

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# GÜNEŞ ENERJİLİ PARABOLİK OLUK SİSTEMLERİNİN SAHRA ALTI AFRİKA'DAKİ UYGULANABİLİRLİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI İLE TAHMİNLENMESİ

PREDICTING THE FEASIBILITY OF SOLAR  
PARABOLIC TROUGH SYSTEMS IN SUB-SAHARAN  
AFRICA USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

**Yazarlar (Authors):** Atılğan Temir , H. Cenk Bayrakçı , İbrahim Üçgül 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Temir A., Bayrakçı H. C., Üçgül İ., "Güneş Enerjili Parabolik Oluk Sistemlerinin Sahra Altı Afrika'daki Uygulanabilirliğinin Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tahminlenmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 10(1): 24-41, (2026).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1771446

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# GÜNEŞ ENERJİLİ PARABOLİK OLUK SİSTEMLERİNİN SAHRA ALTI AFRIKA'DAKİ UYGULANABİLİRLİĞİNİN MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI İLE TAHMİNLENMESİ

Atılgan Temir<sup>a</sup>, H. Cenk Bayrakçı<sup>b</sup>, İbrahim Üçgül<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Bölümü, TÜRKİYE  
<sup>b</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE  
<sup>c</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [d1940640018@isparta.edu.tr](mailto:d1940640018@isparta.edu.tr)

(Geliş/Received: 24.08.25; Düzeltme/Revised: 16.12.25; Kabul/Accepted: 12.03.26)

## ÖZ

Küresel enerji talebindeki sürekli artış, fosil yakıtlara bağımlılığı artırmakta ve bu durum ekonomik, çevresel ve arz güvenliği sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklara yönelim giderek önem kazanmaktadır. Özellikle yoğunlaştırıcı güneş enerjisi (CSP) sistemleri, güneş ışığını odaklayarak yüksek sıcaklıklara ulaşabilmeleri ve ısıl enerjiyi depolayabilmeleri sayesinde öne çıkmaktadır. Bu çalışma, Sahra Altı Afrika'daki üç ülke (Nijerya, Etiyopya, Kenya) için 100 MW kapasiteli kavramsal bir parabolik oluk kolektör (PTC) santralinin termodinamik performansını ve uygulanabilirliğini analiz etmektedir. Direkt normal ışınım, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi yerel meteorolojik verilerle yapılan hesaplamalarda, 100 MW güç üretimi için gerekli kolektör sayısı Etiyopya'da 1606, Kenya'da 1669, Nijerya'da ise 2430 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, yüksek rakım ve düşük ısı kaybı sayesinde Etiyopya'nın en verimli ülke olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çalışmaya deneysel verilere dayalı makine öğrenmesi regresyon modelleri entegre edilmiştir. Kolektör çıkış sıcaklığı, dört çevresel değişken kullanılarak tahmin edilmiş ve 6 farklı regresyon modeli test edilmiştir. K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması  $R^2 = 0.8896$ , MAE = 1.52 ve RMSE = 2.61 ile en yüksek doğruluk değerlerine ulaşırken, Decision Tree algoritması  $R^2 = 0.8632$ , MAE = 1.40 ile düşük hata oranları sunmuştur. Ridge, Lasso, ElasticNet ve MLR gibi doğrusal modeller ise  $R^2 \approx 0.83$  seviyelerinde kalmıştır. Elde edilen sonuçlar, PTC sistemlerinin Sahra Altı Afrika'da teknik olarak uygulanabilir olduğunu ve makine öğrenmesi algoritmalarının ısıl performans tahminlerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, CSP yatırımlarının bölgesel kalkınma ve sürdürülebilir enerji arzı açısından önemli fırsatlar sunduğu ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir Enerji, Parabolik Oluk Kolektör, Sahra Altı Afrika, Makine Öğrenmesi.

## PREDICTING THE FEASIBILITY OF SOLAR PARABOLIC TROUGH SYSTEMS IN SUB-SAHARAN AFRICA USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

### ABSTRACT

The continuous increase in global energy demand has intensified reliance on fossil fuels. This dependency leads to significant challenges related to economics, environmental degradation, and energy security. As a result, the shift toward renewable energy sources has become increasingly important. Among these, solar energy stands out as one of the most abundant and sustainable resources. Concentrated Solar Power (CSP) systems offer high thermal efficiency through solar radiation concentration and the capability to store thermal energy. This study presents a thermodynamic performance and feasibility analysis of a conceptual 100 MW parabolic trough collector (PTC) CSP

plant for three Sub-Saharan African countries: Nigeria, Ethiopia, and Kenya. These countries were selected based on their high solar potential and diverse climatic conditions. Using local meteorological data, including direct normal irradiance (DNI), ambient temperature, and wind speed, the required number of collectors to generate 100 MW was calculated. The results show that Ethiopia requires 1606 collectors, Kenya 1669, and Nigeria 2430. Ethiopia demonstrates the best performance due to its high elevation and reduced thermal losses. In addition to thermodynamic analysis, the study incorporates machine learning-based regression models using experimental data. The collector outlet temperature was predicted using four environmental variables. Six regression algorithms were tested. The K-Nearest Neighbors (KNN) model provided the highest accuracy with an  $R^2$  value of 0.8896, a mean absolute error (MAE) of 1.52, and a root mean square error (RMSE) of 2.61. The Decision Tree model followed with an  $R^2$  of 0.8632 and the lowest MAE of 1.40. Other models such as Ridge, Lasso, ElasticNet, and Multiple Linear Regression (MLR) showed consistent but slightly lower performance, with  $R^2$  values around 0.83. The results confirm that PTC systems are technically feasible for Sub-Saharan African conditions. The use of machine learning algorithms has also proven effective in predicting thermal performance. These findings suggest that CSP investments, supported by appropriate policies and regional cooperation, have strong potential to contribute to sustainable electricity generation and energy security in the region.

