinde girdi olarak yakındaki meteoroloji istasyonlarına ait global güneş ışıını verilerinin kullanılmasının etkisi de ayrıca incelenmiştir. Tahmin edilen ve ölçümü gerçekleştirilen global güneş ışıını değerlerinin ekserji analizleri Jeter, Spanner ve Petela yaklaşımları aracılığıyla yapılmıştır. Global güneş ışıını ekserji analizinde bu üç farklı ekserji modelinin kullanımı oldukça yaygındır. Hatta Hepbaslı ve Alsuhaibani [15] tarafından yürütülen bir çalışmada bu üç güneş ışıını ekserji modeli kapsamlı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır. Türkiye ve Suudi Arabistan’ın bazı bölgeleri için güneş ışıını ekserjisinin ışıını enerjisine oranının belirlenmesi amacıyla her bir ekserji modeli incelenmiştir. Ayrıca, ekserji modelleri arasında Jeter ekserji yaklaşımından elde edilen değerlerin Petela ve Spanner yaklaşımlarından elde edilen değerlere kıyasla %2 daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Farklı bölgeler özelinde global güneş ışıını ekserji içeriğinin etkilerinin araştırılmasına yönelik olarak Joshi vd. [16] tarafından bir güneş ekserji haritası geliştirilmeye çalışılmış ve güneş enerjisi uygulamalarının performansına etkileri incelenmiştir. Hindistan ve ABD’nin farklı şehirlerine yönelik yürüttükleri bu çalışmada, güneş ışıını ekserjisinin fotovoltaik termal sistemlerin ekserji verimlilikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hindistan Yeni Delhi bölgesi için modele dayalı ekserji verimlilik değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Maksimum ortalama ekserji verimleri yılın farklı aylarına göre Hindistan’ın farklı bölgelerinde değişkenlik göstermiştir. Sonuçta, her iki ülkenin iklim

koşulları altında fotovoltaik termal sistemlerin ekserji verimlilik performansının en iyi olduğu dönemin Ağustos ayı olduğu görülmüştür.

Güneş ışınım ekserjisi yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin faydalı enerjiye dönüşüm oranını göstermektedir. Bu oranın belirlenmesi oldukça önemli olup, güneş ışınım enerjisinin soğurulması aşamasında enerji kalitesindeki bozulma ekserji analizleri ile belirlenir. Alta vd. [17] tarafından Türkiye üzerindeki aylık ortalama güneş ışınımı ekserji değerlerinin dağılımının belirlenmesi amacıyla ölçüm verilerine dayalı bir haritalama çalışması yürütülmüştür. Burada hem güneş ışınımının ekserji değerleri belirlenmeye çalışılmış hem de Türkiye özelinde ilk kez yatay bir yüzey için ortalama aylık güneş ışınımı ve ortalama aylık hava sıcaklığı değerleri kullanılarak haritalama işlemi yapılmıştır. Hesaplamalar neticesinde Türkiye için aylık ortalama güneş ışınım ekserji değerinin $13,5 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ civarında ve yıllık ekserji-enerji oranının ise $0,93$ olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde yatay bir yüzey için karasal ve kara dışı güneş ışınım ekserjisinin güneş ışınım enerjisine oranının tespit edilmesi amacıyla Chu ve Liu [18] tarafından yatay yüzeyler için hava kütesinin ve eğimli yüzeyler için eğim açısının yersel güneş ışınım ekserjisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma neticesinde, artan eğim açısıyla birlikte karasal güneş ışınım ekserjisinin ilk başta arttığı daha sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Diğer yandan küresel karasal güneş ışınım ekserji değerlerinin hava kütesinin artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

Güneş ışınım ekserjisi veya entropisi üzerine çok sayıda araştırma literatürde yer almaya devam etmektedir. Ancak yazarlar arasında çeşitli tutarsızlıkların olması kavramlar arasında karmaşalara neden olmakta ve yanlış hesaplamaların yapılmasına sebep olmaktadır. Bu konunun aydınlığa kavuşturulması amacıyla Candau [19] tarafından bir çalışma yürütülmüş ve sadece klasik termodinamik kavramlara uygun olarak ışınım ekserjisinin hesaplanması önerilmiştir. Bu yolla elde edilen hesaplama sonuçlarının geçerliliğinin kolayca teyit edilebileceği düşünülmüş ve farklı ekserji yaklaşım modelleri incelenerek klasik termodinamik kavramlara uygun ekserji modellerinin geliştirilmesi önerilmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Erzurum ilinde Tortum meteoroloji istasyonu tarafından ölçümü gerçekleştirilen uzun dönem global güneş ışınımı ve hava sıcaklığı gibi meteorolojik verilere dayalı güneş ışınımının ekserji değerleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, her iki ölçüm verisine literatürde bulunan farklı ekserji modellerinin (Jeter, Spanner ve Petela) uygulaması yapılarak hesaplanan güneş ışınım ekserji değerleri mukayese edilmiştir.

