

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Doç.Dr. Zafer ORTATEPE

yaz
yayınları

Enerji Sistemleri Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Doç.Dr. Zafer ORTATEPE

yaz
yayınları

2025

**Enerji Sistemleri Mühendisliği
Değerlendirmeleri**

Editör: Doç.Dr. Zafer ORTATEPE

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-83-4

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Türkiye’de Bulunan Güneş Enerji Santrallerindeki Elektrik Üretiminin Araştırılması ve Yapay Zekâda Modellenmesi	1
--	----------

Ömer Osman Orhan, Ahmet Beyzade Demirpolat

Transesterifikasyon Yöntemi İle Biyodizel Üretiminde, Reaksiyon Sıcaklığının, Üretim Verimi Üzerine Etkisinin DeneySEL Olarak Araştırılması	22
--	-----------

Mahmut Uyar, Muhammed Mustafa Uyar

Biyodizel Üretim Projesinde İhtiyaç Duyulan Isı Enerjisinin, Güneş Enerjili Su Isıtma Sistemlerinden Karşılanması	38
--	-----------

Muhammed Mustafa UYAR, Mahmut UYAR

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

TÜRKİYE’DE BULUNAN GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNDEKİ ELEKTRİK ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI VE YAPAY ZEKÂDA MODELLENMESİ

Ömer Osman ORHAN¹

Ahmet Beyzade DEMİRPOLAT²

1. GİRİŞ

Enerji, bir ülkenin gelişmişlik seviyesini belirleyen temel faktörlerden biridir. Enerji sadece sanayi kullanımı için değil, aynı zamanda insanların günlük ihtiyaçlarını karşılamak açısından da kritik bir öneme sahiptir [1]. Enerji, fosil kökenli kaynaklar olan kömür, petrol, doğalgaz gibi unsurlardan veya güneş, rüzgâr, su gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilir [2]. Ancak, fosil kaynakların azalması, bu kaynakların maliyetinin artması, çevresel etkileri ve gelecekte tükenme riski gibi faktörler, enerji talebinin artmasına rağmen ekonomik, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırarak, enerji sektöründe dönüşümü teşvik etmektedir [3]. İthal edilen fosil yakıtlar, ülkemizde enerji yeterliliği konusunda önemli bir engel oluşturmaktadır. Ancak Türkiye, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanarak kendi kendine yetebilirlik potansiyeline sahiptir [4]. Yapılan araştırmalara göre, Türkiye'nin elektrik üretimindeki kendi kendine yetme oranı,

¹ Yüksek Lisans, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi/ Biyomedikal Mühendisliği, omeroorhan@hotmail.com, ORCID: 0009-0009-4384-8830.

² Doç. Dr., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksek Okulu/ Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ahmetb.demirpolat@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2533-3381.

1980'de %77 iken 2014'te %37'ye düşmüştür. Bu değişimdeki ana faktörler arasında artan enerji talebi, ithal doğal gaz ve taş kömürüne olan bağımlılığın artmasıdır. Aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının yeterince kullanılamaması da önemli bir rol oynamaktadır [5]. 2016 yılı "Yenilenebilir Enerji Kapasitesi İstatistikleri"ne göre, dünya genelinde kullanılan yenilenebilir enerji kapasitesi geçen yıllara kıyaslandığında %8.72 artmıştır. Bu artış oranına katkıda bulunan kaynaklar ve katkı oranları şu şekildedir: Biyoenerjide 8.6 GW, Hidroelektrik enerjisinde 35.1 GW, Rüzgâr enerjisinde 51.2 GW ve katkı payı en yüksek 70.8 GW ile güneş enerjisinde sağlanmıştır [6].

Ülkemiz, coğrafi konumunun avantajıyla önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahip bulunmaktadır. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) tarafından yapılan değerlendirmelere göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat olarak kaydedilmiş ve ortalama yıllık toplam ışıınım değeri ise 1527,46 kWh / m² olarak hesaplanmıştır (Url 1).

Güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımını incelediğimizde, Türkiye'deki farklı bölgelerin yıllık ortalama güneş ışıınım şiddetlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmektedir. Doğu Anadolu bölgesinde 1365 kWh/ m², Güneydoğu Anadolu Bölgesinde 1460 kWh/ m², İç Anadolu Bölgesinde 1314 kWh/ m², Ege Bölgesinde 1304 kWh/m², Akdeniz Bölgesinde 1390 kWh/ m², Marmara Bölgesinde 1168 kWh/ m² olduğu gözlemlenmektedir. En düşük güneş ışıınım şiddeti ise Karadeniz de olup güneş ışıınım şiddeti 1120 kWh/ m²'dir. Bu süreleri dikkate aldığımızda Güneydoğu Anadolu Bölgesi yılda 3015 saat güneşlenme süresi ile en yüksek bölgemiz olduğu görülmektedir. Akdeniz Bölgesinde 2956 saat, Ege bölgesinde 2738 saat, İç Anadolu Bölgesinde 2628 saat güneşlenme süresi görülürken, Doğu Anadolu Bölgesinde 2664 saat, Marmara Bölgesinde 2409 saat Karadeniz Bölgesinde 1971 saat olarak saptanmıştır. Türkiye, coğrafi konumu sayesinde

güneş enerji potansiyeli bakımından birçok ülkeye göre avantajlı bir konumda bulunmaktadır (Url 2).

Güneşlenme süreleri bölgesel farklılıklar gösterdiği gibi, fotovoltaik sistemlerin konumlarına göre de değişmektedir. Doğru konumlandırılmış bir fotovoltaik panelden, çevresel koşullar göz önüne alınarak en yüksek verim elde edilebilir. Ayrıca, fotovoltaik panellerin performansını etkileyen faktörler arasında iklim koşulları da bulunmaktadır. Sıcaklık, rüzgâr, nem gibi faktörlerin, panelin performansını güneş radyasyonu ile birlikte etkilediği bilinmektedir. Fotovoltaik sistemlerinden elde edilecek faydanın sağlanabilmesi için sistem en yüksek verime ulaşacak şekilde tasarlanmalıdır.

Fotovoltaik hücreler güneş radyasyonunu direkt elektrik enerjisine dönüştürmesinin sağladığı birçok avantajın olduğu görülmektedir. Ancak, bu avantajların yanı sıra iki önemli detay bulunmaktadır: İlk olarak, elektrik enerjisi üretimindeki dönüşümün verimliliğindeki düşüklük; ikinci olarak da panellerin üretmiş olduğu elektrik enerjisi miktarının hava koşullarıyla birlikte değişkenlik göstermesidir.

Bu çalışmada Türkiye’de Akdeniz Bölgesinde yer alan Antalya ilinin farklı günlerde değişen iklim koşullarına bağlı olarak üretilen elektrik miktarları, güneş enerjisi santrallerinden saha çalışmaları sonucunda yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Model oluşturmak ve alınan ölçümlerin doğruluğunu belirlemek amacıyla fotovoltaik panellerin üreteceği gücü sıcaklık, nem, rüzgâr ve ışıınım değeri gibi parametrelere bağlı olarak tahmin etmek üzere yapay zekâ algoritması eğitildi. İklim değişkenliğinin güneş enerjisinin faydalı ve verimli kullanımına etkisi, güneş enerjisi santrallerinde saha çalışmaları sonucunda yapılan ölçümlerin verimini etkileyen faktörler ve üretilen enerji verilerinin yapay zekâ ile modellenmesi konuları ele alınmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma, yapay zekâ algoritmaları kullanılarak bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme ve istatistiksel analiz için gerekli olan materyaller, kullanılan uygulamalar ve yazılım kütüphanelerinde mevcuttur. Bu materyaller, yaygın kullanımları, çeşitli örnek uygulamaları ve kolay erişim imkânları nedeniyle tercih edilmiştir.

Python, 1990 yılında Guido van Rossum tarafından tasarlanarak geliştirilen, nesne yönelimli, modüler yapıda ve etkileşimli bir yüksek seviyeli programlama dilidir. Geliştirilmesi Python Yazılım Vakfı tarafından sürdürülmektedir.

Bu dilin modüler yapısı, çeşitli veri alanlarına rahat bir şekilde entegre olmasını sağlar. Donat'ın ifadesine göre, Python'un esnekliği sayesinde hemen her türlü platformda sorunsuz bir şekilde çalışabilir [7].

Numpy (Numerical Python), bilimsel hesaplamaların yapılmasına ve yüksek seviyeli matematiksel fonksiyonların daha az kod yazımı ile oluşturulmasına yardımcı olmak amacıyla Python tarafından desteklenen bir açık kaynak kütüphanedir. Bu kütüphane, araştırmacılar ve bilim insanları tarafından sıklıkla tercih edilen, çok boyutlu dizilerin ve matrislerin hızlı bir şekilde oluşturulmasını sağlayan bir araçtır.

Bu Python Kütüphanesi, veri görselleştirmesi (Data visualization) amacıyla kullanılmakta olan açık bir kaynak araçtır. İki ya da üç boyutlu grafik çizimlerinde kullanışlı olmakla beraber ve Numpy Kütüphanesi ile de uyumlu çalışabilmektedir. Aynı zamanda çeşitli grafik türlerini destekler, bu grafik türleri arasında çizgi grafikleri, sütun grafikleri, daire grafikleri, görüntü işleme ve daha birçok seçenek bulunmaktadır.

Bu kütüphane, Python dilinde yazılmış ve veri analizi ile manipülasyon için kullanılan bir açık kaynak araçtır. Proje içerisine veri aktarımını kolaylaştırmak üzere tasarlanmış olup, csv, txt, xls gibi çeşitli formatları destekler. "Dataframe" ve "Series" türleriyle çalışır. Özellikle makine öğrenimi uygulamalarında sıkça kullanılan "Dataframe" yapıları, ilişkisel veri tabanı sistemlerindeki tabloları andırır. Pandas, "Dataframe" yapıları üzerinde çeşitli veri işlemleri gerçekleştirmek için kullanılır; örneğin, sütun veya satır ekleme/silme, tabloları birleştirme, ayırma gibi işlemler bu kütüphane aracılığıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

2.1. Veri Setleri

Bu çalışmada Antalya ilinin son 10 yıllık meteoroloji verileri ile saha çalışmaları sonucu elde edilen günlük üretilen elektrik miktarları veri setleri kullanılmıştır. Bu veri setlerinde günlük meteorolojik veriler ile günlük üretilen elektrik miktarları eşleştirilmiştir. Eşleşen değerler model eğitmek için kullanılmıştır. Eşleşen veriler aşağıda belirtilmiştir.

Antalya ilinin son 10 yılına ait 3929 meteorolojik verileri ile 02.10.2020 tarihinden itibaren üretime başlamış Serra GES e ait elde edilen veriler eşleştirilmiş ve 3215 adet veri elde edilmiştir.

2.2. Modelin Seçilmesi ve Değerlendirme

Makine öğrenimi prosedürleri, verilerden öğrenme sağlayarak modeller oluşturur (fit) ve bu modellerle tahminler yapar. Ancak, her veri için tek bir evrensel model bulunmamakta ve veri özelliklerine bağlı olarak farklı makine öğrenmesi teknikleri birbirlerine üstünlük sağlayabilmektedir. Bu nedenle, tipik bir veri analizinde kritik bir adım, bir dizi aday modeli değerlendirmek ve ardından en uygun olanını seçmektir [8].