**Keywords:** Renewable Energy, Parabolic Trough Collector, Sub-Saharan Africa, Machine Learning.

## 1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji tüketimi, artan nüfus ve sanayileşmenin etkisiyle sürekli bir yükseliş eğilimi göstermekte olup, bu durum fosil yakıtlara dayalı enerji arzı üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. 2023 yılı itibarıyla küresel birincil enerji talebi yaklaşık %2 oranında artarak 620 exajoule seviyesine ulaşmış ve bu değerle tarihsel bir zirve kaydedilmiştir. Aynı yıl, fosil yakıtlar toplam birincil enerji tüketiminin yaklaşık %81.5'ini oluşturmaya devam etmiştir [1-2]. Bu durum, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir olmaktan uzaktır; zira fosil yakıt rezervleri sınırlı olup, kullanımları sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğini hızlandırmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş yalnızca iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında verilen taahhütlerin yerine getirilmesi açısından değil, aynı zamanda küresel enerji güvenliğinin sağlanması açısından da kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, güneş enerjisi sahip olduğu yüksek potansiyel nedeniyle sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır.

Sahra Altı Afrika (SSA) bölgesi, güneş enerjisi potansiyeli açısından dünya genelinde öne çıkan bir konuma sahiptir. Kıta, küresel düzeydeki en yüksek güneşlenme kaynaklarının yaklaşık %60'ını barındırmasına karşın, toplam kurulu güneş enerjisi üretim kapasitesinin yalnızca %1'ine sahiptir. Bu çarpıcı oransal

fark, bölgenin sahip olduğu teknik potansiyelin mevcut durumda ne denli yetersiz değerlendirildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı ülkeler bu yapısal sorunu aşmak üzere önemli adımlar atmaktadır. Örneğin Gana, Kenya ve Ruanda gibi ülkeler, 2030 yılına kadar evrensel elektrik erişimi hedefi doğrultusunda kayda değer ilerlemeler kaydetmiş; bu süreçte yenilenebilir enerji yatırımlarına önemli kaynaklar tahsis etmişlerdir. Özellikle Kenya, elektrik üretiminin %75'inden fazlasını düşük karbonlu enerji kaynaklarından jeotermal, hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi karşılayarak dikkat çekmektedir. Bu durum, güçlü ve istikrarlı politika desteğinin, mevcut yenilenebilir enerji potansiyelinin etkin biçimde üretim kapasitesine dönüştürülmesinde ne denli belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir [2].

Güneş enerjisi teknolojileri arasında yer alan yoğunlaştırıcı güneş enerjisi (CSP) sistemleri, ısı enerji depolama kapasitesi sayesinde sürekli ve güvenilir enerji üretimi sağlayabilme potansiyeli ile öne çıkmaktadır. CSP santralleri, güneş ışığını aynalar aracılığıyla odaklayarak yüksek sıcaklıklarda ısı enerjisi üretmekte ve bu ısıyı, konvansiyonel türbinleri çalıştırmak suretiyle elektrik enerjisine dönüştürmektedir. CSP sistemleri içerisinde en yaygın kullanılan tasarımlardan biri parabolik oluk kolektör (PTC) sistemidir. Bu sistemlerde, uzun parabolik aynalar yardımıyla güneş ışınları,

içinden ısı transfer akışkanının geçtiği alıcı tüp üzerine odaklanmakta ve böylece yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. PTC sistemleri tek eksenli güneş takip mekanizmasıyla çalışmakta olup, teknolojik olarak ticari olgunluk seviyesine ulaşmış sistemlerdir. CSP santrallerinin en önemli avantajlarından biri, ısı enerjisi depolama sistemleriyle (örneğin erimiş tuz bazlı termal depolama) entegre edilebilmesidir. Bu sayede, güneş ışınımının olmadığı saatlerde dahi enerji üretimi sürdürülebilmekte ve bu durum CSP sistemlerine, fotovoltaik (PV) sistemlerle kıyaslandığında daha yüksek kapasite faktörleri kazandırmaktadır. Modern CSP santralleri %25-40 aralığında kapasite faktörlerine ulaşabilirken, geniş kapasiteli ısı depolamaya sahip kule tipi CSP tasarımlarında bu oran %70-80'e kadar çıkabilmektedir. Buna karşın, PV sistemlerinde kapasite faktörü genellikle %17-25 aralığında kalmaktadır. Bu yönüyle CSP sistemleri, yük takip edebilirlik kabiliyeti sayesinde, yenilenebilir enerji ağırlıklı elektrik şebekelerinde PV sistemlerine işlevsel bir tamamlayıcı rol üstlenmektedir. Buna rağmen, Sahra Altı Afrika (SSA) bölgesinde CSP yatırımları oldukça sınırlı kalmıştır. 2025 yılı itibarıyla kıtada yalnızca birkaç büyük ölçekli CSP projesi (Fas, Güney Afrika ve bazı pilot uygulamalar) hayata geçirilmiştir [2]. Bölgenin sahip olduğu yüksek güneşlenme potansiyeline karşın CSP sistemlerinin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller; yüksek başlangıç yatırım maliyetleri, finansman zorlukları, politika eksiklikleri ve yeterli düzeyde kamuoyu farkındalığının bulunmamasıdır. Ancak son yıllarda, ülkelerin enerji portföylerini çeşitlendirme ve mevcut güneş kaynaklarını daha etkin kullanma yönünde gösterdiği eğilim, CSP teknolojilerine olan ilgiyi artırmaya başlamıştır.