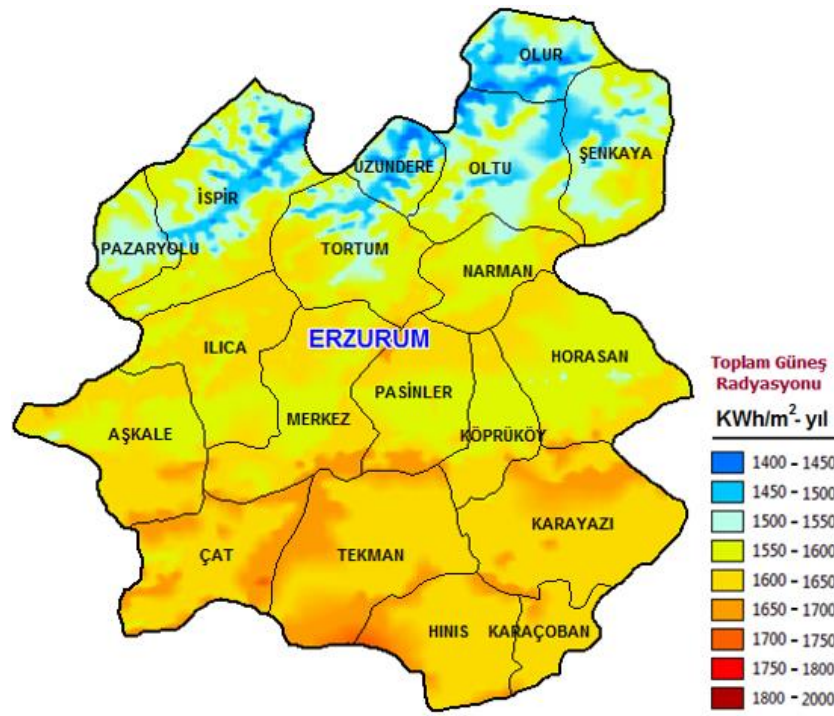
2. Yöntem

Önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş, insanoğlu için gereksinim duyulan enerjinin karşılanmasında oldukça büyük ve sonsuz bir enerji imkânı sunar. Çünkü güneş enerjisinin temiz, güvenilir ve erişim problemi olmaması gibi birçok avantajı vardır. Bu çalışmada ölçüm verilerine dayalı güneş ışınım enerjisinin ekserji değerlerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Erzurum/Tortum istasyonu tarafından ölçümü gerçekleştirilen son 12 yılın güncel global güneş ışınım değerleri ve bölgenin ortalama sıcaklık değerleri temin edilmiştir. Seçilen istasyonun numarası, enlem-boylam değerleri, rakım ve ölçüm verilerinin kaydedildiği yılların bilgisi Tablo 1'de detaylıca verilmiştir.

Tablo 1. Erzurum/Tortum meteoroloji istasyon bilgileri

Konum	İstasyon no	Enlem (ϕ)	Boylam	Yükseklik (m)	Dönem	Toplam yıl
Erzurum/Tortum	17688	$40,30^\circ$	$41,54^\circ$	1576	2010-2021	12

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü bünyesinde paylaşılan Erzurum ilinin yıllık ortalama güneş ışınım değerlerinin renklendirilmiş değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de gösterilen ışınım şiddeti değerleri incelendiğinde Erzurum ilinde güneyden kuzeye doğru gidildiğinde güneş ışınım değerlerinde bölgesel düşüşler görülmekte olup özellikle bu durum bölgenin kuzeydoğusunda belirgin bir şekilde görülmektedir. En yüksek ışınım şiddeti değerlerinin ise bölgenin güney ve güneydoğusunda olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Erzurum ili yıllık küresel güneş ışınımı değerlerinin değişimi [20].

2.1. Güneş Işınımı Ekserjisi

Isı transferi yöntemlerinden birisi olan ışınım, güneş enerjisi uygulamalarında önemli bir pay sahibidir. Güneş ışınımından maksimum faydalanma ilkesi hem araştırmacıların hem de enerji dönüşüm sistemlerinin limitlerini zorlamaktadır. Bundan dolayı güneş ışınımından elde edilebilecek en fazla faydanın belirlenmesi gerekir ve buna yönelik olarak da sürekli bir iyileştirme ihtiyacı kaçınılmazdır. Bu durumda güneş enerjisinin maksimum dönüşüm oranının belirlenmesi noktasında ekserji değerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Çünkü herhangi bir bölgede herhangi bir güneş enerjisi sistemi kurulumundan önce güneş enerjisinin faydalı işe dönüşüm oranının belirlenmesi araştırmacı veya yatırımcılar için oldukça önemlidir.