Kısacası, model seçimi, bir eğitim veri kümesi için çeşitli aday makine öğrenimi modelleri arasından en uygun olanını belirleme sürecidir. Bu aşamada, farklı modellerin performansı değerlendirilir ve en etkili sonuçları sağlayan model seçilir. Ardından, seçilen model test edilir ve uygulanır [9].

Bu çalışmada üretilecek olan gücün tahmin edilmesi için regresyon analizinden faydalanılmıştır. Bu tahmin için gerekli olan iklimsel veriler (sıcaklık, rüzgâr, nem, radyasyon değeri, güneşlenme şiddeti) Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Üretilen elektrik miktarı ise Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi'nden alınmıştır. İklimsel verilerin üretilen güce olan etkisini incelemek için regresyon algoritmaları kullanılmıştır. Makine öğrenmesi algoritmaları, haritalama fonksiyonunun formuyla ilgili güçlü varsayımlarına bağlı olarak doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Doğrusal yöntemler, özelliklerin nihai sonucu yalnızca doğrusal bir model aracılığıyla etkilediğini varsayar. Diğer taraftan, doğrusal olmayan yöntemler daha genel bir perspektife sahiptir ve performansları model varsayımına daha az bağımlıdır [10]. Bu kısımda, çalışma sırasında kullanılan makine öğrenimi regresyon algoritmaları (6 adet doğrusal ve 6 adet doğrusal olmayan) ile performans metrikleri kısaca açıklanmıştır.

2.2.1. Doğrusal Regresyon Algoritmaları

2.2.1.1. Çoklu Doğrusal Regresyon (Multiple Linear Regression - MLR)

Çoklu doğrusal regresyon modeli, n gözlem birimine sahip birden fazla öngörücü değişkeni ve tek çıktı değişkenini içeren veriler için basit doğrusal regresyon modelinin genişletilmiş bir versiyonu olarak açıklanır. Bu model, $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}$ öngörücü değişkenleri ile birlikte çıktı değişkeni y_i 'yi ($i=1,2,\dots,n$) içerir [11].

2.2.1.2. Temel Bileşen Regresyonu (Principal Component Regression - PCR)

Temel Bileşen Regresyonu, yaygın bir boyut azaltma tekniği olup çoklu bağlantı problemlerini çözmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu teknik, bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri azaltmak için bağımsız değişkenlerin doğrusal kombinasyonlarını oluşturarak değişken sayısını azaltır. Temel bileşen regresyonu, yanlı bir regresyon tekniği olup, bağımlı değişkeni doğrudan bağımsız değişkenlere regresyonlamak yerine, bağımsız değişkenleri temel bileşenlere indirgeyerek regresyon modeli oluşturma fikrine dayanır [12].

2.2.1.3. Kısmi En Küçük Kareler Regresyon (Partial Least Squares Regression - PLSR)

1960'larda Herman Wold tarafından bir ekonometri tekniği olarak geliştirilmiştir [13]. Kısmi en küçük kareler regresyonu, çok sayıda faktörün ve yüksek düzeyde çoklu bağlantının bulunduğu durumlarda, yanıtları tahmin etmeye odaklanan bir yöntemdir. Bu yöntem, değişkenler arasındaki temel ilişkiyi anlamak yerine, yanıtların tahmin edilmesine odaklanarak model oluşturur. Amaç, regresyon problemindeki çoklu bağlantı sorununu azaltırken, tahmin için yararlı olan bağımsız değişkenlerdeki bilgileri yakalayan bileşenler oluşturmaktır [14].

2.2.1.4. Ridge Regresyon (RR)

Ridge regresyon yöntemi, çoklu bağlantı problemlerini ele almak için en yaygın yöntemlerden biridir ve özellikle örneklem boyutu küçük olduğunda diğer yaklaşımlardan daha iyi performans gösterir [15-16]. Önceki iki teknik olan PCR ve PLCR, çoklu bağlantı problemini aşmak için var olan bağımsız değişkenlerin kombinasyonlarından oluşan daha az sayıda değişken seti ile tahmin modeli oluşturmaya amaçlayan bir prensibe dayanıyordu. Ancak ridge, lasso regresyonu ve

elasticNet, cezalandırma prensibine dayanmaktadır. Bu modeller, genellikle küçültme veya daraltma modelleri olarak adlandırılır [17].

2.2.1.5. Lasso Regresyonu (LR)

Yüksek boyutlu verilerin regresyonu için uygun bir yöntem olan Ridge Regresyonu (RR), nihai modeldeki tüm bağımsız değişkenleri içermektedir. Buna karşın, Lasso regresyonu en az önemli özelliklerin ağırlıklarını tamamen ortadan kaldırma eğilimindedir, yani onları sifıra ayarlama. Başka bir deyişle, Lasso regresyonu aynı zamanda özellik seçimi yapmaktadır. Bu nedenle Lasso, aşırı öğrenmeyi önleyen yorumlanabilir modeller vermektedir [18].

2.2.1.6. ElasticNet

Ridge ve Lasso regresyonu arasında bir köprü sağlayan bir yaklaşım olan ElasticNet, katsayıların ve her iki algoritmanın düzenleme normu ile eğitilmesine dayanır [19]. Büyük balıkları kaçırmayan bir ağ gibi davranarak bu adı almıştır [20].

2.2.2. Doğrusal Olamayan Regresyon Algoritmaları

2.2.2.1. K-en Yakın Komşu

(K Nearest Neighbors - KNN)

Eğitim setindeki en yakın k örneği kullanarak tahminlerde bulunur [21]. KNN algoritması, sınıflandırma ve regresyon için parametrik olmayan bir yaklaşımı temsil eder [22]. KNN algoritması, tek bir hiperparametreye, yani k değerine bağlıdır. Bu değer çok düşükse aşırı uyarlanma (overfitting) riski oluşturabilirken, çok yüksekse yetersiz uyum (underfitting) durumu meydana gelebilir. Ayrıca, KNN algoritmasının dezavantajlarından biri, veri miktarı arttıkça mesafe hesaplama işlemlerinden kaynaklanan işlem yükünün artma eğilimindedir [23].

2.2.2.2. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron - MLP)

MLP'ler, evrensel tahminçiler olarak işlev gören sinir ağı modelleridir; yani, herhangi bir sürekli fonksiyona yaklaşabilirler [24]. İleri beslemeli algoritmalara ait olan çok katmanlı algılayıcılar, giriş ve çıkış katmanlarına ek olarak bir veya birden fazla gizli katman içeren yapıları temsil ederler. Bu gizli katmanlar, bilgileri girişten başlayarak çıkışa doğru aktaran bir akışa sahiptir [25].

2.2.2.3. Regresyon Ağaçları (Regression Trees - RT)

RT (Random Forest), basit (if/then/else) karar kurallarıyla çalışan ve genellikle denetimli öğrenme bağlamında tercih edilen bir algoritmadır [26]. RT, sınıflandırma veya regresyon modelleri oluşturmak için ağaç yapısı biçiminde kullanılan bir algoritmadır. Temel amacı, veri setindeki karmaşık yapıları basit karar yapılarına dönüştürmektir. Veri seti, belirli bir hedef değişkene göre homojen alt gruplara ayrılarak ağaçlar oluşturulur [27]. Algoritmanın sonucu, karar düğümleri içeren bir ağaç yapısıdır. RT'ler, kategorik ve sayısal verileri işleyebilme yeteneğine sahiptirler [28].

2.2.2.4. Rastsal Orman (Random Forest - RF)

Rastgele Orman (Random Forest), torbalı (bagged) regresyon ağaçlarının özel bir durumudur. Korelasyonu azaltmak amacıyla ağaç oluşturma sürecinde yalnızca rastgele seçilen tahmin edicilerin kullanıldığı bir yöntemdir [29]. RF, birçok Rastgele Ağaç'tan oluşan bir orman şeklinde tasarlanmıştır. Topluluk yöntemleri grubundan olan RF, (ensemble methods) genellikle yorumlanması kolaydır ve değişkenler arasında doğrusal olmayan korelasyonları yakalama yeteneğine sahiptir [30]. Ancak eğitim verilerine aşırı uyum sağlama eğilimindedir [31].

2.2.2.5. LightGBM

Ağaç tabanlı öğrenme algoritmalarını kullanan bir gradyan artırma yöntemidir [32]. Microsoft tarafından geliştirilen bu algoritma, bellek tüketimini azaltmak ve eğitim sürecini hızlandırmak amacıyla histogram tabanlı bir yaklaşımı benimser [33]. Hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla, bu algoritma sürekli değere sahip olan değişkenleri kesikli hale getirir [34]. Ke ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada bu modelin diğer modellere göre 20 kat daha hızlı olduğu sonucuna varılmıştır [35].

2.2.2.6. CatBoost

Yandex mühendis ve araştırmacıları tarafından geliştirilen yeni bir gradyan artırma algoritması olan bu algoritma, açık kaynaklı olarak sunulmuştur. Bu algoritma, kategorik özellikleri düşük bilgi kaybıyla işleyebilme yeteneğine sahiptir [36]. CatBoost, eğitim için tüm veri setini kullanma olanağı tanıyan daha etkin bir strateji kullanır [37]. Ayrıca, CatBoost, geleneksel gradyan artırma algoritmalarının neden olduğu aşırı öğrenmeyi ele almak için ağaç yapısı ve yaprak değerlerini tahmin etmek için rastgele permütasyonlar gerçekleştirir [38]. CatBoost'un sunduğu bir diğer avantaj, varsayılan parametrelerle bile mükemmel sonuçlar elde edebilmesi nedeniyle parametre ayarlama süresini minimize etmesidir [39].

2.3. Performans Metrikleri

Tahmin yöntemlerinin performansını değerlendirmek için kullanılan metrikler genellikle tahmin hataları üzerinden ölçülür. Yüksek hata değerleri, genellikle düşük tahmin doğruluğuyla ilişkilidir. Bu bölümde, genellikle kullanılan bazı performans ölçümleri ele alınacaktır. Önemli bir not, "x" ile gösterilen değer $\tilde{x}$ gözlemlenen değeri, "y" ile gösterilen

değer tahmin edilen değeri ve "n" ise toplam örnek sayısını temsil eder [40].

2.3.1. RMSE (Kök Ortalama Kare Hata)

Kök Ortalama Kare Hata (RMSE - Root Mean Square Error), MSE değerinin karekökü ile elde edilir (Denklem 3.1). Bu ölçüt, makine öğrenimi modelinin tahminde bulunma mekanizmasının gerçek değerlerle arasındaki uzaklığı ölçen bir kuadratik ölçüdür. RMSE, yapılan tahminlerdeki hataların standart sapmasını açıklar, yani regresyon çizgisinin gerçek veri noktalarından uzaklaşma seviyesini gösterir. Bu ölçüm, kalıntıların (residuals) regresyon çizgisinden ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder. RMSE, matematiksel hesaplamalarda istenmeyen mutlak değerlerin kullanılmasını engeller [41]. RMSE, sıfıra yaklaştıkça, verilerle o kadar mükemmel bir uyum gösterdi denir. Ancak, pratikte asla tam olarak 0 değerini almaz. Genelde, RMSE değerinin düşük olması, yüksek olan bir değerden daha iyidir. RMSE'nin kullanımı, ölçüm olarak kullanılan sayıların ölçeğine bağlı olduğu için (biz günlük kWh cinsinden kullanacağız, bu bağlamda şekillenecek), farklı veri türleri arasında karşılaştırmaların genel geçerliliği olmayabilir. Yine de, model karşılaştırmalarında sıkça kullanılır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n) (\tilde{x}_i - x_i)^2} \quad (3.1)$$

2.3.2. NRMSE (Normalize Edilmiş Kök Ortalama Kare Hata)

Normalize edilmiş kök ortalama kare hata (*NRMSE* – *Normalized root mean square error*), RMSE değerinin normalize edilmiş versiyonudur [39]. **(Denklem 3.2).**

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n) (\tilde{x}_i - x_i)^2}}{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n) x_i} \quad (3.2)$$

2.3.3. MAE (Ortalama Mutlak Hata)

Ortalama Mutlak Hata (MAE - Mean Absolute Error), sürekli olan iki değişken arasındaki farkı ölçen bir değerlendirme ölçütüdür (Denklem 3.3). MAE, her bir gerçek değer ile veriye en uygun olan çizgi arasındaki ortalama dikey ve yatay mesafeyi ifade eder. Bu değer ne kadar düşükse, modelin başarısı o kadar yüksektir.