Bu çalışma, Sahra Altı Afrika (SSA) bölgesindeki güneş enerjisi potansiyelini ve coğrafi çeşitliliği temsil eden üç farklı ülke örneği üzerinden, şebeke ölçekli hipotetik bir parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcı güneş enerjisi (CSP) santralinin performansını inceleyerek literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmada ele alınan Nijerya, Etiyopya ve Kenya; yüksek güneş ışınımı potansiyeline sahip olmalarının yanı sıra, farklı iklimsel ve enerji talebi profilleriyle bölgesel çeşitliliği yansıtan örnekler olarak seçilmiştir. Nijerya, yüksek direkt normal ışınım (DNI) değerlerine

sahip kuzey bölgeleri ile Batı Afrika'da konumlanan, yüksek enerji talebi ve altyapı eksiklikleriyle dikkat çeken bir ülkeyi temsil etmektedir. Etiyopya ise yüksek rakımı, serin ortam sıcaklıkları ve güçlü DNI potansiyeli ile Doğu Afrika'nın özgün bir örneğini sunmaktadır. Kenya ise ekvatorial kuşakta yer alması ve iyi düzeyde güneş kaynağına sahip olmasının yanı sıra, mevcut yenilenebilir enerji yatırımları ve politikalarıyla bölgedeki öncü ülkelerden biri olarak öne çıkmaktadır [3]. Farklı coğrafi ve iklimsel özellikler sergileyen bu üç ülke özelinde gerçekleştirilen performans değerlendirmesi, hem teknik hem de bölgesel açılardan anlamlı çıkarımlar sunmayı hedeflemektedir. Ancak bu değerlendirmelerin sağlam temellere dayanabilmesi için, öncelikle CSP teknolojilerinin Sahra Altı Afrika'daki mevcut durumu, potansiyeli ve bu alanda daha önce gerçekleştirilen akademik çalışmalar bağlamında kapsamlı bir literatür taraması yapılması gerekmektedir.

Sahra Altı Afrika'da yoğunlaştırıcı güneş enerjisi (CSP) uygulamalarına ilişkin akademik literatür, uzun bir süre boyunca sınırlı düzeyde kalmış ve bu durum, bölgedeki CSP projelerinin sahadaki yavaş yayılımı ile örtüşmüştür. Erken dönem çalışmalarda ağırlıklı olarak kaynak potansiyelinin değerlendirilmesi ve yüksek ölçekli fizibilite analizlerine odaklanılmıştır. Bu kapsamda, gerçekleştirilen bir çalışmada, CSP teknolojisinin Nijerya'nın kuzey kesimlerindeki elektrik arzına potansiyel katkısı incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, Sahel bölgesinde gözlemlenen yüksek DNI değerlerinin CSP santrallerinin kurulumu için elverişli koşullar sunduğu ortaya konmuş; ancak bu potansiyelin etkin şekilde değerlendirilebilmesi için politika desteği ve güçlü bir şebeke entegrasyonunun gerekliliği vurgulanmıştır. Çalışma, teknoloji maliyetlerinde yaşanabilecek düşüşler ile yeterli düzeyde siyasi irade ve destekleyici politikaların hayata geçirilmesi durumunda, CSP sistemlerinin Nijerya'nın uzun vadeli enerji stratejisinde önemli bir yer edinebileceğini öngörmektedir. Bununla birlikte, çalışma döneminde CSP teknolojilerinin hâlen ekonomik zorluklar içerdiği de ifade edilmiştir. Öğrenme eğrisi kaynaklı maliyet azalmalarının gerçekleşmesi ve uygun düzenleyici çerçevenin oluşturulması durumunda CSP teknolojilerinin 2030 sonrası dönemde konvansiyonel elektrik üretim teknolojileriyle maliyet açısından rekabet

edebilir hale gelmesi mümkün görülmektedir [4].

Son yıllarda, Afrika'da CSP teknolojilerinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğine yönelik ilgi artış göstermiştir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen bir çalışmada, Tanzania özelinde CSP sistemlerinin ayrıntılı bir tekoekonomik fizibilite analizi yapılmıştır. Araştırmada, NREL tarafından geliştirilen System Advisor Model (SAM) yazılımı kullanılarak hem parabolik oluk tipi hem de güneş kulesi tipi CSP santralleri simüle edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yaklaşık %7 faiz oranına sahip imtiyazlı krediler gibi elverişli finansman koşulları altında 100 MW kapasiteli bir CSP santralının seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti (LCOE) yaklaşık 14 ¢/kWh düzeyinde gerçekleşmektedir. Buna karşılık, ticari kredi oranlarının (~%18) geçerli olduğu senaryolarda LCOE değerinin 26 ¢/kWh seviyelerine yükseldiği tespit edilmiştir [5-6]. Bu bulgular, CSP teknolojilerinin Afrika enerji pazarlarında uygulanabilirliğinin büyük ölçüde finansman koşullarına ve destekleyici politika mekanizmalarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. CSP'nin bölgede PV gibi daha düşük maliyetli alternatiflerle rekabet edebilmesi için düşük faizli krediler, kredi garanti mekanizmaları ve risk azaltıcı finansal araçların sağlanmasının hayati önem taşıdığını vurgulamaktadır. Ayrıca, Tanzania gibi ülkelerde yerel veri eksikliği ile CSP teknolojilerine dair teknik bilgi birikiminin yetersizliğine dikkat çekilmiş ve bu durumun, konuyla ilgili literatürde önemli bir boşluk oluşturduğu ifade edilmiştir. Söz konusu eksiklik, bu çalışmanın da katkı sunmayı amaçladığı temel bilgi açıklarından biri olarak değerlendirilmektedir [5].