Bir maddenin ekserjisi, referans bir çevreye göre yapılması düşünülen işin maksimum yeteneğinin belirlenmesini ifade eder. Dolayısıyla ışınım sıcaklığının, çevre sıcaklığının düşük veya yüksek olmasına bakmadan bir iş yaptığı gerçeği vardır. Buna istinaden ışınımın ekserjisi çevre sıcaklığının dışındaki tüm sıcaklıklarda sıfırdan yüksektir [21]. Bu açıklamalar eşliğinde Petela [22] tarafından enerji, entropi ve ekserji korunumu yasalarından faydalanılarak “ T_0 ” sıcaklığında bulunan siyah bir yüzeyin ışınım ekserjisi Eş. (1) ile türetilmiştir. Ardından “ ε ” yayıcılık katsayısına sahip gri yüzeyler için ışınım ekserjisi Eş. (2) ile ifade edilmiştir [21]. Işınım ekserjisinin yanı sıra “ ε ” yayıcılık katsayısına sahip bir yüzeyin “ $E_{ışınım}$ ” ışınım enerjisi (kJ/m²s), Eş. (3) ile hesaplanmaktadır [8].

$$E_{x_{ışınım,s}} = \frac{ac}{12}(3T^4 + T_0^4 - 4T_0T^3) \quad (1)$$

$$E_{x_{ışınım,g}} = \varepsilon \frac{ac}{12}(3T^4 + T_0^4 - 4T_0T^3) \quad (2)$$

$$E_{ışınım} = \varepsilon \frac{ac}{4}T^4 \quad (3)$$

Burada “ $E_{x_{ışınım,s}}$ ” siyah yüzey ışınım ekserjisi (kJ/m²s), “ $E_{x_{ışınım,g}}$ ” gri yüzey ekserjisi (kJ/m²s), “ ε ” yüzeyin yayıcılık oranı (siyah yüzey için $\varepsilon=1$), “ a ” evrensel sabit ($7,561 \cdot 10^{-19}$ kJ/m³K⁴), “ c ” vakum ortamında ışığın hızı ($2,998 \cdot 10^8$ m/s), “ T ” mutlak sıcaklık (K) ve “ T_0 ” çevre sıcaklığıdır (K).

Termal ışınım için iş elde edilirken ışınım enerjisinin formunda bir bozulma olmamasından dolayı termal ışınım farklı yöntemlerle dönüştürülebilmektedir. Bu yüzden iş doğrudan ekserjiyi tanımlayabilmektedir. O

halde, termal ışınımın işe dönüşüm verimi “ η_e ” olmak üzere, ışınımın kullanılması neticesinde elde edilen işin ışınım enerjisine oranı Eş. (4) ile ifade edilebilir [8]. Ancak tersinir bir dönüşüm sürecinde ışınım enerjisinin maksimum iş değeri ($W_{mak.}$) ve maksimum dönüşüm ifadesi Eş. (5) ile yazılabilir. Eş. (5) güneş ışınım enerjisi için yazıldığında maksimum dönüşüm etkinliği veya güneş ışınım ekserji/enerji oranı (ψ), Eş. (6) ile ifade edilebilir [21].

$$\eta_e = \frac{W}{E_{ışınım}} \quad (4)$$

$$\eta_{e,max} = \frac{W_{mak.}}{E_{ışınım}} \quad (5)$$

$$\eta_{e,max} = \psi = \frac{Ex_{ışınım}}{E_{ışınım}} \quad (6)$$

Güneş ekserjisinin enerjiye oranı veya güneş ışınımından elde edilebilecek maksimum enerjinin göreceli potansiyeli (ψ) için literatürde çeşitli ekserji modelleri geliştirilmiştir. Literatürde oldukça sık rastlanan bu modellerden birisi Petela modelidir [21]. “ T_0 ” referans sıcaklığında güneş ışınımından elde edilen maksimum enerji dönüşümü için Petela tarafından önerilen ekserji ifadesi Eş. (7) ile verilmiştir.

$$\psi_{petela} = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right) \quad (7)$$

Burada “ $Ex_{ışınım}$ ” ifadesi güneş ışınımının ekserjisini ve “ $E_{ışınım}$ ” ise güneş enerjisini (kJ/m^2) temsil etmektedir. “ T_0 ” değişkeni analizi yapılan bölgenin ortalama çevre sıcaklığını (K) ve “ T_s ” ise güneşin sıcaklığını temsil etmektedir.