MAE, anlaşılması kolay bir sonuç sunar ve genellikle regresyon ve zaman serisi analizlerinde yaygın olarak kullanılır [41].

$$MAE = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n) |\tilde{x}_i - x_i| \quad (3.3)$$

2.3.4. MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata)

Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE – Mean absolute percentage error), denklem 3.4’de gösterilmiştir.

$$MAPE = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n) \left| \frac{\tilde{x}_i - x_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (3.4)$$

MAPE (Mean Absolute Percentage Error), regresyon ve zaman serileri modellerinde tahmin doğruluğunu değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir ölçüdür. $MAPE < \%10$ olduğunda yüksek doğruluk oranına, $\%10 < MAPE < \%20$ olduğunda doğru tahmin ve $\%50 < MAPE$ olduğunda yanlış hatalı model olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, gerçek değerler içinde sıfır (0) bulunuyorsa, MAPE hesaplanamaz çünkü sıfıra bölünme durumu söz konusu olup yanlış sonuçlar ortaya çıkar. Ayrıca, çok düşük tahmin değerleri için yüzde hata $\%100$ ’ü aşamaz. Ancak, tahmin değerleri çok yüksek olduğunda, yüzde hata için üst limit bulunmamaktadır. Bu durum, MAPE'nin özellikle tahminleri düşük olan bir modeli sistematik

olarak seçme eğiliminde olduğu ve bu nedenle önyargılı bir ölçü olduğu anlamına gelir. Bu durumu göz önünde bulundurarak MAPE'nin kullanılması, model karşılaştırmalarında dikkatli bir şekilde yapılmalıdır [41].

2.3.5. Belirleme Katsayısı (R2)

R2 metriği modelimizin yaptığı tahminlerinin ne kadar iyi olduğunun bir göstergesidir. En fazla 1 değerini alabilir, en düşük olarak eksi değerlere düşebilir. Çıkan değer 1'e ne kadar yakın olursa modelimizin veriler üzerindeki başarısı da bir o derece yüksek olur [41].

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda Antalya ilinin verileri ile eğitilen modellerin incelenmesi için metrik değerler ve tablo üzerinden karşılaştırma yapılacaktır. Antalya ili için üretilen elektrik miktarının tahmin edilmesi için 12 çeşit makine öğrenmesi algoritması ile test yapılmıştır. Tüm bu algoritmalar içerisinde en iyi sonuç CatBoost algoritması ile elde edilmiştir. Bu tahminde scikit-learn kitaplığı ve Google Colaboratory (Colab) notebookdan faydalanılmıştır.

3.1. Antalya İli Tahmin Sonuçları

Antalya ilinde yapılan saha analizleri sonucunda güneş enerjisi santrallerinde elde edilen veriler, 02.10.2020 tarihinden itibaren üretime başlamış Serra GES e ait elde edilen veriler eşleştirilmiş ve 3215 adet veri elde edilmiştir.



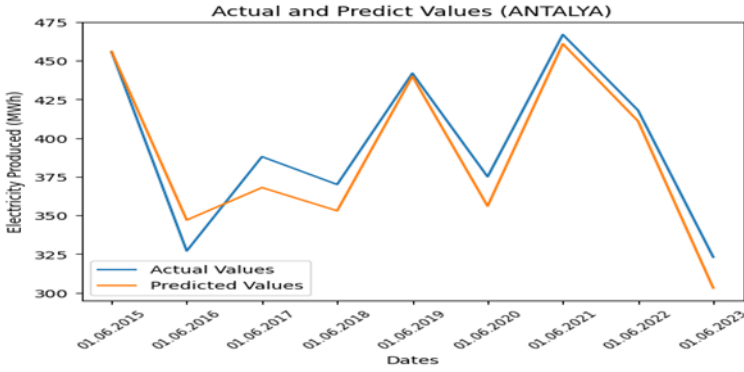
Şekil 1. Antalya Serra GES

Elde edilen verilerin işlenmesi sonucunda Antalya ili verilerinin makine öğrenmeye göre karşılaştırılması aşağıdaki tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Antalya iline ait CatBoost algoritması verileri

Metrikler	CatBoost	
	Train	Test
NRMSE	%9,76	%11,14
RMSE	9,73	10,04
MAE	4,07	4,19
MAPE	17,52	18,24
R^2	0,88	0,88

Şekil 2’de Antalya ili için sonuçlar incelendiğinde, MAPE değerinin test değeri %20’nin altında olması modelin tahminle ilgili yüksek bir doğruluk oranına sahip olduğunu gösterir. NRMSE, RMSE ve MAE değerlerinin düşük olması verilerle ilgili bir uyum içinde olduğunu gösterir. Bu durumda çoklu doğrusal regresyon grafiği incelendiğinde gerçek ve tahmin değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, analiz edilen yöntem Antalya ili için doğru sonuçlar vermiştir.



Şekil 2. Çoklu doğrusal regresyon grafiği

4. SONUÇ

Bu çalışmada güneş enerjisinden elektrik üretiminde iklim koşullarının üretim sürecine etkisine odaklanılmıştır. Güneş enerjisinde üretilen elektrik miktarı birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Çalışma, ilde kurulu olan GES'ler üzerinden yapıldığı için panel özellikleri, arazi şartları, panelin konumu, montaj açısı gibi parametreler ihmal edilmiştir. Bu yüzden sadece iklimsel veriler baz alınarak sahada elde edilen verilerle elektrik üretim miktarının tahminin yapılması için 12 adet makine öğrenmesi algoritması ile test edilmiştir. Bu algoritmalar 6 adet doğrusal olan ve 6 adet doğrusal olmayan algoritmalarlardır. Deneysel çalışmada Antalya ili 12 adet algoritma üzerinden test edilmiştir. Antalya ili için en doğru sonuçlar CatBoost algoritmasından elde edildiği görülmüştür. Antalya ili için modelimizin yüksek oranda doğruluğa sahip olduğu görülmektedir. güneş enerjisi santrali kurulumuna uygun olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda tüm iller içerisinde Mardin ilinin %99 tahmin değeri ile en doğru sonucu vermesinde Akdeniz ikliminin etkisi altında olması, güneşlenme süresi ve radyasyon

değerinin diğer bölgelere göre daha fazla olması ile güneş ışınlarının daha dik gelmesinin etkili olduğu görülmektedir.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekte güneş santrallerinin elektrik üretiminde verimliliğin düşüşünü azaltmak amacıyla, düzenli olarak genişletilip güncellenerek modellerin iyileştirilmesine olanak tanındığı takdirde, gelecekteki üretim değerlerini tahmin ederek güneş santrallerinin bakımını zamanında ve düşük maliyetle gerçekleştirmek için bir fırsat sunabilir. İlerleyen yıllarda, tahminleme altyapısı aylık periyodlara kadar indirgenerek, geçmiş yıllarda aynı aylarda karşılaşılan sorunların hızlı bir şekilde tespit edilmesinde kullanılabilir. Bu çalışma aynı zamanda, güneş enerji santrallerinden elde edilen elektrik verilerinin temel alındığı aylık üretimin, elektrik dağıtım şirketlerince hedeflenen aylık üretimle karşılaştırılması sonucu ortaya çıkabilecek hataları minimize etmek amacıyla aylık üretim tahminleriyle önlem alınmasına yönelik bir sistem sunabilir. Güneş enerji santrallerinin standart ömürlerinin genellikle 30 yıl civarında olduğu ve geçmişe dönük 5 yıllık verilerin en iyi çalışma için yeterli olduğu düşünüldüğünde, bu tür çalışmaların GES'ler için önemli bir rol oynadığı açıkça görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Uyar, M. M., Çıtlak, A. & Demirpolat, A. B. (2024). Investigation of performance and emission values of new type of fuels obtained by adding MgO nanoparticles to biodiesel fuels produced from waste sunflower and cotton oil. *Industrial Crops and Products*, 222, 119712.
- [2] Demirpolat, A. B., Uyar, M. M. & Arslanoğlu, H. (2025). Heat transfer with MgO nanofluid in laminar flow: experimental study and ANSYS modeling. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150(1), 813-820.
- [3] Uyar, M. M., Demirpolat, A. B., & Arslanoğlu, H. (2023). Investigation of performance and emission values of biodiesel fuels produced by adding ZnO nanoparticles as additives to waste sunflower and Köhnü grape seed oil. *Colloid and Polymer Science*, 301(6), 557-567.
- [4] Demirpolat, A. B., Uyar, M. M., & Arslanoğlu, H. (2022). Biodiesel fuels produced from poppy and canola oils, experimental investigation of the performance and emission values of the samples obtained by adding new types of nanoparticles. *Petroleum Chemistry*, 62(4), 433-443.
- [5] Uyar, M. M., & Esen, H. (2020). Mobil Güç Santrallerinde Biyoyakıt Kullanılmasının Deneysel Olarak İncelenmesi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 4(2), 73-81.
- [6] Mühürücü A. ve Toylan H. (2018). Fotovoltaik Sistemlerde PSO ile Optimize Edilmiş Mirac Algoritması Kullanarak Maksimum Güç Noktası Takibi, *IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu*, 18-20 Nisan 2018, Trakya Üniversitesi, Edirne.

- [7] Donat, W., 2015, What is Python: An Intro to a Cross-Platform Programming Language, <https://www.atlantic.net/vps-hosting/what-is-python-intro-rossplatform-programming-language/>: [16.05.2020].
- [8] Ding, J., Tarokh, V. & Yang, Y. (2018). Model selection techniques: An overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(6),16-34.
- [9] Brownlee J., 2019, <https://machinelearningmastery.com/a-gentle-introduction-to-model-selection-for-machine-learning/>
- [10] Ouyang, F. S., Guo, B. L., Ouyang, L. Z., Liu, Z. W., Lin, S. J., Meng, W., ... & Yang, S. M. (2019). Comparison between linear and nonlinear machine-learning algorithms for the classification of thyroid nodules. *European Journal of Radiology*, 113, 251-257.
- [11] Eberly, L. E. (2007). Multiple linear regression. *Topics in Biostatistics*, 165-187.
- [12] Kurnaz, F. S., 2020. Temel Bileşenlere Dayalı Bazı Regresyon Yöntemleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 581-591.
- [13] Wold, H. (1966). Estimation of principal components and related models by iterative least squares. In P.R. Krishnaiah (Ed.). *Multivariate Analysis*. (pp.391-420) New York: Academic Press.
- [14] Garthwaite, P. H. (1994). An interpretation of partial least squares. *Journal of the American Statistical Association*, 89(425), 122-127.
- [15] El-Dereny, M., N. Rashwan, Solving multicollinearity problem using ridge regression models, *Int. J. Contemp. Math. Sci.* 6 (2011) 585–600.