Nijerya'ya yönelik gerçekleştirilen bir diğer karşılaştırmalı analiz çalışmasında, elektrik üretimi açısından CSP sistemleri ile PV sistemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, Nijerya'nın sahip olduğu yüksek güneş enerjisi potansiyeline rağmen, ülkede hâlihazırda faal durumda hiçbir CSP santralının bulunmadığını belirtmektedir. Yapılan analizler, mevcut koşullar altında PV sistemlerinin, Nijerya'da parabolik oluk tipi CSP sistemlerine kıyasla finansal açıdan çok daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre, eşdeğer sermaye yatırımı ile PV sistemleri CSP sistemlerine göre

yaklaşık iki kat daha fazla elektrik enerjisi üretebilmekte ve birim enerji maliyeti CSP'e oranla yaklaşık altıda bir düzeyinde gerçekleşmektedir. Bu çarpıcı fark, büyük ölçüde son 10 yıl içerisinde PV modül fiyatlarında yaşanan keskin düşüşlerden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, CSP sistemlerinin maliyetlerinde özellikle aynalar, alıcı tüpler ve ısı enerjisi depolama sistemleri gibi ana bileşenlerde benzer düzeyde bir azalma gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, CSP teknolojisinin gece saatlerinde elektrik üretimini mümkün kılan yeterli kapasiteli ısı enerjisi depolama sistemleri ile desteklenmesi, CSP maliyetlerinde gelecekte yaşanabilecek düşüşler ve karbon fiyatlandırması gibi iklim politikalarının devreye girmesi durumunda CSP'nin ekonomik olarak daha uygulanabilir hâle gelebileceğini kabul etmektedir [7]. Benzer şekilde, daha önce Ogunmodimu [4], tarafından yürütülen çalışmada, Nijerya'nın kuzey bölgelerinde CSP sistemlerinin rekabetçiliği çeşitli senaryolar altında değerlendirilmiş; sürekli maliyet azalışları ve belirli politika desteklerinin sağlanması durumunda, CSP teknolojilerinin uzun vadede konvansiyonel üretim sistemleriyle maliyet eşitliği sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak söz konusu çalışmada, bu tür yatırımların hayata geçirilebilmesi için geçiş sürecinde ek teşvik ve destek mekanizmalarının gerekliliği de vurgulanmıştır.

Belirli ülke örneklerinin ötesinde, Afrika genelindeki deneyimler, CSP teknolojilerinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilir kalkınmaya katkısı açısından önemli dersler sunmaktadır. Özellikle Kuzey Afrika'da, CSP projeleri güçlü siyasi irade, uluslararası finansman ve kamu-özel sektör ortaklıkları sayesinde başarılı bir şekilde hayata geçirilmiştir. Bu bağlamda, Fas'ın Ouarzazate kentinde kurulan Noor CSP kompleksi dikkat çekici bir örnek teşkil etmektedir. Toplamda 580 MW kurulu güce sahip olan kompleks, hem parabolik oluk hem de güneş kulesi teknolojilerini içermekte olup, 3 milyar ABD dolarını aşan uluslararası bir konsorsiyum tarafından finanse edilmiştir [8]. 2015-2018 yılları arasında kademeli olarak devreye alınan bu proje, CSP teknolojisinin büyük ölçekli uygulamalarında siyasi kararlılığın, finansal kaynak çeşitliliğinin ve çok paydaşlı iş birliklerinin belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Noor projesi; Dünya Bankası, Afrika Kalkınma Bankası ve

Avrupa Yatırım Bankası gibi önde gelen finans kuruluşlarının desteğiyle gerçekleştirilmiş ve bu sayede yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda yerel kapasite gelişimi bakımından da önemli kazanımlar sağlamıştır. Söz konusu santralin başlangıçta yabancı mühendisler tarafından işletildiğini, ancak zamanla işletme sorumluluğunun tamamen Faslı mühendis ve teknisyenlerden oluşan yerel bir ekibe devredildiğini rapor etmektedir. Bu durum, bilgi transferi ve teknik kapasite inşasının başarıyla sağlandığını göstermekte ve söz konusu projelerin Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile uyumlu çok boyutlu faydalar sunabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, büyük ölçekli yenilenebilir enerji yatırımlarının, yerel teknik yetkinliklerin gelişimine katkı sunarak, kendi temiz enerji sanayilerini kurmak isteyen ülkeler açısından stratejik bir fırsat sunduğu vurgulanmaktadır [2].