Petela ekserji modeli dışında literatürde Jeter tarafından geliştirilen başka bir ekserji modeli de yer almaktadır. Jeter [23], öncelikle güneşin sabit sıcaklık kaynağı olması bakımından dünya dışı ışınımın sürekli işe dönüşümü için Carnot verimini öne sürmüştür. Öyle ki, güneş ışınımının yayılmasının, güneşin sıcaklığına eşit bir termal enerji kaynağı ile ısı etkileşimine denk olduğu belirtilmiştir. Böylece dünya dışı güneş ışınımının ısı enerjisine eşit olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuçla beraber, termodinamik bir sistemde elde edilebilecek maksimum iş eldesinin tüm enerjinin tersinir bir işe dönüşmesi durumunda sağlanabileceği söylenebilir. Benzer bir çıkarımla sisteme giren enerji çeşidinin güneş ışınım enerjisi olması durumunda “ T_0 ” referans sıcaklığında güneş ışınımından elde edilen maksimum dönüşüm verimliliğinin (ψ) Eş. (8) ile ifade edilebileceği belirtilmiştir.

$$\psi_{jeter} = 1 - \left(\frac{T_0}{T_s} \right) \quad (8)$$

Maksimum enerji dönüşümü oranının referans hava sıcaklığı (T_0) ve güneş ışınım sıcaklığı (T_s) ile ilişkili olduğu yukarıda belirtilmiştir. Spanner [24] tarafından geliştirilen bir diğer ekserji modeli ise Eş. (9) ile ifade edilmiştir.

$$\psi_{spanner} = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right) \quad (9)$$

Böylece bu çalışma kapsamında, literatürde yer alan ekserji modelleri yardımıyla uzun yıllar ölçümü yapılan global güneş ışınımı ve ortalama sıcaklık verilerine dayalı güneş ışınımının model bazlı ekserji değerlerinin hesaplanması ve karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

3. Araştırma Bulguları

2010-2021 yılları arasında meteoroloji istasyonu tarafından ölçümü gerçekleştirilen ortalama sıcaklık ve global güneş ışınım değerlerinin aylık ve yıllık ortalamaları hesaplanarak literatürde yer alan üç farklı ekserji modeli (Jeter, Spanner ve Petela) yardımıyla güneş ışınımının ekserji içeriği belirlenmiştir. Erzurum/Tortum meteoroloji istasyonu için aylık ve yıllık bazda hesaplanan ekserji/enerji oranları ve ekserji değerleri Tablo 2 ve 3 ile detaylıca verilmiştir. Tablo 2’de ölçümü yapılan dış ortam sıcaklığı “ T_0 ” referans sıcaklığı olarak Kelvin cinsinden hesaplamalara katılmıştır. Burada “ ψ ” ifadesi güneş ışınımından elde edilebilecek en fazla enerji potansiyelini veya ekserji/enerji oranını göstermektedir.

12 yıllık ölçüm periyodu için aylık bazda ortalama günlük global güneş ışınımı verilerinin ekserji değerleri üç farklı ekserji modeli için Eş. (1), (2) ve (3) yardımıyla her bir ay için hesaplanmıştır. Tablo 2’de verilen değerler ve Eş. (4) dikkate alındığında anlaşılacağı üzere yatay yüzeye gelen güneş ışınım değerlerinden daha düşük ekserji değerleri hesaplanmıştır. Aylık ortalama en yüksek ve en düşük sıcaklıklar sırasıyla Ağustos (294,38 K) ve Ocak (271,24 K) ayında gözlenmiştir. Jeter modeline göre güneş ışınımının ekserji/enerji oranı 0,950938 (Ağustos) ile 0,954793 (Ocak) arasında değişkenlik gösterirken aynı modele göre hesaplanan güneş ışınımı ekserji değerleri incelendiğinde ise 6,60 MJ/m²-gün (Aralık) ile 23,17 MJ/m²-gün (Temmuz) arasında değişmiştir.

Tablo 2. Güneş ışınımı ölçüm verilerinin uzun yıllar aylık ortalamalarının ekserji değerleri

Aylar	Sıcaklık T_0 (K)	Ekserji/Enerji oranı			Güneş ışınım ekserjisi (MJ/m ² -gün)		
		ψ_{Jeter}	$\psi_{Spanner}$	ψ_{Petela}	EX _{Jeter}	EX _{Spanner}	EX _{Petela}
Ocak	271,24	0,954793	0,939724	0,939725	7,53	7,41	7,41
Şubat	272,53	0,954578	0,939437	0,939438	11,36	11,18	11,18
Mart	276,49	0,953918	0,938557	0,938559	14,51	14,28	14,28
Nisan	281,78	0,953038	0,937383	0,937385	17,02	16,74	16,74
Mayıs	286,44	0,952260	0,936346	0,936348	18,11	17,80	17,80
Haziran	290,92	0,951514	0,935352	0,935354	21,52	21,16	21,16
Temmuz	294,36	0,950940	0,934587	0,934589	23,17	22,77	22,77
Ağustos	294,38	0,950938	0,934583	0,934585	21,02	20,66	20,66
Eylül	289,98	0,951671	0,935561	0,935563	16,64	16,36	16,36
Ekim	283,67	0,952722	0,936963	0,936965	11,46	11,27	11,27
Kasım	277,13	0,953811	0,938415	0,938416	8,70	8,56	8,56
Aralık	272,48	0,954586	0,939448	0,939450	6,60	6,50	6,50