- [16] Fitrianto, A., L.C. Yik, Performance of Ridge Regression Estimator Methods on small sample size by varying correlation coefficients: a simulation study, *J. Math. Stat.* 10 (2014) 25, <https://doi.org/10.3844/jmssp.2014.25.29>.
- [17] Fidanoğlu, I. & Akdeniz, F. İstatistiksel Daraltıcı (Shrinkage) Model ve Uygulamaları.
- [18] Tibshirani, R. J. (1996). Regression shrinkage and selection via the LASSO. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 58, 267-288.
- [19] Hans, C. (2011). Elastic net regression modeling with the orthant normal prior. *Journal of the American Statistical Association*, 106(496), 1383-1393.
- [20] Zou, H., & Hastie, T. (2003). Regression shrinkage and selection via the elastic net, with applications to microarrays. *JR Stat Soc Ser B*, 67, 301-20.
- [21] Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). Applied predictive modeling (Vol. 26, p. 13). New York: Springer.
- [22] Altman NS. An introduction to Kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *Am Stat* 1992; 46: 175–185.
- [23] Seçkin, M., Seçkin, A. Ç., & Coşkun, A. (2019). Production fault simulation and forecasting from time series data with machine learning in glove textile industry. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019883462.
- [24] Hornik, K. (1991). Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural networks*, 4(2), 251-257.

- [25] Bento, C. (2021). <https://towardsdatascience.com/multilayer-perceptron-explained-with-a-real-life-example-and-python-code-sentiment-analysis-cb408ee93141>.
- [26] Quinlan JR. Induction of decision trees. Mach Learn 1986; 1: 81–106.
- [27] Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (2017). Classification and regression trees. Routledge.
- [28] Quinlan JR. Simplifying decision trees. Int J Man Mach Stud 1987; 27: 221–234.
- [29] Lingitz, L., Gallina, V., Ansari, F., Gyulai, D., Pfeiffer, A., Sihn, W. & Monostori, L. (2018). Lead time prediction using machine learning algorithms: A case study by a semiconductor manufacturer. Procedia Cirp, 72, 1051-1056.
- [30] James, G., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning, volume 112. Springer
- [31] Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [32] LightGBM documentation, (2022). <https://lightgbm.readthedocs.io/en/v3.3.2/>
- [33] Machado, M. R., Karray, S., & de Sousa, I. T. (2019, August). LightGBM: An effective decision tree gradient boosting method to predict customer loyalty in the finance industry. In 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE) (pp. 1111-1116). IEEE.
- [34] Muratlar, E.R., 2020, <https://www.veribilimiokulu.com/lightgbm/>

TRANSESTERİFİKASYON YÖNTEMİ İLE BİYODİZEL ÜRETİMİNDE, REAKSİYON SICAKLIĞININ, ÜRETİM VERİMİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Mahmut UYAR¹

Muhammed Mustafa UYAR²

1. GİRİŞ

Fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin dünyada ciddi biçimde azalmakta olması ve bu yakıtların kullanımının yol açtığı sera gazı emisyonları ile çevre kirliliği gibi olumsuz etkiler, enerji sektöründe sürdürülebilir yakıtlara yönelimi hızlandırmıştır [1]. Ulaşım sektöründe elektrikli araçlar yaygınlaşırken, ağır tonajlı araçlar, tarım makineleri ve iş makineleri gibi yüksek güç gerektiren sistemlerde dizel yakıtın yerini tamamen alabilecek pratik alternatiflerin geliştirilmesi halen büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda biyodizel, bitkisel ya da hayvansal kaynaklı yağların, kısa zincirli alkoller ile transesterifikasyon reaksiyonuna tabi tutulmasıyla elde edilen yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir bir yakıt alternatifi olarak ön plana çıkmaktadır [2]. Biyodizel, geleneksel dizel yakıtlara göre daha düşük karbon ayak izi, toksik bileşiklerde azalma ve biodegradasyon özellikleriyle çevresel sürdürülebilirlik

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, mahmutuyar@siirt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4981-393X.

² Dr. Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, muhammed.uyar@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9897-6279.

açısından avantaj sunmaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonunun verimliliği; alkol-yag mol oranı, katalizör türü ve konsantrasyonu, reaksiyon süresi ve özellikle reaksiyon sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır [3]. Literatürde yer alan çalışmalar, sıcaklığın verim üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Örneğin, atık yemek yağı kullanılarak CaO-MgO heterojen katalizör ile yapılan bir çalışmada, 60 °C’de ~ %85,5 verim elde edilmiş; daha yüksek sıcaklıklarda verim düşüş eğilimi göstermiştir [4]. Benzer şekilde, tavuk yağı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, ~56 °C sıcaklık ve yaklaşık 108 dakika reaksiyon süresi ile verim ~%94,5 olarak kaydedilmiştir [5]. Ayrıca palm yağı kullanılarak gerçekleştirilmiş kinetik çalışmalar, 65 °C ve 5 saatlik reaksiyon süresi ile yaklaşık %97 dönüşüm oranına ulaşmıştır [6]. Optimum sıcaklık aralığı genellikle 55-65 °C olarak görülmekte, bu aralığın altındaki sıcaklıklarda reaksiyon kinetiği sınırlayıcı olurken, yüksek sıcaklıklarda alkolün buharlaşması ya da ters reaksiyonun devreye girmesi gibi faktörler verimi olumsuz etkileyebilmektedir. Dolayısıyla çalışmamızda, atık ayçiçek yağı kullanarak yapılan transesterifikasyon reaksiyonlarında sıcaklığın verim üzerindeki etkileri bu literatür ışığında deneysel olarak ele alınacaktır; özellikle reaksiyon sıcaklığının optimize edilmesi ile hem verim hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından anlamlı sonuçların elde edilmesi hedeflenmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMANIN ÖN HAZIRLIK İŞLEMLERİ

Bu çalışmada biyodizel üretiminde kullanılmak üzere hammadde olarak atık bitkisel yağ tercih edilmiştir. Söz konusu atık yağ, Elâzığ ilinde balık kızartma sektöründe faaliyet gösteren ticari bir işletmeden temin edilmiştir. Bu tür endüstriyel atık yağların kullanımı, hem ekonomik açıdan düşük maliyetli bir kaynak sağlamakta hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir

yaklaşım sunmaktadır. Atık yağların değerlendirilmesi, çevreye zarar veren kontrolsüz dökümlerin ve bertaraf maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Temin edilen atık bitkisel yağ, biyodizel üretim sürecine geçilmeden önce birtakım ön işlem basamaklarına tabi tutulmuştur. Bu ön hazırlık işlemleri, yağın içeriğinde bulunabilecek su, gıda parçacıkları ve diğer yabancı maddelerin uzaklaştırılması ile başlamış, daha sonra yağın nem içeriği düşürülerek sabunlaşma reaksiyonlarının önlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, atık yağ süzülerek fiziksel tortulardan ve katı kirleticilerden arındırılmış; ardından 105 °C sıcaklıkta yaklaşık 60 dakika süreyle ısıtılarak nemden arındırılmıştır. Bu işlem sırasında yağın sürekli karıştırılması sağlanmış ve böylece homojen bir yapıya ulaşması hedeflenmiştir. Yapılan bu ön hazırlık işlemleri, transesterifikasyon reaksiyonunun verimli ve kontrollü bir şekilde gerçekleşebilmesi için kritik öneme sahiptir. Özellikle su ve serbest yağ asidi içeriği yüksek olan atık yağlarda, sabunlaşma reaksiyonu gibi istenmeyen yan reaksiyonların oluşma riski artmaktadır [7]. Bu nedenle, atık yağın kullanıma uygun hâle getirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu hazırlık süreci, deneysel çalışmanın temel altyapısını oluşturmuştur.

2.1. Katı Filtrasyon

Deneysel çalışmada kullanılan atık kızartma yağının içerisindeki katı partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla katı filtrasyon işlemi uygulanmıştır. Atık yağ, Elâzığ ilindeki balık kızartma sektöründen ücretsiz olarak temin edilmiş olup, bu tür endüstriyel atık yağlarda genellikle gıda artıkları, yanma kalıntıları ve diğer mekanik kirleticiler bulunabilmektedir. Bu katı maddelerin biyodizel üretim sürecinde reaksiyona olumsuz etkide bulunmaması ve ürün saflığının artırılması için filtreleme işlemi kritik bir ön hazırlık adımıdır. Katı filtrasyon işlemi kapsamında, öncelikle atık yağ, büyük partiküllerin ayrıştırılabilmesi için çok ince gözenekli filtre kağıtları veya

uygun filtre malzemeleri kullanılarak süzölmüştür. Bu yöntem sayesinde, yağ içerisindeki partiküller mekanik olarak tutulmuş ve uzaklaştırılmıştır. Filtrasyonun etkinliği, filtrasyon malzemesinin gözenek boyutu ve süzme hızına bağlı olarak optimize edilmiştir. Katı filtrasyon işlemi sonucunda, yağın içerisindeki büyük ve orta büyüklükteki katı kirleticilerin büyük bir kısmı uzaklaştırılmış, böylece sonraki kimyasal reaksiyonların daha verimli ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesine zemin hazırlanmıştır. Bu uygulama, özellikle transesterifikasyon sırasında katalizör etkinliğini artırmak ve oluşabilecek istenmeyen yan reaksiyonların önüne geçmek açısından önem taşımaktadır.

2.2. Yağdaki Nemin Uzaklaştırılması

Atık bitkisel yağların biyodizel üretiminde kullanımı öncesinde, içerdiği suyun büyük oranda giderilmesi gerekmektedir. Çünkü yağdaki yüksek nem oranı, transesterifikasyon reaksiyonu sırasında sabunlaşma gibi istenmeyen yan reaksiyonlara sebep olarak reaksiyon verimini düşürebilmektedir [8]. Bu nedenle, temin edilen atık yağın içerisindeki suyun etkin bir şekilde uzaklaştırılması, deneysel çalışmanın önemli ön hazırlık aşamalarından biridir. Çalışmada, yağdaki nemin giderilmesi için buharlaştırma (evaporasyon) yöntemi tercih edilmiştir. Bu amaçla, Şekil 1’de gösterilen evaporasyon cihazı kullanılmıştır. Evaporasyon işlemi, kimyasal yapıya zarar vermeden yağ içerisindeki suyun buharlaştırılması prensibine dayanmaktadır. İşlem, yağın kimyasal yapısını koruyacak şekilde, kontrollü basınç altında ve 72 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık değeri, yağın termal stabilitesini korurken, sudan daha düşük olan buharlaşma sıcaklığının etkin kullanımına olanak sağlamıştır. Basınç altında yapılan evaporasyon, suyun daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmasını sağlayarak yağın oksidasyon ve bozulma riskini minimize etmiştir. İşlem süresince yağın homojenliği sağlanmış ve

böylece nemin tamamına yakın kısmının uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Bu sayede, transesterifikasyon reaksiyonunun performansını artıracak, katalizörün etkinliğini destekleyecek ve üretim verimliliğini maksimize edecek bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Yağın içeriğindeki suyun buharlaştırılması