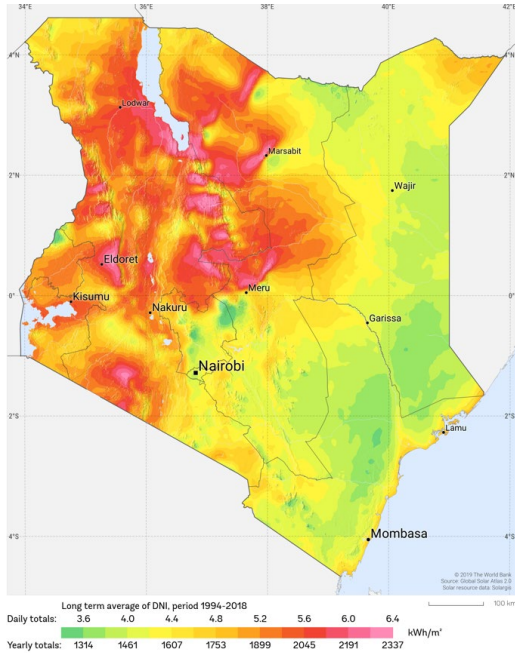
Benzer şekilde bölgede Yenilenebilir Enerji Bağımsız Elektrik Üreticisi Tedarik Programı (REIPPPP) aracılığıyla, bölgedeki ilk CSP santrallerinin inşasına olanak sağlanmıştır. Bu kapsamda hayata geçirilen Khi Solar One (güneş kulesi teknolojisi) ile KaXu ve Xina (parabolik oluk teknolojisi) santralleri, Güney Afrika'nın CSP alanındaki öncü uygulamaları arasında yer almaktadır [9]. Söz konusu projeler, yabancı yatırımları çekmeyi amaçlayan rekabetçi ihale süreçleriyle gerçekleştirilmiş ve projelere belirli oranlarda yerel içerik şartı getirilerek yerel istihdamın artırılması ve teknik becerilerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ancak, Güney Afrika'daki CSP projeleri uygulama aşamasında bazı zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. Özellikle beklenenden yüksek yatırım ve işletme maliyetleri ile operasyonel sorunlar, bu teknolojinin ekonomik sürdürülebilirliği açısından önemli engeller oluşturmuştur. Bu deneyim, sonraki ihale turlarında enerji depolama kapasitesinin daha hassas şekilde boyutlandırılmasını ve tarife yapılarının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Güney Afrika örneği, CSP projelerinde teknik ve mali planlamanın bütüncül şekilde ele alınmasının önemini vurgulamakta; aynı zamanda kamu politikaları, finansal çerçeveler ve yerel kapasite gelişiminin uyumlu bir şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şebeke ölçeğinde elektrik üretiminin ötesinde, CSP sistemlerinden PTC teknolojisi endüstriyel proses ısı uygulamaları açısından da kayda değer bir potansiyele sahiptir. Tarım, madencilik ve imalat gibi sektörlerdeki ısıya olan ihtiyaç, Afrika genelinde bu tür uygulamalara yönelik ilginin giderek artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, Kenya'nın çay endüstrisine yönelik olarak, çay kurutma süreçlerinde proses ısıyı sağlamak amacıyla parabolik oluk tipi bir güneş tarlası kullanımı hakkında çalışmalar yapılmıştır. Çay üretiminin yoğun olarak gerçekleştirildiği Kericho bölgesinde yapılan çalışmada, System Advisor Model (SAM) yazılımı aracılığıyla hibrit bir güneş-biyokütle sistem tasarımı optimize edilmiştir. Analiz sonucunda, güneş kat sayısı 1.8 olan ve 24 saatlik ısı depolama kapasitesine sahip bir konfigürasyonun, biyokütle yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği ortaya konmuştur. Çalışmada, güneş destekli sistemin seviyelendirilmiş ısı üretim maliyetinin yaklaşık 1.85 €/kWh düzeyinde olduğu ve bunun yalnızca biyokütleyle dayalı üretime kıyasla yaklaşık %25 oranında daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, güneş enerjisiyle desteklenen sistemin entegrasyonu sayesinde yıllık odun tüketiminin 16000 m<sup>3</sup>'ün üzerinde azaldığı ve yaklaşık 9817 ton CO<sub>2</sub> emisyonunun önlendiği hesaplanmıştır [10]. Bu örnek, parabolik oluk teknolojisinin sadece kamu ölçekli elektrik üretimiyle sınırlı kalmayıp, endüstriyel süreçlerde fosil yakıtlar ya da sürdürülebilir olmayan biyokütle kaynaklarının çevresel ve ekonomik açıdan daha avantajlı biçimde ikamesine olanak tanıdığını göstermektedir. Ayrıca, bu tür uygulamaların daha düşük yatırım maliyetleri gerektirmesi ve belirli sektörlerin özgül ihtiyaçlarına göre kolayca uyarlanabilir olması, CSP teknolojilerinin daha geniş ölçekte benimsenmesine yönelik ara bir aşama niteliği taşıyabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmalar göz önüne alındığında, CSP teknolojisinin yalnızca büyük ölçekli elektrik üretiminde değil, aynı zamanda sanayi süreçlerinde düşük karbonlu ısı ihtiyacının karşılanmasında da etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ancak bu teknolojinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği, büyük ölçüde bölgesel güneşlenme düzeyi, iklim koşulları ve sektörel enerji talepleri gibi coğrafi ve yapısal etkenlere bağlıdır. Bu bağlamda, Sahra Altı



kWh/m<sup>2</sup> düzeyine ulaşabilmekte; yaygın ve toplam ışınım değerleri de oldukça güçlü seyretmektedir. Bu koşullar, Etiyopya'yı CSP uygulamaları açısından son derece elverişli bir konuma getirmektedir. Nitekim, bu çalışmada ele alınan üç ülke arasında ortalama olarak en yüksek DNI seviyeleri Etiyopya'da gözlemlenmektedir. Ayrıca, ülkenin yüksek rakımı sayesinde elde edilen daha düşük ortam sıcaklıkları, güç çevrim verimini artırmakta ve güneş alıcı yüzeylerinde meydana gelen taşınım ısı kayıplarını azaltarak sistem performansına olumlu katkı sağlamaktadır. Etiyopya'nın güneş enerjisi potansiyeli, ülkenin yenilenebilir enerji kapasitesini artırma hedefleriyle de örtüşmektedir. Her ne kadar mevcut durumda elektrik üretimi büyük ölçüde hidroelektrik kaynaklara dayansa da, güneş enerjisi, ulusal enerji politikalarında geliştirilmesi öncelikli görülen kaynaklar arasında tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Kenya ortalama DNI değerleri [11].

Ekvator çizgisi üzerinde yer alan Kenya, yıl boyunca oldukça istikrarlı bir güneş ışınımı profiline sahiptir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, ülkenin kuzey bölgelerinde özellikle Sudan ve Etiyopya sınırına yakın kesimlerde DNI değerleri 6 kWh/m<sup>2</sup>/gün seviyesinin üzerine çıkmakta ve bu açıdan Etiyopya'daki en elverişli bölgelerle benzerlik göstermektedir. Buna karşın, Kenya'nın orta kesimleri ile kıyı şeridi, daha yoğun bulut örtüsü ve ekvatorial iklim koşullarının etkisiyle göreceli olarak daha düşük DNI değerlerine sahiptir; bu bölgelerde günlük ortalama DNI yaklaşık 4-5 kWh/m<sup>2</sup>

civarındadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Kenya'da günlük ortalama DNI düzeyleri konuma bağlı olarak 3.6-6.1 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişmekte, global yatay ışınım (GHI) ise yaklaşık 5-6.6 kWh/m<sup>2</sup>/gün seviyelerinde seyretmektedir. Kenya'nın sahip olduğu güçlü güneş kaynakları ile birlikte, elektrik üretiminde hâlihazırda yüksek oranda yenilenebilir enerji kullanımına sahip olması, ülkeyi Doğu Afrika'da CSP teknolojilerinin uygulanması açısından öne çıkan ülkelerden biri hâline getirmektedir. Nitekim ülke, yenilenebilir enerji altyapısını özellikle jeotermal, rüzgâr ve PV sistemler bağlamında hızla genişletmekte; CSP teknolojisini ise hem elektrik üretimi hem de endüstriyel proses ısı uygulamaları açısından değerlendirme yönündeki ilgisini açıkça ortaya koymaktadır. Her ne kadar Kenya'nın kuzeyindeki yüksek DNI bölgeleri büyük tüketim merkezlerinden uzak konumda olsa da, bu alanlarda daha küçük ölçekli CSP veya güneş termal sistemlerin endüstriyel kullanım için uygulanabilirliği söz konusu olabilmektedir. Öte yandan, daha büyük ölçekli CSP santralleri için ülkenin güneşlenme potansiyeli yüksek orta kesimleri daha uygun alanlar olarak öne çıkmaktadır.

Kenya, Nijerya ve Etiyopya gibi ekvatora yakın Afrika ülkeleri, yıl boyunca yüksek ve istikrarlı güneş ışınımı değerlerine sahip olmaları nedeniyle CSP teknolojilerinin uygulanabilirliği açısından dikkat çeken bölgeler arasında yer almaktadır. Bu ülkelerdeki güçlü güneş kaynakları, CSP sistemlerinin elektrik üretimi ve endüstriyel proses ısı uygulamaları için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilebilmesi, sistem performansının doğru tahmin edilmesi ve operasyonel verimliliğin artırılmasına bağlıdır. Son yıllarda bu amaçla, makine öğrenmesi (ML) tabanlı modelleme yaklaşımları CSP performans analizlerinde yoğun biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle yapay sinir ağları (ANN), destek vektör regresyonu (SVR), rastgele orman (RF) vb. gibi algoritmaların uygulandığı çalışmalar, CSP sistemlerinin enerji verimliliği ve termodinamik davranışlarının yüksek doğrulukla öngörülebileceğini ortaya koymaktadır. Gonzalez vd. [12], bir CSP buhar jeneratörünün performansını modellemek amacıyla destek SVR tabanlı bir makine öğrenmesi yaklaşımı geliştirmiştir. İspanya'daki ticari bir parabolik

oluk santralinden elde edilen verilerle eğitilen model, sınırlı sayıda girdiyle dahi yüksek doğrulukta güç üretimi tahminleri sağlamış ve farklı işletme modları arasındaki geçişleri başarıyla simüle etmiştir. Turja vd. [13], ANN ve genetik algoritma (GA) entegrasyonuna dayalı bir modelle CSP sistemlerine entegre edilmiş süperkritik CO<sub>2</sub> Brayton çevrimlerinin termodinamik performansını analiz etmiştir. Peer vd. [14], ise nanofluid teknolojileri ile Endüstri 4.0 yaklaşımları (yapay zekâ, makine öğrenmesi vb.) arasındaki uyumu, CSP sistemleri bağlamında incelenmiştir. Çalışma, ML tabanlı yaklaşımların CSP sistemlerinin izleme, arıza teşhisi ve performans tahmini süreçlerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir.

Bu bulgular, makine öğrenmesi tabanlı modelleme ve optimizasyon yaklaşımlarının, CSP sistemlerinin tasarım, kontrol ve performans değerlendirme süreçlerinde gelecekte kilit bir rol üstleneceğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, çalışmanın devam eden bölümleri Kenya, Nijerya ve Etiyopya'daki farklı çevresel koşullar altında parabolik oluklu bir CSP santralinin performansını karşılaştırmalı olarak analiz etmeye odaklanmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, bölgesel iklimsel farklılıkların makine öğrenmesi tabanlı modellerin tahmin doğruluğu, genellenebilirliğini ve sistem optimizasyonu üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemli bir bilimsel referans niteliği taşımaktadır.

**1.1. Literatür Boşluğu ve Yenilikçi Yaklaşım**  
Sahra Altı Afrika'da CSP teknolojileri üzerine yapılan akademik çalışmalar, genel olarak bölgesel güneşlenme potansiyelinin değerlendirilmesi ve temel fizibilite analizleriyle sınırlı kalmaktadır. Literatürdeki birçok çalışma, CSP sistemlerinin uygulanabilirliğini DNI verileri temelinde teknik potansiyel üzerinden analiz etmiş; ancak bu sistemlerin çevresel koşullarla etkileşimi, sistem dinamikleri ve saha bazlı performans farklılıklarını detaylı olarak inceleyen bütüncül yaklaşımlar ele alınmamıştır.

Ayrıca mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, geleneksel deterministik enerji denklemlerine

dayanan ısı analizlere odaklanmakta; değişken çevresel faktörlerin sistem performansı üzerindeki karmaşık ve doğrusal olmayan etkilerini yeterince modelleyememektedir. Bu durum, özellikle değişken iklim koşullarına sahip Sahra Altı Afrika gibi bölgelerde, klasik modellemelerin karar destek süreçleri için yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Literatürde CSP sistemlerine yönelik makine öğrenmesi temelli modelleme uygulamaları ise genellikle Avrupa ve Asya'daki ticari santrallere odaklanmakta olup, SSA gibi veri kıtlığı yaşanan bölgelerde bu tür çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, literatüre aşağıda sıralanan yenilikçi yönleriyle anlamlı katkılar sunmaktadır:

- **Karşılaştırmalı Saha Analizi:** Nijerya, Etiyopya ve Kenya özelinde, aynı teknik özelliklere sahip CSP sistemleri kullanılarak bölgesel iklim ve coğrafi koşulların performans üzerindeki etkileri izole biçimde analiz edilmiştir.
- **Makine Öğrenmesi Entegrasyonu:** Geleneksel ısı analizlere ek olarak KNN, Decision Tree, Lasso, Ridge ve ElasticNet gibi algoritmalarla kolektör çıkış sıcaklığı tahmin edilmiş; SSA ölçeğinde veri odaklı modelleme literatüre ilk kez kapsamlı biçimde entegre edilmiştir.
- **Sistem Boyutlandırması:** Kolektör sayısı, ısı kayıpları ve çıkış sıcaklıkları gibi parametreler ülke bazlı hesaplanarak uygulanabilir saha tasarımı geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma Sahra Altı Afrika'da parabolik oluklu CSP sistemlerinin performansını analiz etmekle kalmamış, aynı zamanda klasik modelleme tekniklerini yenilikçi makine öğrenmesi algoritmalarıyla entegre ederek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmuştur. Bu yaklaşım, enerji planlama süreçlerinde veri odaklı karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunmakta; aynı zamanda düşük ve orta gelirli ülkelerde CSP teknolojilerinin yaygınlaştırılması için uygulanabilir bir yöntem önermektedir.

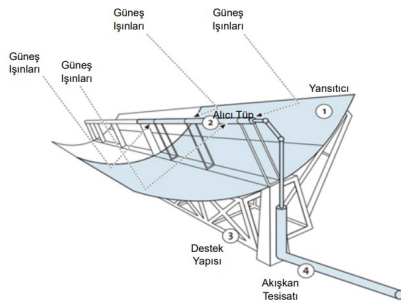
## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Isıl Hesaplar

Bu çalışma, seçilen üç ülke özelinde 100 MW kurulu güce sahip parabolik oluklu bir CSP santralının performansını simüle etmek amacıyla bir termodinamik model geliştirmektedir. Uygulanan metodoloji üç temel adımdan oluşmaktadır:

- Temsili bir parabolik oluk kolektör sisteminin teknik özelliklerinin ve ilgili sistem parametrelerinin tanımlanması
- Nijerya, Etiyopya ve Kenya'daki seçilen örnek sahalara ait iklim verilerinin temin edilerek modele entegre edilmesi
- Her bir koşul seti altında ısıl enerji üretimi, sistem kayıpları ve 100 MW'lık güç çıktısını elde edebilmek için gerekli kolektör sayısının hesaplanması

Çalışmadaki temel amaç, teknik tasarımın tüm örnek olaylar için sabit tutulması yoluyla, doğrudan normal ışınım (DNI) ve iklim koşullarındaki farklılıkların santral performansı üzerindeki etkilerini izole biçimde ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, üç farklı lokasyon için ortak bir parabolik oluk kolektör tasarımı belirlenmiştir. Geliştirilen bu santral modeli, modern ticari oluk teknolojisine dayanmaktadır ve tasarımı, literatürde yaygın olarak referans verilen EuroTrough veya LS-3 kolektör tiplerine benzer özellikler taşımaktadır. Temel sistem parametreleri ve varsayımlar Çizelge 1'de özetlenmiştir; bu değerler kısmen mevcut literatürden derlenmiş olup, büyük ölçekli CSP santralleri için tipik kabul edilen teknik özellikleri yansıtmaktadır. Ayrıca, Şekil 4'te parabolik oluk kolektör sisteminin temsili bir çizimi sunulmaktadır [15].



Şekil 4. PTC temel yapısal bileşenleri [15].

Termal analiz kapsamında, parabolik oluk kolektörün uzunluğu 60 metre, açıklık genişliği ise 4 metre olarak kabul edilmiştir. Kolektör boyutlarının belirlenmesinin ardından, sistemde meydana gelen ısı kayıplarının ve ilgili ısı transfer katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Bu kapsamda ilk adım olarak, cam kaplama yüzeyinde oluşan rüzgâr kaynaklı konvektif ısı transfer katsayısının ( $h_w$ ) belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu katsayının hesaplanabilmesi için öncelikle Reynolds sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Reynolds sayısı, Denklem (1)'de verilen ifade kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Re = \rho V D_g / \mu \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen  $\rho$ , hava öz kütlesini,  $D_g$ , boru çapını,  $V$ , havanın hızını,  $\mu$  ise havanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Bu değişkenleri bulabilmemiz için ortalama sıcaklığa ihtiyacımız vardır. Ortalama hava sıcaklığı ise Denklem (2)'de verilmiştir.

$$Ort. Sıcaklık = 1/2(T_g + T_a) \quad (2)$$

Yukarıdaki formülde  $T_g$ , cam kaplama sıcaklığını ifade etmekte ve bu değer tahmini bir ifade atanarak deneme yanılma ile hesaplanmaktadır. Reynolds sayısı temel alınarak Nusselt sayısı bulunur. Nusselt sayısını için iki farklı koşul ve hesaplama yöntemi vardır. Eğer Reynolds sayısı,  $0.1 < Re < 1000$  aralığında ise;

$$Nu = 0.4 + 0.54(Re^{0.52}) \quad (3)$$

$1000 < Re < 50000$  aralığında ise;

$$Nu = 0.3(Re^{0.6}) \quad (4)$$

Nusselt sayısı bulunduktan sonra  $h_w$ , rüzgâr ısı transfer katsayısını Denklem (5) ile hesaplanabilir.

$$h_w = Nu * k / D_g \quad (5)$$

Denklem (5)'te verilen  $k$ , havanın ortalama ısı iletkenlik katsayısı olarak ifade edilebilir. Sonraki cam kaplama ile ortam arasındaki radyasyon ısı iletim katsayısını ( $h_{r,c-a}$ ) hesaplamak gerekmektedir.

$$h_{r,c-a} = \epsilon_g \sigma (T_g + T_a) * (T_g^2 + T_a^2) \quad (6)$$

Denklem (6)'da verilen  $\varepsilon_g$ , cam kaplamanın emicilik katsayısını,  $\sigma$ , Stefan Boltzman sabitini,  $T_g$  ve  $T_a$  ise cam ve ortam sıcaklıklarının Kelvin cinsinden ifade eden değişkenlerdir. Denklem (7)'de ise alıcı tüp ile cam kaplama arasındaki ışıyım ısı transfer katsayısını veren formül gösterilmiştir.