Spanner yaklaşımına göre hesaplanan ekserji/enerji oranı 0,934583 (Ağustos) ve 0,939724 (Ocak) arasında gerçekleşirken, Petela modelinin güneş ışınım ekserji/enerji oranları 0,934585 (Ağustos) ile 0,939725 (Ocak) arasında değişmiştir. Spanner ve Petela yaklaşımlarına göre en düşük ve en yüksek aylık ortalama güneş ışınım ekserjileri sırasıyla 6,50 MJ/m²-gün ile Aralık ve 22,77 MJ/m²-gün ile Temmuz aylarında gözlenmiştir. Spanner ve Petela yaklaşımları birbirlerine çok yakın sonuçlar gösterirken, Jeter modeli her iki yaklaşıma kıyasla daha yüksek sonuçlar sunmuştur. Spanner ve Petela yaklaşımlarının sonuçlarının birbirlerine yakın bulunmasının temel nedeni modellere ait eşitliklerin yaklaşık aynı olmasıdır. Öyle ki, Tablo 2’den anlaşılacağı üzere her iki modele ait ekserji/enerji oranları incelendiğinde aralarındaki farkın çok düşük olduğu görülmektedir.

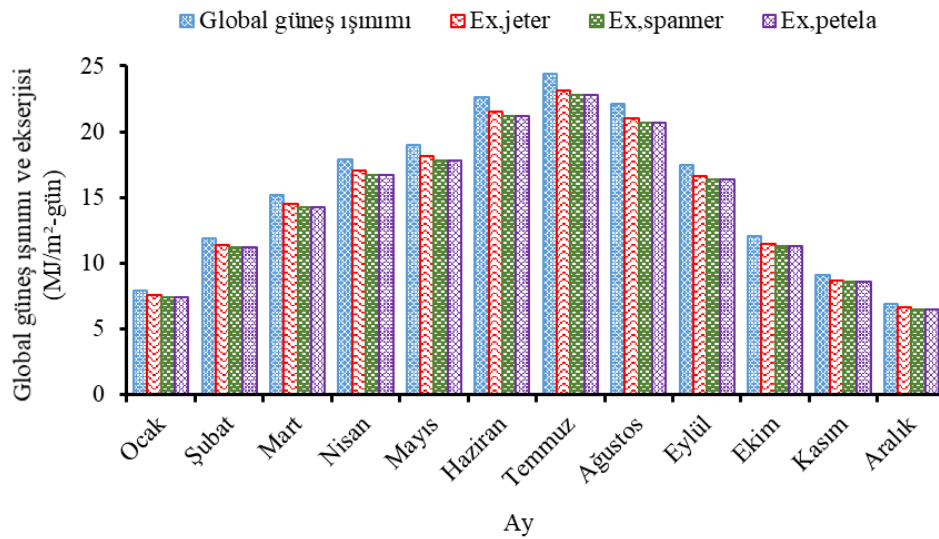
2010-2021 yılları arası yıllık ortalama günlük global güneş ışınımının ekserji/enerji oranları ve ekserji değerleri her bir ekserji modeli için ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 3 ile detaylıca sunulmuştur. Jeter modeline göre hesaplanan güneş ışınımı ekserji değerleri 13,21 MJ/m²-gün ile 2010 ve 15,50 MJ/m²-gün ile 2021 yılları arasında değişmiştir. Birbirleriyle oldukça yakın sonuçlar gösteren Spanner ve Petela modellerine göre hesaplanan uzun yıllar güneş ışınımı ekserji değerleri 12,99 MJ/m²-gün ile 15,25 MJ/m²-gün aralığında değişkenlik göstermiştir. Jeter modeli ile hesaplanan ekserji/enerji oranlarının 0,952708 (2010) ile 0,953142 (2011) arasında değiştiği görülmüştür. Spanner ve Petela modellerinin sonuçları değerlendirildiğinde birbirlerine çok yakın değerler göstermiş olup, ekserji/enerji oranlarının 0,9369 ile 0,9375 arasında değiştiği

görülmüştür. Yıllık ortalama sıcaklık değerleri 281,15 K (2011) ve 283,75 K (2010) arasında %0,924 kadar değişkenlik göstermiştir.