2.3. Serbest Yağ Asidi (SYA) Tespiti

Biyodizel üretiminde kullanılacak yağların kimyasal bileşimi, özellikle serbest yağ asitleri (SYA) içeriği, reaksiyon verimi ve ürün kalitesi açısından kritik bir parametredir. SYA oranı yüksek olan yağlarda, transesterifikasyon sürecinde sabunlaşma reaksiyonları meydana gelerek katalizörün etkinliği azalmakta ve üretim verimi olumsuz etkilenmektedir [9]. Özellikle uzun süre açıkta kalan veya yüksek sıcaklıkta kızartma işlemi görmüş atık yağlarda SYA miktarının artması yaygın bir durumdur. Bu çalışmada, atık yağın SYA içeriğinin belirlenmesi için klasik asit-baz titrasyon yöntemi uygulanmıştır. Titrasyon işlemi için fenolftalein göstergesi ve standart sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Deneysel prosedürde, yağ numunesine 1/3 oranında fenolftalein içeren NaOH-alkol çözeltisi kademeli olarak eklenmiş, yağ numunesi pembemsi bir

renk değişimi gösterene kadar titrasyon devam etmiştir. Bu renk değişimi, yağdaki serbest yağ asitlerinin tamamının nötralize edildiğinin göstergesi olarak kabul edilmiştir. SYA tespitindeki titrasyon işlemi şekil 2’de görülmektedir. Titrasyon sırasında kullanılan NaOH çözeltisi hacmine dayanarak, atık yağın serbest yağ asidi miktarı %11,58 olarak hesaplanmıştır. Atık ayçiçeğine ait oran Tablo 1’de görülmektedir. Bu yüksek SYA oranı, atık yağın transesterifikasyon öncesinde ön işlem ve uygun nötralizasyon adımlarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu değer biyodizel üretiminde reaksiyon koşullarının optimize edilmesi ve katalizör miktarının ayarlanması açısından önemli bir referans teşkil etmektedir.

Tablo 1. Atık Ayçiçek yağı SYA oranı

<i>Yağ Numunesi</i>	<i>SYA Oranı</i>
Atık Ayçiçek yağı	11,58



Şekil 2. SYA tespitindeki titrasyon işlemi

2.4. Nötralleştirme İşlemi

Atık yağın kimyasal analizleri sonucunda belirlenen %11,58 oranındaki yüksek serbest yağ asidi (SYA) içeriği, biyodizel üretim sürecinde verim kayıplarına ve sabunlaşma reaksiyonlarına yol açabileceğinden, reaksiyondan önce yağın asidik bileşenlerinin giderilmesi gerekmektedir [10]. Bu amaçla, yağda bulunan serbest yağ asitlerinin uzaklaştırılması için asidik

ön işlem (nötralleştirme) yöntemi uygulanmıştır. Nötralleştirme işleminde, katalizör olarak güçlü bir mineral asidi olan sülfürik asit (H_2SO_4) tercih edilmiştir. Sülfürik asit, yağdaki serbest yağ asitleriyle reaksiyona girerek yağın asidik bileşenlerini nötralize etmekte ve bu sayede sabunlaşma potansiyelini azaltmaktadır. İşlem, belirli oranlarda sülfürik asidin atık yağa kontrollü bir şekilde ilave edilmesiyle başlamış ve karıştırma altında reaksiyonun tamamlanması sağlanmıştır. Nötralleştirme sürecine ait görsel Şekil 3'te görülmektedir. Bu cihazda işlem, belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında gerçekleştirilerek, asidik bileşenlerin etkin bir şekilde giderilmesi sağlanmıştır. İşlem sonrasında yağın serbest yağ asidi oranında belirgin bir azalma gözlemlenmiş ve biyodizel üretimine uygunluğu artırılmıştır. Bu asidik ön işlem, özellikle yüksek SYA içeren atık yağların biyodizel dönüşümünde katalizör etkinliğinin korunması, ürün saflığının yükseltilmesi ve proses veriminin optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 3. Asidik ön işlem (nötralleştirme)

Yukarıda detaylı olarak açıklanan ön hazırlık işlemleri başarıyla tamamlanmış ve atık bitkisel yağ, kimyasal ve fiziksel açıdan biyodizel üretiminde kullanılmak üzere uygun hale getirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen katı filtrasyon, nem giderme ve nötralleştirme adımları, yağın içerisindeki istenmeyen katı partiküller, su ve yüksek orandaki serbest yağ asitlerinin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Böylece, atık yağ, transesterifikasyon reaksiyonunun yüksek verim ve etkinlikle gerçekleşebilmesi için gerekli koşullara uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu altyapı, deneysel sürecin sonraki aşamalarında biyodizel üretiminin optimizasyonuna temel teşkil etmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

Ön hazırlık işlemleri tamamlanarak reaksiyona uygun hale getirilen atık ayçiçek yağı, biyodizel üretiminde yaygın olarak kullanılan alkol türü olan metanol ve katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Bu reaksiyon, yağın trigliserid yapısındaki ester bağlarının metanol ile reaksiyona girerek metil ester (biyodizel) ve gliserol üretmesini sağlamaktadır. Deneysel çalışma kapsamında, transesterifikasyon reaksiyonu farklı sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiş ve reaksiyon sıcaklığının biyodizel verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Reaksiyonlar, 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklık seviyelerinde yürütülmüştür. Her deney, belirlenen sıcaklık değerinde sabit tutulmuş ve reaksiyon süresi ile diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Reaksiyon düzeni, laboratuvar ortamında kurulmuş ısı kontrollü cam reaktör sistemi içerisinde gerçekleştirilmiş olup, homojen karışım sağlamak amacıyla manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Reaksiyon süresince sıcaklık, termometre ve sıcaklık probu yardımıyla sürekli izlenmiştir. Bu deneysel düzenek, farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen reaksiyonlara ait

görselleri içeren Şekil 4'te detaylı olarak sunulmaktadır. Ön hazırlık işlemlerinden sonra, transesterifikasyon reaksiyonuna hazır hale getirilen atık ayçiçek yağı, metanol ve NaOH eşliğinde kullanılarak transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonuna ait görsel şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Farklı sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu

Transesterifikasyon reaksiyonları, deneysel çalışmada belirlenen farklı sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sistemi, 100 gram atık ayçiçek yağı kullanılarak hazırlanmıştır. Metanol ve yağ arasındaki molar oran 6:1 olarak belirlenmiş ve katalizör olarak yağ miktarının %1'i oranında (w/w) sodyum hidroksit (NaOH) ilave edilmiştir. Bu parametreler, literatürde biyodizel üretiminde yaygın olarak tercih edilen ve yüksek verim elde edilen değerler arasında yer almaktadır. Reaksiyonlar, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarında ayrı ayrı yürütülmüş olup, her bir sıcaklıkta işlem süresi 60 dakika olarak sabit tutulmuştur. Reaksiyon süresi boyunca karışım, manyetik karıştırıcı ile homojen şekilde

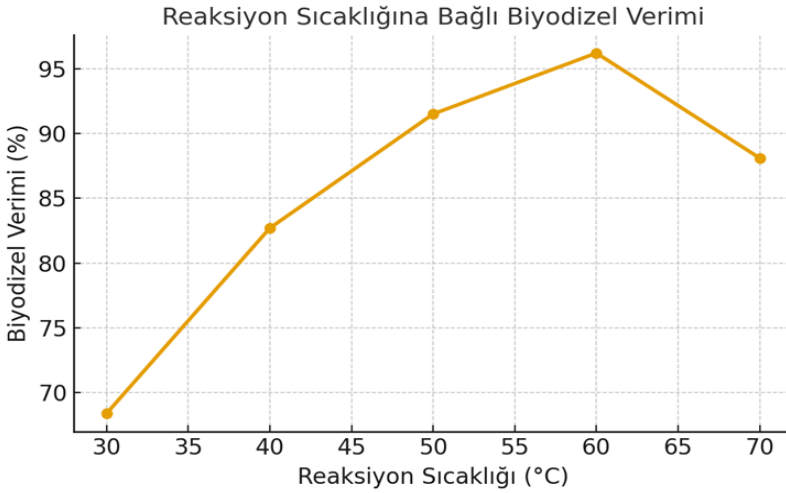
kariştirilerek reaksiyonun tam ve verimli gerçekleşmesi sağlanmıştır. Belirlenen sıcaklıklar, transesterifikasyon reaksiyonunda metil ester oluşum hızını ve verimini etkileyen kritik parametreler arasında yer almakta olup, deneysel olarak verim optimumunun tespiti amaçlanmıştır. Reaksiyonun tamamlanmasının ardından, elde edilen karişım 24 saat boyunca dinlendirilmiştir. Bu süreçte, yoğunluk farklarına bağlı olarak biyodizel (metil ester) ve gliserol olmak üzere iki faz kendiliğinden ayrılmıştır. Faz ayrımı tamamlandıktan sonra, üstteki biyodizel fazı dikkatlice alınarak saflaştırma ve analiz işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu ayrım işlemi, reaksiyon sonrası ürünün saflaştırılması ve verim hesabının yapılabilmesi açısından önemli bir aşamadır.

4. BULGULAR ve TARTIşMA

Bu çalışmada, metanol miktarı, NaOH katalizör oranı ve dış ortam koşulları sabit tutulurken, yalnızca transesterifikasyon reaksiyon sıcaklığının biyodizel üretim verimine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler, farklı sıcaklık koşullarında biyodizel verimindeki değişimleri ortaya koymak amaçıyla analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 2’de sayısal olarak, şekil 5’te ise grafiksel olarak sunulmuştur. Bu yaklaşım, reaksiyon sıcaklığının biyodizel üretim verimi üzerindeki doğrudan etkisini izole etmek ve optimize etmek için tasarlanmıştır. Sıcaklık parametresi, transesterifikasyon reaksiyon kinetiği, katalizör aktivitesi ve ürün safiyeti üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, elde edilen sonuçların literatürde bildirilen çalışmalarla karişılaştırılması, deneysel bulguların geçerliliğini ve pratik uygulamadaki önemini ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Reaksiyon sıcaklığındaki değişimin biyodizel üretim verimine etkisi

Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Biyodizel Verimi (%)
30	68.4
40	82.7
50	91.5
60	96.2
70	88.1



Şekil 5. Reaksiyon sıcaklığındaki değişimin biyodizel üretim verimine etkisi

Transesterifikasyon reaksiyonunda sıcaklık değişiminin biyodizel verimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2’de özetlenmiştir. Çalışmada, reaksiyon sıcaklığı 30°C’den 70°C’ye kadar kademeli olarak artırılmış ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Elde edilen veriler, reaksiyon sıcaklığının biyodizel üretim verimini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Tablo 2’ye göre, 30°C’de gerçekleştirilen reaksiyonlarda verim %68,4 olarak ölçülmüştür.