Tablo 3. Güneş ışınımı ölçüm verilerinin uzun yıllar yıllık ortalamalarının ekserji değerleri

Yıllar	Sıcaklık T ₀ (K)	Ekserji/ Enerji oranı			Güneş ışınım ekserjisi (MJ/m ² -gün)		
		Ψ _{Jeter}	Ψ _{Spanner}	Ψ _{Petela}	EX _{Jeter}	EX _{Spanner}	EX _{Petela}
2010	283,75	0,952708	0,936944	0,936946	13,21	12,99	12,99
2011	281,15	0,953142	0,937522	0,937524	14,60	14,36	14,36
2012	281,85	0,953025	0,937367	0,937368	13,80	13,57	13,57
2013	282,05	0,952992	0,937322	0,937324	14,32	14,09	14,09
2014	283,35	0,952775	0,937033	0,937035	14,38	14,15	14,15
2015	282,45	0,952925	0,937233	0,937235	14,70	14,46	14,46
2016	281,85	0,953025	0,937367	0,937368	14,35	14,12	14,12
2017	282,65	0,952892	0,937189	0,937191	15,49	15,23	15,23
2018	283,65	0,952725	0,936967	0,936968	14,40	14,16	14,16
2019	282,85	0,952858	0,937144	0,937146	14,96	14,71	14,71
2020	282,65	0,952892	0,937189	0,937191	14,84	14,60	14,60
2021	283,25	0,952792	0,937056	0,937057	15,50	15,25	15,25

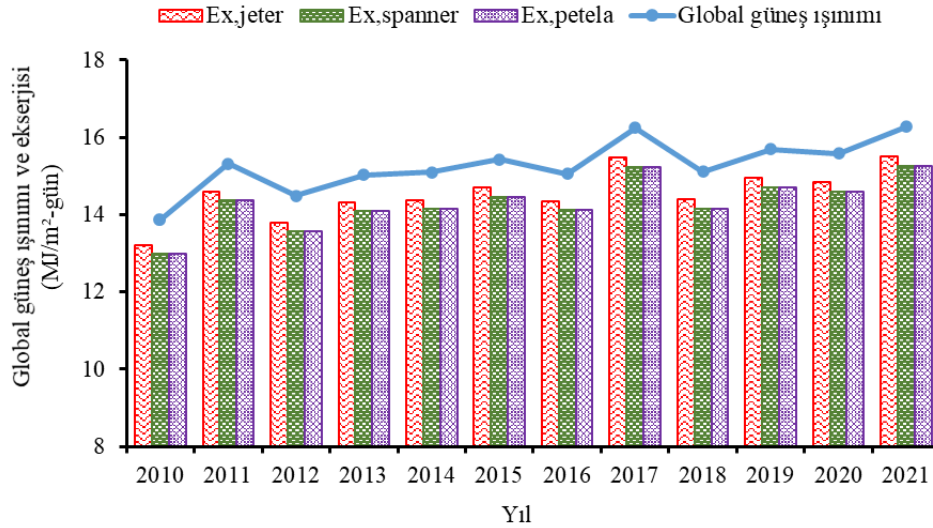
Güneş ışınımının ekserji değerleri ile ekserji/enerji oranlarının aylık ve yıllık ortalamaları Tablo 2 ve 3 ile verilmiştir. Meteoroloji istasyonu tarafından elde edilen global ışınım değerlerinin ve her bir ekserji modeline göre hesaplanan ışınım ekserji değerlerinin aylık ve yıllık değişimleri ise sırasıyla Şekil 2 ve 3 ile sunulmuştur. Şekil 2’de global güneş ışınımı ve ekserji değerlerinin uzun yıllar aylık ortalama değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Burada global güneş ışınımı ile Jeter, Spanner ve Petela ekserji modeli sonuçları incelendiğinde en yüksek ışınım enerjisi ve ekserji değerlerinin Temmuz ayında sırasıyla 24,36 MJ/m²-gün, 23,17 MJ/m²-gün, 22,77 MJ/m²-gün ve 22,77 MJ/m²-gün olarak gerçekleştiği görülmüştür. 12 yıllık uzun yıllar aylık ortalama en düşük global güneş ışınım verileri ve ekserji değerleri Aralık ayında sırasıyla 6,92 MJ/m²-gün, 6,60 MJ/m²-gün, 6,50 MJ/m²-gün ve 6,50 MJ/m²-gün olarak gerçekleşmiştir. Spanner ve Petela modeli yaklaşımlarına ait sonuçlar incelendiğinde her iki modelin ekserji/enerji oranları birbirine çok yakın hesaplandığından dolayı güneş ışınım ekserji değerleri de aynı bulunmuştur.



Şekil 2. Uzun yıllar aylık ortalama global güneş ışınımı ve ekserji değerlerini değişimi

2010-2021 yılları arasında yıllık ortalama global güneş ışınımı ve her bir ekserji modeli için hesaplanan ekserji değerlerinin değişimi Şekil 3 ile sunulmuştur. Şekil 3 incelendiğinde her bir yıl için hesaplanan global güneş ışınımı ve model ekserji değerlerinde belirgin farkların olmadığı görülmektedir. Tüm yılların global güneş ışınım değerlerine bakıldığında en düşük 2010 yılında 13,87 MJ/m²-gün ve en yüksek 2021 yılında 16,27 MJ/m²-gün olarak belirlenmiştir. Bu iki değer arasındaki değişim %17,3 olarak tespit edilmiştir. Jeter,

Spanner ve Petela ekserji modellerinin yıllık ortalama ekserji değerleri incelendiğinde en düşük sonuçlar Jeter modeli için 2010 yılında $13,21 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ ve Spanner ile Petela modelleri için $12,99 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ olarak elde edilmiştir. Jeter modeli için en yüksek ekserji değeri $15,50 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ olurken, Spanner ve Petela modelleri için bu değer $15,25 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ olarak kaydedilmiştir. Global güneş ışınımının yıllık değerleri için Spanner ve Petela modellerinin en yüksek ekserji değerleri aynı bulunmuştur.



Şekil 3. Yıllık ortalama global güneş ışınımı ve ekserji değerlerinin yıllara göre değişimi

Global güneş ışınımı ve her bir ekserji modeline ait ışınım ekserjisi değerlerinin uzun yıllar ortalamaları arasında doğrudan bir korelasyon kurulabilir. Öyle ki, bu korelasyonlar yardımıyla ölçümü yapılan global güneş ışınım şiddeti değerlerinin yıllık ortalaması kullanılarak doğrudan ortalama ekserji değeri elde edilebilir. Diğer bir ifadeyle her bir ekserji modeline göre elde edilen yıllık ekserji/enerji oranlarının uzun yıllar ortalamaları bu korelasyonların sabit katsayısını ifade etmektedir. Böylece, global güneş ışınımının ve Jeter modeli ile elde edilen ekserji değerlerinin uzun yıllar ortalamaları arasında Eş. (10) ile gösterilen bir eşitlik türetilebilir. Benzer şekilde Spanner ve Petela modellerinden elde edilen ekserji değerleri aynı olduğundan iki model için ortak bir korelasyon belirlenmiş ve Eş. (11) ile verilmiştir. Böylece ilgili bölge için yıllık ortalama global ışınım değerleri belirlenen korelasyon katsayısı ile çarpıldığında güneş ışınımının ekserji potansiyeli yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$E_{x,Jeter} = 0,9529 * E_{Işınım} \quad (10)$$

$$E_{x,Spanner-Petela} = 0,9372 * E_{Işınım} \quad (11)$$

4. Sonuçlar

Güneş enerji sistemlerinin dizayn, kurulum ve verimlerinin iyileştirilmesi aşamasında global güneş ışınımı ve ekserji değerlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda Türkiye'nin Erzurum ilinde yer alan Tortum meteoroloji istasyonu tarafından 2010-2021 yılları arasında ölçümü gerçekleştirilen global güneş ışınım ve ortalama sıcaklık değerleri yardımıyla yatay bir yüzeye gelen global güneş ışınım ekserjisi değerlerini belirlemek için literatürde yer alan üç farklı ekserji yaklaşımı (Jeter, Spanner ve Petela) incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen temel bulgular şu şekildedir:

- Uzun yıllar aylık ortalama global güneş ışınım değerleri en düşük Aralık ayında $6,92 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ ve en yüksek Temmuz ayında $24,36 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca en düşük ve en yüksek yıllık ortalama global güneş ışınım değerleri sırasıyla 2010 yılında $13,87 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ ve 2021 yılında $16,27 \text{ MJ/m}^2\text{-gün}$ olarak tespit edilmiştir.