Sıcaklığın 40°C'ye yükseltilmesi ile verimde belirgin bir artış görülmüş ve %82,7'ye ulaşılmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 50°C'de %91,5 verimle daha da artarken, en yüksek verim %96,2 ile 60°C'de elde edilmiştir. Ancak sıcaklık 70°C'ye çıkarıldığında verimde hafif bir düşüş gözlemlenmiş ve verim %88,1'e gerilemiştir. Bu sonuçlar, transesterifikasyon reaksiyonunun sıcaklıkla olumlu şekilde hızlandığını ve 60°C'nin optimum sıcaklık olduğunu göstermektedir. Optimum sıcaklığın üzerinde (70°C) verimin azalması, yüksek sıcaklıkların metanolün buharlaşmasına ve dolayısıyla reaksiyonda alkol miktarının azalmasına bağlı olarak reaksiyon veriminde düşüşe neden olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca, aşırı sıcaklıklar katalizör etkinliğini de olumsuz etkileyebilir. Literatürde bildirilen çalışmalarla uyumlu olarak, transesterifikasyon reaksiyonunun optimal sıcaklığının genellikle 55-65°C aralığında olduğu belirtilmektedir [11]. Bu çalışmada elde edilen optimum sıcaklık ve verim değerleri, atık ayçiçek yağından biyodizel üretiminde benzer sonuçlar göstermektedir. Sonuç olarak, reaksiyon sıcaklığının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi biyodizel veriminin artırılması ve prosesin ekonomik olarak optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Reaksiyon sıcaklığının artmasıyla birlikte moleküler hareketlilik ve dolayısıyla moleküller arası çarpışmaların sıklığı artmış, bu durum reaksiyon kinetiğini hızlandırmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonu, ester bağlarının alkol ile etkileşimi sonucu gerçekleşen bir süreç olduğundan, sıcaklık artışı reaksiyon hızını pozitif yönde etkilemiş ve biyodizel veriminde gözle görülür bir artışa yol açmıştır. Özellikle 60°C'ye kadar olan sıcaklık artışları, bu kinetik avantajı maksimum düzeyde kullanmaya olanak sağlamıştır. Ancak, reaksiyon sıcaklığının 60°C'nin üzerine çıkarılmasıyla birlikte metanolün kaynama noktasına yaklaşması sebebiyle alkol kaybı meydana gelmiştir. Metanolün buharlaşması, reaksiyon ortamındaki alkol konsantrasyonunun azalmasına yol açarak, transesterifikasyon reaksiyonunun

devamlılığını ve etkinliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Alkol kaybı, yeterli miktarda metanolün reaksiyona katılamamasına neden olarak reaksiyonun tam verimle gerçekleşmesini engellemiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda alkol buharlaşmasının yol açtığı düzensiz reaksiyon koşulları, sabunlaşma reaksiyonlarının artmasına ve dolayısıyla ürün saflığının azalmasına sebep olmuştur. Sabunlaşma, özellikle yüksek serbest yağ asidi içeren atık yağların işlenmesinde katalizörle etkileşerek yan ürün oluşumuna ve ayrışmaya neden olan olumsuz bir süreçtir [12]. Bu durum, biyodizel fazındaki saflığın düşmesine ve toplam verimin azalmasına yol açmıştır. Bu nedenlerle, transesterifikasyon reaksiyonunda optimum sıcaklık aralığının korunması, hem metanol kaybının önlenmesi hem de sabunlaşma gibi yan reaksiyonların minimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde de benzer şekilde, metanolün kaynama noktası civarında aşırı sıcaklıkların reaksiyon verimini olumsuz etkilediği belirtilmektedir [13]. Bu bağlamda, deneysel sonuçlarımız optimum sıcaklık olarak 60°C'yi işaret etmekte ve bu sıcaklığın aşılmaması gerektiğini göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, atık ayçiçek yağından metanol ve sodyum hidroksit (NaOH) katalizörü kullanılarak biyodizel üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, transesterifikasyon reaksiyon sıcaklığının biyodizel üretim verimi üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Reaksiyon sıcaklığı 30°C'den 70°C'ye kadar çeşitli seviyelerde değiştirilmiş ve diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, reaksiyon sıcaklığının 60°C'ye kadar arttırılmasının biyodizel verimini anlamlı biçimde artırdığını ortaya koymuştur. Ancak, 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda metanolün buharlaşması ve sabunlaşma reaksiyonlarının

tetiklenmesi nedeniyle verimde belirgin bir azalma gözlenmiştir. En yüksek verim %96,2 ile 60°C’de elde edilmiş olup, bu sıcaklık optimum reaksiyon koşulu olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, atık yağ bazlı biyodizel üretiminde reaksiyon sıcaklığının kritik bir parametre olduğunu göstermekte ve proses optimizasyonunda sıcaklık kontrolünün önemini vurgulamaktadır. Gelecek çalışmalarda, reaksiyon süresi, katalizör türü ve alkol oranı gibi diğer parametrelerin etkilerinin de detaylı şekilde araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ölmez, M. & Bayrak, B. (2025). International Migration Governance and Smart Urbanization: An Analysis in the Context of Game Theory (Nash Equilibrium). *Kent Akademisi*, 18(5), 3114-3130.
- [2] Uyar, M. M., Demirpolat, A. B. & Arslanoğlu, H. (2023). Investigation of performance and emission values of biodiesel fuels produced by adding ZnO nanoparticles as additives to waste sunflower and Köhnü grape seed oil. *Colloid and Polymer Science*, 301(6), 557-567.
- [3] Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L. & Pérez, A. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.039>.
- [4] Attallah, M. Z., Agustina, Y., Bow, Y. & Yunanto, I. (2024). Temperature Effect on the Transesterification Process of Used Cooking Oil with a CaO-MgO Catalyst in the Biodiesel Production. *Journal of Industrial, Energy and Environment Technology*, 2(2), 57-61.
- [5] Miñano, H. A., Jara, R. S., Pagador, S. & Cáceres, H. (2010). Effect of transesterification temperature and time on yield and calorific value of biodiesel from refined fat of chicken. *Scientia Agropecuaria*, 1(1), 37-45.
- [6] Puspa Asri, N., Budikarjono, K. & Roesyadi, A. (2015). Kinetics of Palm Oil Transesterification Using Double Promoted Catalyst CaO/KI/ γ -Al₂O₃. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 47(4).

- [7] Maddela, F. S. A., Inoval, L. R. P., Nicolas, K. F. L., Rosales, R. M., Villareal, H. H., Ocson, K. C. M., ... & Mabajen, P. N. J. E. (2025). Physicochemical Properties of Squash (*Cucurbita maxima* L.) Seeds for Biodiesel Production.
- [8] Uyar, M. M., Çıtlak, A. & Demirpolat, A. B. (2024). Investigation of performance and emission values of new type of fuels obtained by adding MgO nanoparticles to biodiesel fuels produced from waste sunflower and cotton oil. *Industrial Crops and Products*, 222, 119712.
- [9] Maafa, I. M. (2022). Biodiesel synthesis from high free-fatty-acid chicken fat using a scrap-tire derived solid acid catalyst and KOH. *Polymers*, 14(3), 643.
- [10] Ahmed, R. & Huddersman, K. (2022). Review of biodiesel production by the esterification of wastewater containing fats oils and grease (FOGs). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 110, 1-14.
- [11] Demirpolat, A. B., Uyar, M. M. & Arslanoğlu, H. (2022). Biodiesel fuels produced from poppy and canola oils, experimental investigation of the performance and emission values of the samples obtained by adding new types of nanoparticles. *Petroleum Chemistry*, 62(4), 433-443.
- [12] Chanakaewsomboon, I. (2021). Methanolysis process catalyzed by homogeneous alkaline catalyst: effect of free fatty acid content on saponification reaction. *ADBU Journal of Engineering Technology*, 10(3).
- [13] Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel processing technology*, 86(10), 1059-1070.

BİYODİZEL ÜRETİM PROJESİNDE İHTİYAÇ DUYULAN ISI ENERJİSİNİN, GÜNEŞ ENERJİLİ SU ISITMA SİSTEMLERİNDEN KARŞILANMASI

Muhammed Mustafa UYAR¹

Mahmut UYAR²

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlara olan bağımlılık, sera gazı emisyonlarının artışı ve çevresel kirlilik gibi küresel ölçekli sorunlar, enerji politikalarında sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklara geçişi zorunlu kılmaktadır [1]. Bu bağlamda biyoyakıtlar, özellikle biyodizel, hem karbon nötr özelliği hem de bitkisel ya da hayvansal yağların dönüştürülerek kullanılması sayesinde çevresel etkileri azaltma potansiyeli taşımaktadır. Biyodizelin transesterifikasyon yöntemi ile bitkisel veya hayvansal yağlardan metanol eşliğinde elde edilmesi; düşük toksisite, biyolojik çözünürlük ve mevcut dizel motorlarla uyumlu kullanım gibi avantajlar sunmaktadır [2]. Ancak biyodizel üretim prosesinde, reaksiyonun belirli sıcaklıklarda yürütülmesi ve yağın ön işlemler sırasında ısıtılması gerekliliği, enerji tüketimini ve üretim maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle endüstriyel ölçekli biyodizel üretim tesislerinde elektrik veya fosil yakıt destekli ısıtma sistemleri büyük enerji

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Arapgir Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, muhammed.uyar@ozal.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9897-6279.

² Dr. Öğr. Üyesi, Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, mahmutuyar@siirt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4981-393X.

giderlerine sebep olmaktadır [3]. Bu durum, biyodizelin toplam çevresel ve ekonomik avantajını düşürebilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, biyodizel üretim proseslerinde ısı enerjisi gereksinimini karşılamak üzere entegrasyonu, hem süreç verimliliğini artırma hem de karbon ayak izini düşürme açısından büyük bir fırsat sunmaktadır [4]. Güneş enerjili su ısıtma sistemleri bu çerçevede yaygın olarak incelenen bir alternatiftir. Gani ve ark. 45-60 °C sıcaklık aralığında transesterifikasyon reaksiyonu için gerekli ısı enerjisinin güneş enerjili su ısıtma sistemlerinden sağlanabileceği göstermişlerdir [5]. Ayrıca Sampao ve ark. güneş termal destekli sistemlerle kullanılmış kızartma yağı içerisindeki nemin uzaklaştırılması ve ısıtma gereksiniminin düşürülmesi anlatılmıştır [6].

Bu çalışmanın amacı, Elâzığ ilinde biyodizel üretim prosesi sırasında ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin güneş enerjili su ısıtma sistemleri ile karşılanabilirliğini değerlendirmektir. Bu değerlendirme sırasında, enerji verimliliği, maliyet analizleri ve çevresel kazanımlar da hesaplanacaktır. Özellikle güneş ışınımı potansiyeli, soğuk mevsim koşulları ve kolektör verimliliği gibi yerel koşulların prosese etkisi incelenecektir. Bu sayede, biyodizel üretim tesislerinde fosil kaynaklı enerji kullanımının azaltılması ve üretim sürecinin daha sürdürülebilir hâle getirilmesi hedeflenmektedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılık, küresel ısınma ve çevresel kirlilik gibi önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının endüstriyel proseslerde kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen çevre dostu bir yakıttır. Ancak üretim sürecinde yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle enerji tüketimi oldukça yüksektir. Özellikle endüstriye bazda yapılan biyodizel üretimlerinde elektrik maliyeti oldukça büyük bir gider kalemi olarak

karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, Elâzığ ilinde güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin biyodizel üretiminde kullanılabilirliği araştırılmış, enerji verimliliği, maliyet ve çevresel kazanımlar hesaplanmıştır.