- Uzun yıllar aylık ortalama ekserji-enerji oranı (ψ) Jeter modeli için 0,952897, Spanner modeli için 0,937196 ve Petela modeli için 0,937198 olarak bulunmuştur.
- Jeter modeli ile elde edilen uzun yıllar aylık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri 6,60-23,17 MJ/m²-gün arasında değişirken, Spanner ve Petela ekserji modeli ile bu aralık 6,50-22,77 MJ/m²-gün arasında belirlenmiştir.
- Yıllık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri Jeter modeli için 13,21-15,50 MJ/m²-gün ve Spanner ve Petela ekserji modeli için 12,99-15,25 MJ/m²-gün aralığında tespit edilmiştir.
- Spanner ve Petela ekserji modellerinden elde edilen aylık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri Jeter modeli sonuçlarıyla mukayese edildiğinde, aylık güneş ışınım ekserji değerleri arasındaki fark en düşük %1,60 ile Ocak ayında ve en yüksek %1,75 ile Ağustos ayında gerçekleşmiştir.
- Spanner ve Petela ekserji yaklaşımlarına göre hesaplanan yıllık ortalama global güneş ışınım ekserji değerleri Jeter modeli sonuçlarıyla kıyaslandığında, yıllık güneş ışınım ekserji değerleri arasındaki farkın en düşük %1,66 ile 2011 yılında ve en yüksek %1,68 ile 2010 yılında olduğu tespit edilmiştir.
- Doğrudan global güneş ışınım verileri kullanılmasıyla yıllık ortalama global güneş ışınım ekserji değerlerinin yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için her bir ekserji modeli için doğrusal eşitlik geliştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] G. Kaltakkıran and K. Bakırcı, “Yüzey Eğimlerinin Güneş Enerjisi Potansiyeline Etkisi,” *Tesisat Mühendisliği*, no. 175, pp. 30–38, 2020.
- [2] N. Arslanoglu, “Empirical modeling of solar radiation exergy for Turkey,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 108, pp. 1033–1040, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.002.
- [3] K. Bakırcı, “Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey,” *Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 485–501, 2009.
- [4] G. Kaltakkıran and K. Bakırcı, “Ardahan İlinde Enerji Uygulamaları için Meteoroloji ve İklim Verilerinin Analizi,” *J. Inst. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 2026–2041, 2023.
- [5] A. Çevik, “Uzun süreli verilere dayalı güneş radyasyonunun ekserji ve enerji analizi,” Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, 2021.
- [6] S. Bilgen and İ. Sarıkaya, “Exergy for environment, ecology and sustainable development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1115–1131, 2015.
- [7] S. Kabelac, “Exergy of solar radiation,” *Int. J. energy Technol. policy*, vol. 3, no. 1–2, pp. 115–122, 2005.
- [8] R. Petela, “Exergy of undiluted thermal radiation,” *Sol. Energy*, vol. 74, no. 6, pp. 469–488, 2003, doi: 10.1016/S0038-092X(03)00226-3.
- [9] S. Edalati, M. Ameri, M. Iranmanesh, and H. Tarmahi, “Modelling and drawing energy and exergy of solar radiation,” *Int. J. Exergy*, vol. 19, no. 4, pp. 544–568, 2016, doi: 10.1504/IJEX.2016.075890.
- [10] N. İ. Beyazıt, H. Bulut, and F. Ünal, “Diyarbakır İli İçin Uzun Dönemli Güneş Radyasyonunun Ekserji Analizi,” *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, 2019.
- [11] Y. Kurtgoz, E. Deniz, and I. Turker, “Solar radiation exergy and enviroeconomic analysis for Turkey,” *Int. J. Exergy*, vol. 24, no. 2–4, pp. 281–300, 2017, doi: 10.1504/IJEX.2017.087675.
- [12] İ. Uçkan, “Exergy analysis of solar radiation based on long term for Van city,” *Politek. Derg.*, vol. 20, no. 3, pp. 579–584, 2017.
- [13] M. Yeşilbudak, M. Çolak, and R. Bayındır, “Ankara İlinin Uzun Dönem Global Güneş Işınım Şiddeti, Güneşlenme Süresi ve Hava Sıcaklığı Verilerinin Analizi ve Eğri Uydurma Metotlarıyla Modellenmesi,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 189–203, 2018, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.336830.
- [14] Y. Kurtgoz and E. Deniz, “Global solar radiation estimation using artificial neural network by the addition of nearby meteorological stations’ solar radiation data and exergy of solar radiation: A case study,” *Int. J. Exergy*, vol. 21, no. 3, pp. 315–330, 2016, doi: 10.1504/IJEX.2016.079309.
- [15] A. Hepbaslı and Z. Alsuhaibani, “Estimating and comparing the exergetic solar radiation values of various climate

- regions for solar energy utilization,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 36, no. 7, pp. 764–773, 2014, doi: 10.1080/15567036.2010.545807.
- [16] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V Reddy, “Development of new solar exergy maps,” *Int. J. energy Res.*, vol. 33, no. 8, pp. 709–718, 2009.
- [17] D. Alta, C. Ertekin, and F. Evrendilek, “Quantifying spatio-temporal dynamics of solar radiation exergy over Turkey,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 2821–2828, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.05.004.
- [18] S. X. Chu and L. H. Liu, “Analysis of terrestrial solar radiation exergy,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1390–1404, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.011.
- [19] Y. Candau, “On the exergy of radiation,” *Sol. Energy*, vol. 75, no. 3, pp. 241–247, 2003, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.012.
- [20] GEPA, “Türkiye Güneş Radyasyon Dağılımı,” 2023. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/25.aspx> (accessed Oct. 25, 2023).
- [21] R. Petela, “Exergy of heat radiation,” *J. Heat Transf.*, vol. 2, pp. 187–192, 1964.
- [22] R. Petela, “Exergy of radiation of a perfect gray body,” *Energetyka*, vol. 5, pp. 33–45, 1961.
- [23] S. M. Jeter, “Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation,” *Sol. energy*, vol. 26, no. 3, pp. 231–236, 1981.
- [24] D. C. Spanner, *Introduction to thermodynamics*. London: London and New York: Academic Press, 1964.