2. BİYODİZEL ÜRETİMİ İÇİN GEREKLİ ISI ENERJİSİNİN HESAPLANMASI

Biyodizel üretim süreci, genellikle üç temel aşamadan oluşmaktadır; transesterifikasyon reaksiyonu, yıkama ve saflaştırma olarak sıralanmaktadır. Bu işlemlerin her biri belirli sıcaklık koşulları altında gerçekleştirilmekte olup, özellikle transesterifikasyon reaksiyonunun verimli bir şekilde sürdürülebilmesi için hedef sıcaklık çoğunlukla 60 °C olarak belirlenmektedir. Yağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bu sıcaklıkta reaksiyona elverişli hale gelmesi, prosesin enerji ihtiyacını artıran temel faktörlerden biridir [7]. Bu çalışmada, deneysel uygulamalar fabrikasyon düzeydeki bir üretim süreci göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Süreçte kullanılan bitkisel atık yağın başlangıç sıcaklığı ortam koşullarında 24 °C olarak ölçülmüş, transesterifikasyon reaksiyonu öncesinde bu sıcaklığın 60 °C'ye çıkarılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, belirli bir miktarda yağ için ihtiyaç duyulan ısı enerjisi aşağıdaki termodinamik denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$Q = m \times c \times \Delta T = 90 \times 2 \times (60 - 25) = 6300 \text{ kJ}$$

Q: Gerekli ısı enerjisi (kJ)

m: Yağın kütlesi (kg)

c: Yağın özgül ısısı (kJ/kg.K)

ΔT : Sıcaklık farkı (K)

100 litre yağın yaklaşık 90 kg kütleyle sahip olduğu ve ayçiçek yağı için özgül ısı kapasitesinin ortalama 2.0 kJ/kg.K olduğu varsayımıyla, sıcaklık farkı 36 °C (60-24) alınarak hesaplama yapılmıştır

Bu durumda, 100 litre bitkisel atık yağın reaksiyon sıcaklığına getirilmesi için ihtiyaç duyulan toplam enerji 6300 kJ olarak hesaplanmıştır. Bu enerji değeri, bir saatlik ısıtma süresi varsayımı altında elektriksel güç birimine dönüştürüldüğünde:

$$\text{Güç (kW)} = \frac{Q}{3600} = \frac{6300}{3600} \approx 1,75 \text{ kW}$$

olarak elde edilmektedir.

Endüstriyel ölçekte değerlendirildiğinde, bu enerji tüketimi oldukça anlamlı bir boyut kazanmaktadır. Özellikle 500 litre veya 1000 litre kapasiteli üretim tanklarında aynı sıcaklık değişiminin sağlanması için gereken enerji, sırasıyla 8.75 kW ve 17.5 kW gibi ciddi güç taleplerine karşılık gelmektedir. Bu durum, biyodizel üretim tesislerinde elektrik enerjisine olan bağımlılığı artırmakta ve toplam üretim maliyetleri üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Dolayısıyla, bu enerji ihtiyacının güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla karşılanması hem ekonomik sürdürülebilirlik hem de çevresel kazanımlar açısından büyük bir potansiyele sahiptir. 24 °C ile 60 °C arası yağ ısıtma işlemi için gerekli ısı enerjisi (Q) tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. 24 °C → 60 °C Arası Yağ Isıtma İşlemi İçin Gerekli Isı Enerjisi (Q)

Yağ Miktarı (Litre)	Kütle (kg)	ΔT (°C)	Q (kJ)	Q (kWh)
50	45	36	3,240	0.90
100	90	36	6,300	1.75
250	225	36	15,750	4.38
500	450	36	31,500	8.75
1000	900	36	63,000	17.50

3. GÜNEŞ ENERJİLİ SU ISITMA SİSTEMİNDEN ELDE EDİLEBİLİR ENERJİ DEĞERİNİN HESAPLANMASI

Bu kısımda, biyodizel üretimi sırasında ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin, yenilenebilir bir kaynak olan güneş enerjisi ile karşılanabilirliği değerlendirilmiştir [8]. Sistem tasarımı ve hesaplamalar, prosesin Elâzığ ili koşullarında uygulanabilirliği esas alınarak yapılmıştır. Bu kapsamda Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verileri dikkate alınmış ve ilgili bölgedeki iklimsel güneşlenme parametreleri temel alınmıştır [9]. Elâzığ ili için yıllık ortalama güneşlenme süresi 7,2 saat/gün olup, günlük ortalama global güneş ışınlamı 5,1 kWh/m²/gün olarak belirlenmiştir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi elde etmek amacıyla, konutlarda yaygın olarak kullanılan bir sistem örnek alınmıştır. Bu sistem, vakum tüplü tipte, 2,5 m x 2 m boyutlarında (toplam 5 m²) kolektör alanına sahip olup, 100 litrelik yalıtımlı su deposu ile birlikte çalışmaktadır. Kolektör sisteminin ortalama verimlilik değeri %60 ($\eta = 0,60$) olarak kabul edilmiştir.

Güneş enerjisinden elde edilebilecek günlük ısı enerjisi miktarı, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q_g = G \times A \times \eta = 5,1 \times 5 \times 0,6 = 15,3 \text{ kWh/gün}$$

Q_g : Günlük elde edilebilecek ısı enerjisi (kWh/gün)

G : Güneş ışınlamı (kWh/m²/gün)

A : Kolektör alanı (m²)

η : Kolektör sistem verimi

Elde edilen bu değer, biyodizel üretimi için 100 litre yağın 24°C'den 60°C'ye çıkarılması sırasında ihtiyaç duyulan yaklaşık 1,75 kWh enerji ile karşılaştırılmıştır. Bu mukayese sonucunda, güneş enerjili sistemin ihtiyaç duyulan enerjinin yaklaşık %72'sini karşılayabildiği tespit edilmiştir. Bu da sistemin termal verimliliğini (η_t) yaklaşık olarak:

$$\eta_t = \frac{1,75}{15,3} \approx 0,72$$

olarak ortaya koymaktadır.

Buna ek olarak, güneş enerjisi kullanımı sayesinde yıllık bazda sağlanabilecek tasarruf ve çevresel katkı da hesaplanmıştır. Biyodizel üretim sürecinde sürekli olarak elektrik enerjisi kullanılması durumunda, yılda ortalama 460 kWh elektrik tüketileceği öngörülmektedir. Güneş enerjisi entegrasyonu sayesinde bu tüketimin büyük oranda önüne geçilerek, yılda yaklaşık 1,1 ton CO₂ emisyonunun engellenebileceği hesaplanmıştır. Enerji karşılaştırma verileri tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Enerji karşılaştırma verileri

Enerji Türü	Enerji Miktarı (kWh/gün)	Açıklama
Biyodizel Üretimi İçin Gerekli Enerji	1,75	100 litre yağın 24°C'den 60°C'ye ısıtılması için gerekten enerji
Güneş Enerjisinden Elde Edilen Enerji	15,3	5 m ² vakumlu tüplü kollektör ile %60 verimle elde edilen günlük enerji

4. MATERYAL ve METOD

4.1. Sistemin Çalışma Sistematiği

Biyodizel üretim sürecinde ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin karşılanması amacıyla, laboratuvar ortamında vakumlu tüplü güneş kollektörleri ile entegre bir sıcak su ısıtma sistemi kurulmuştur. Sistemde, 2,5 m × 2 m ebatlarındaki vakumlu tüplü güneş kollektörlerine bağlı, izolasyonu güçlendirilmiş 100 litrelik sıcak su deposu bulunmaktadır. Bu sıcak su deposundan, yeni çekilen izolasyonlu boru hattı aracılığıyla evaporatör cihazının su girişi sağlanmıştır. Sistem güvenliği ve kontrolü açısından sıcak su deposu ile evaporatör arasındaki su hattına tek yönlü bir çekvalf (geri akış önleyici vana) monte edilmiştir. Bu çekvalf, suyun sadece tek yönde akmasını sağlayarak sistemin stabilitesini artırmaktadır. Ayrıca, sistemin sıcaklık kontrolü için entegre edilen termostat sayesinde sıcak su akışı otomatik olarak düzenlenmektedir. Termostat, suyun sıcaklığı 58 °C'ye ulaştığında akışa izin verirken, sıcaklık 62 °C'ye ulaştığında sıcak suyun cihaz girişine akışını kesmektedir. Bu kontrol mekanizması sayesinde, transesterifikasyon reaksiyonu sırasında reaksiyon sıcaklığı 58–62 °C aralığında sabit tutulabilmektedir. Böylece biyodizel üretiminde reaksiyon verimliliği artırılırken, enerji tüketimi de optimize edilmiştir.

4.2. Sistemin Parçaları

Güneş enerjili su ısıtma sistemi ile biyodizel üretim prosesi arasında entegre ve uyumlu bir çalışma sağlamak amacıyla, sistemin kontrol ve işleyişinden sorumlu çeşitli ekipmanlar kullanılmıştır. Bu ekipmanlar, sistemin verimli, güvenli ve otomatik olarak çalışmasını temin etmektedir. Sistemin ana bileşenleri ve görevleri aşağıda özetlenmiştir.

4.2.1. Vakumlu Tüplü Güneş Kollektörü

Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisinin ana kaynağını oluşturan vakumlu tüplü güneş kolektörleri, yüksek verimlilikleri ve dayanıklılıklarıyla biyodizel üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmamızda kullanılan kolektörler, %60'lık termal verime sahip olup, toplamda 12 adet, her biri 2,5 metre uzunluğunda tüpten meydana gelmektedir. Bu tüpler, vakum teknolojisi sayesinde ısı kayıplarını minimize etmekte ve güneş ışınlarını etkin bir şekilde absorbe ederek toplayan yüzeylerin sıcaklığını yüksek seviyede tutmaktadır. Bu sayede, kolektörler güneş enerjisinden maksimum düzeyde ısı enerjisi elde edilmesini sağlamaktadır. Kollektörlerin yapısal özellikleri ve verimi, biyodizel üretim prosesinde ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin sürdürülebilir ve ekonomik bir şekilde karşılanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu tip kolektörlerin modüler yapısı, sistem kapasitesinin ihtiyaca göre kolayca artırılabilmesine imkân verir. Kullanılan vakumlu tüplü güneş kolektörüne ait görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Vakumlu tüplü güneş kolektörü

4.2.2. İzolasyonlu Su Tankı

Güneş kollektörlerinden elde edilen termal enerjinin etkin bir şekilde depolanması amacıyla kullanılan izolasyonlu su tankı, sistemin enerji verimliliği açısından kritik bir bileşenidir. Bu tank, yüksek kaliteli izolasyon malzemeleri ile çevrelenmiş olup, içindeki suyun sıcaklığını dış ortam koşullarından izole ederek yaklaşık 14 saat boyunca sabit tutabilme kapasitesine sahiptir. Isı kayıplarının minimize edilmesi sayesinde, depolanan sıcak su biyodizel üretim prosesinde ihtiyaç duyulduğunda etkin bir şekilde kullanılabilmekte, böylece prosesin sürekliliği ve enerji tüketim verimliliği artırılmaktadır. Ayrıca, tankın uygun büyüklük ve izolasyon özellikleri, güneş enerjili sistemlerin gün içindeki değişken enerji üretiminden kaynaklanan dalgalanmaları dengeleyerek stabil ısı kaynağı sağlamaktadır. İzolasyonlu su tankının yapısal özellikleri ve genel görünümü Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. İzolasyonlu su tankı

4.2.3. Pilot Kumandalı Çek Valf

Sistem içerisindeki sıcak suyun, sıcak su deposundan biyodizel üretim prosesine kontrollü ve tek yönlü olarak akışını sağlayan pilot kumandalı çek valf, prosesin güvenliği ve

verimliliği açısından önemli bir ekipmandır. Bu çek valf, termostat tarafından yönetilen bir kontrol mekanizmasına sahiptir; bu sayede sıcaklık belirlenen aralıkta olduğunda suyun akışına izin verirken, sıcaklık dışına çıktığında akışı otomatik olarak durdurmaktadır. Böylelikle, biyodizel üretiminde ihtiyaç duyulan sıcaklık aralığının (örneğin 58-62 °C) korunması sağlanmakta, aşırı ısı veya düşük ısı kaynaklı verim kayıplarının önüne geçilmektedir. Pilot kumandalı çek valfin modüler ve güvenilir yapısı, sistemin uzun ömürlü ve kesintisiz çalışmasına olanak tanımaktadır. Aşağıda görseli verilen bu çek valf, sistemin termal kontrolünü sağlayan kritik bileşenlerden biridir. Pilot kumandalı çek valfin genel görünümü Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Pilot kumandalı çek valf

4.2.4. Çift Kontaklı Termostat

Devirdaim suyunun sıcaklığını 58°C ile 62°C arasında sabit tutmak amacıyla kullanılan çift kontaklı termostat, sistemin termal kontrolünde kritik bir rol oynamaktadır. Aşağıda görseli sunulan bu termostat, ısı sensörleri vasıtasıyla sıcaklık değerlerini sürekli izleyerek, belirlenen alt eşik olan 58°C’ye ulaşıldığında su akışına izin vermekte, üst eşik olan 62°C’ye ulaşıldığında ise sıcak su akışını kesmektedir. Bu hassas kontrol mekanizması, transesterifikasyon reaksiyonu süresince

reaksiyon ortamının istenilen sıcaklık aralığında korunmasını sağlayarak, biyodizel üretim verimliliğinin artırılmasına ve prosesin stabil çalışmasına katkı sağlamaktadır. Böylece enerji kayıplarının önüne geçilmekte ve proses güvenliği artırılmaktadır. Çift kontaklı termostatin genel görünümü Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Çift kontaklı termostat

4.2.5. Su Banyolu Evaporatör Cihazı

Güneş kollektörlerinden elde edilen sıcak su, 58–62 °C sıcaklık aralığında kontrol edilerek, Şekil 5’te gösterilen su banyolu evaporatör cihazının kazanına iletilmektedir. Cihaz içerisinde yer alan kazan, metil ester reaksiyonu için uygun sıcaklık ortamını sağlamak amacıyla sıcak suyun ısı transferiyle stabilize edilmektedir. Reaksiyon sırasında, metil ester kazan içinde, kontrollü bir su banyosu ortamında 60 °C’de işlem görmektedir. Bu sıcaklık aralığı, transesterifikasyon reaksiyonu için ideal olup, reaksiyonun etkin ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini mümkün kılmaktadır. Su banyolu evaporatörün bu termal kontrol yeteneği, biyodizel üretim prosesinin sürekliliği ve ürün kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır [10].



Şekil 5. Su banyolu evaporatör cihazı

4.3. Sistemin Şematik Görüntüsü

Biyodizel üretim prosesinde ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin sağlanması amacıyla tasarlanan sistemin şematik düzenlemesi, enerji akışının ve kontrol mekanizmalarının bütüncül bir görünümünü sunmaktadır. Sistemde, vakumlu tüplü güneş kollektörlerinden elde edilen termal enerji, yeni çekilen izolasyonlu boru hattı aracılığıyla 100 litre kapasiteli izolasyonlu sıcak su deposuna aktarılmaktadır. Bu tasarım, ısı kayıplarını minimize etmek ve sıcak suyun uzun süreli muhafazasını sağlamak üzere optimize edilmiştir. Isıtılan su, sıcak su deposundan laboratuvardaki evaporatör cihazının su girişine yönlendirilmekte olup, iki bileşenli kontrol sistemi ile yönetilmektedir. Sıcak su hattına monte edilen tek yönlü pilot kumandalı çek valf, suyun doğru yönde akışını garanti ederken; çift kontaklı termostat, suyun 58 °C’de akışına izin vermekte ve 62 °C’de akışı durdurarak sıcaklık aralığını hassas biçimde kontrol etmektedir. Bu mekanizma, transesterifikasyon reaksiyonunun devam ettiği süreç boyunca reaksiyon sıcaklığının 58-62 °C aralığında stabil tutulmasını sağlamaktadır. Bu şematik yapı, sistemin hem enerji verimliliğini artırmakta hem de prosesin kontrollü ve güvenilir bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, izolasyonlu boru hattı ve sıcak su deposunun kullanımı, güneş

enerjisinden elde edilen ısıнын optimum şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Böylelikle, biyodizel üretim prosesinin enerji maliyetleri azaltılırken, sürdürülebilir ve çevre dostu bir üretim modeli desteklenmektedir. Sistemin şematik görüntüsü Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6. Sistemin şematik görünümü

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu kısımda, biyodizel üretim prosesinde kullanılan ısı enerjisinin güneş enerjili su ısıtma sistemi ile sağlanabilirliği deneysel ve teorik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan enerji hesaplamaları ve saha verileri, Elâzığ ilinin yüksek güneşlenme potansiyelinin biyodizel üretiminde enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayabileceğini göstermiştir. Enerji ihtiyacı hesaplamaları sonucunda, 100 litre bitkisel yağın transesterifikasyon reaksiyonu için 24 °C’den 60 °C’ye ısıtılması amacıyla yaklaşık 6300 kJ (1,75 kW) enerji gerektiği tespit edilmiştir. Buna karşılık, vakumlu tüplü güneş kollektörleri ve izolasyonlu su tankından elde edilen günlük

ortalama 15,3 kWh termal enerji potansiyeli belirlenmiştir. Bu değer, biyodizel üretim sürecindeki elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %72'sinin güneş enerjisinden karşılanabileceğini ortaya koymaktadır. Sistem tasarımı ve saha deneyleri, sıcak suyun 58-62 °C arasında stabil tutulmasını sağlayan termostat kontrollü çek valf ve izolasyonlu boru hatlarının, reaksiyon sıcaklığının sabit kalmasında etkin rol oynadığını göstermiştir. Bu durum, transesterifikasyon reaksiyonunun verimliliği açısından kritik bir parametre olan sıcaklık kontrolünün başarıyla sağlandığını göstermektedir. Enerji tasarrufu açısından, güneş enerjisinin kullanımı yıllık yaklaşık 460 kWh elektrik enerjisi tasarrufu ve yaklaşık 1,1 ton CO₂ emisyonunun önlenmesi potansiyeli taşımaktadır. Bu değerler, biyodizel üretiminde sürdürülebilir enerji kullanımı açısından önemli çevresel ve ekonomik faydalar sunmaktadır. Ancak, güneş enerjisinin mevsimsel değişkenlikleri ve hava koşullarına bağlı performans dalgalanmaları, sistemin sürekliliği açısından dikkate alınması gereken sınırlamalardır. Bu nedenle, biyodizel üretim tesislerinde güneş enerjisi destekli sistemlerin hibrit enerji kaynaklarıyla desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, sistem verimliliğini artırmak amacıyla daha yüksek verimli kollektörlerin ve gelişmiş izolasyon tekniklerinin kullanımı ileriki çalışmalarda ele alınabilir. Sonuç olarak, güneş enerjili su ısıtma sistemleri biyodizel üretiminde ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin çevre dostu ve ekonomik bir şekilde karşılanmasını sağlayarak fosil enerji bağımlılığını azaltmakta ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Elâzığ ilinin yüksek güneş enerjisi potansiyeli dikkate alınarak, biyodizel üretiminde ihtiyaç duyulan ısı enerjisinin güneş enerjili su ısıtma sistemleri aracılığıyla karşılanabilirliği araştırılmıştır. Günlük 100 litre

kapasiteli biyodizel üretim tesisinde, transesterifikasyon reaksiyonu için gerekli olan 24 °C'den 55–65 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığının sağlanmasında, geleneksel elektrikli ısıtıcılar veya fosil yakıtlı sistemlerin yerini güneş enerjili sistemlerin alabileceği tespit edilmiştir. Enerji analizleri ve saha ölçümleri sonucunda, Elazığ ili için yıllık ortalama 5,1 kWh/m²·gün değerindeki güneşlenme potansiyeli temel alınarak tasarlanan vakumlu tüplü güneş kollektörleri ve izolasyonlu su tankı sistemi, biyodizel üretim prosesinde günlük ısı enerjisi ihtiyacının yaklaşık %72'sini karşılayabilmiştir. Bu durum, elektrik tüketiminde yıllık yaklaşık %60 oranında bir azalma ve karbon salımında 1,1 ton CO₂/yıl civarında bir düşüş ile sonuçlanmıştır. Bu veriler ışığında, küçük ve orta ölçekli biyodizel üretim tesislerinde güneş enerjili su ısıtma sistemlerinin hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir ve uygulanabilir bir alternatif enerji kaynağı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, fosil yakıt kullanımının azaltılmasıyla, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve karbon ayak izinin küçültülmesi mümkün hale gelmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, sistem performansını artırmak amacıyla daha yüksek verimli güneş kollektörlerinin kullanılması, hibrit enerji sistemleri ile entegrasyonun sağlanması ve enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı iklim koşullarında ve daha büyük ölçekli tesislerde benzer uygulamaların incelenmesi, güneş enerjisinin biyodizel üretiminde yaygınlaştırılması açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bi, Z., Guo, R. & Khan, R. (2024). Renewable adoption, energy reliance, and CO2 emissions: a comparison of developed and developing economies. *Energies*, 17(13), 3111.
- [2] Ölmez, M. & Bayrak, B. (2025). International Migration Governance and Smart Urbanization: An Analysis in the Context of Game Theory (Nash Equilibrium). *Kent Akademisi*, 18(5), 3114-3130.
- [3] Qadeer, M. U., Ayoub, M., Komiyama, M., Daulatzai, M. U. K., Mukhtar, A., Saqib, S., ... & Bokhari, A. (2021). Review of biodiesel synthesis technologies, current trends, yield influencing factors and economical analysis of supercritical process. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127388.
- [4] Demirpolat, A. B., Uyar, M. M. & Arslanoğlu, H. (2022). Biodiesel fuels produced from poppy and canola oils, experimental investigation of the performance and emission values of the samples obtained by adding new types of nanoparticles. *Petroleum Chemistry*, 62(4), 433-443.
- [5] Gani, U. A. & Rinjani, R. R. (2019, October). Mini bio diesel plant with solar water heating system using homogen catalyst. In *Proceedings of the National Seminar on Nuclear Energy Infrastructure* (No. INIS-ID-97, pp. 57-61).
- [6] Sampao, S., Sukchai, S. & Thanarak, P. (2018). Solar-Assisted Biodiesel Production from Used Cooking Oil. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 13(2).

- [7] Uyar, M. M., Demirpolat, A. B. & Arslanoğlu, H. (2023). Investigation of performance and emission values of biodiesel fuels produced by adding ZnO nanoparticles as additives to waste sunflower and Köhnü grape seed oil. *Colloid and Polymer Science*, 301(6), 557-567.
- [8] Sharma, A. K. (2025). Solar Thermal Technologies for Biofuel Production: Recent Advances and Future Prospectus. *Green Energy and Fuel Research*, 13-25.
- [9] YEGM (2025). Elâzığ İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) Verileri.
- [10] Uyar, M. M., Çıtlak, A. & Demirpolat, A. B. (2024). Investigation of performance and emission values of new type of fuels obtained by adding MgO nanoparticles to biodiesel fuels produced from waste sunflower and cotton oil. *Industrial Crops and Products*, 222, 119712.

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com