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{(1/\varepsilon_r) + (A_r/A_g)((1/\varepsilon_g) - 1)} \quad (7)$$

Denklem (7)'de verilen  $T_r$ , alıcı tüp sıcaklığını  $\varepsilon_r$ , alıcı emicilik katsayısını ifade etmektedir. Yukarıdaki formüller yardımıyla ısı transfer katsayıları bulunmuştur. Bunlardan yararlanılarak Denklem (8) ile alıcı alanı temel alınarak ortalama kolektör ısı transfer katsayısı bulunur.

$$U_L = \left( \frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_g} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right) \quad (8)$$

Denklem (8)'de elde edilen  $U_L$  değeri ile tahmini  $T_g$  değeri bulunup sağlanması yapılabilmektedir. Bu ise Denklem (9)'da verilen eşitlik ile gerçekleştirilmektedir.

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_g (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_g (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (9)$$

Kolektör verim faktörünün ( $F'$ ) hesabı ise Denklem (10)'da verilmiştir.

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left( \frac{D_o \ln \frac{D_o}{D_i}}{2k} \right)} \quad (10)$$

Bu denklemden yararlanılarak Denklem (11)'de ısı değişim faktörü hesaplanmaktadır.

$$F_R = \frac{m c_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{U_L F' A_r}{m c_p} \right) \right] \quad (11)$$

Denklem (11)'de verilen  $c_p$ , suyun özgül ısısını,  $m$  ise kütleli debiyi ifade etmekte ve Denklem (12)'de verilen denklemden bulunmaktadır. Bu parametreler dikkate alınarak güneş sisteminden elde edilen kullanılabilir radyasyon sonucundaki enerji ise Denklem (13) ile hesaplanmaktadır.

$$m = V \left( \frac{\pi D_i^2}{4} \right) \rho \quad (12)$$

Denklem (12)'de verilen  $V$ , su akış hızını,  $\rho$  ise suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$Q_u = F_R [S A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (13)$$

Denklem (13)'te verilen  $S$ , ışıyım değerini,  $T_i$  ise su giriş sıcaklık değerini ifade etmektedir. Son olarak akışkanın çıkış sıcaklığı ise Denklem (14) ile hesaplanmaktadır.

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{m c_p} \quad (14)$$

**Çizelge 1. PTC Tasarım Parametreleri.**

Parametre	Değer	Birim
PTC Uzunluk	60	m
PTC En	4	m
Kaplama Emicilik	0.89	-
Alıcı Emicilik	0.95	-
Alıcı Dış Çap	0.052	m
Alıcı İç Çap	0.043	m
Alıcı Kaplama Çap	0.09	m
Akışkan Giriş Sıc.	155	°C

Geliştirilen bu yöntem, kolektör sistemine ait temel parametrelerin belirlenmesini, seçilen sahalara ilişkin Dünya Bankası Küresel Güneş Atlası verilerinden elde edilen direkt normal ışıyım ve diğer iklimsel verilerin modele entegre edilmesini, ayrıca enerji denge denklemleri ile ampirik ısı kaybı korelasyonlarının uygulanmasını içermektedir. Bu kapsamda, tasarım ve işletme stratejisi tüm örnek olaylar için sabit tutulmuş ve böylece sistem performansındaki farklılıkların yalnızca çevresel koşullardan kaynaklanması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, coğrafi değişkenliğin CSP teknolojisinin uygulanabilirliği üzerindeki etkisini izole biçimde değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Uygulanan yöntem, üç ülke arasında teknik performans açısından karşılaştırmalı bir analiz yapmak için yeterli bir temel sunmakta olup, bulgular bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

## 2.2. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, bilgisayarların açıkça programlanmadan deneyimlerden öğrenmesini ve gelecekteki kararları bu öğrenim doğrultusunda almasını mümkün kılan bir yapay zekâ alanıdır. Günümüzde, büyük veri ve hesaplama gücündeki artış sayesinde, makine öğrenmesi çok çeşitli endüstrilerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Sağlıktan finansa, üretimden güvenliğe kadar birçok sektörde bu teknolojinin dönüştürücü etkileri gözlemlenmektedir. Özellikle üretim teknolojilerinde, makine öğrenmesi

algoritmalarının kullanımı kalite kontrol, tahminleme ve optimizasyon süreçlerinde büyük fayda sağlamaktadır. Bu bağlamda makine öğrenmesinin sadece dijital veri analizi değil, aynı zamanda fiziksel üretim süreçlerinde de ne kadar etkili bir araç olduğunu literatürde yapılan çalışmalar göstermektedir [16-17].

Bu çalışmada kullanılan veri seti, güneş enerjisine dayalı bir ısıtma sisteminde yer alan parabolik oluk kolektörüne ait demo deneylerden elde edilen gerçek zamanlı ölçüm verilerini içermektedir. Veriler, sistemin çalışma süresi boyunca çeşitli çevresel ve sistem parametrelerinin izlenmesiyle elde edilmiştir. Veri setinde direkt radyasyon, ortam sıcaklığı, su giriş ve çıkış sıcaklıkları, rüzgâr hızı gibi temel çevresel değişkenler yer almaktadır. Veri seti, toplam 5 özellik (kolon) ve 6482 gözlem (satur) içermektedir. Bu yapı, hem istatistiksel analizler hem de makine öğrenmesi temelli modellemeler için yeterli büyüklükte bir örneklem sunmaktadır. Özellikle çevresel faktörlerin sistem performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde bu denli geniş bir veri havuzu, modellerin genellenebilirliğini artırmak açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Çalışmada, parabolik oluk kolektör sisteminden elde edilen verilerle, akışkan çıkış sıcaklık tahmini amacıyla çeşitli regresyon algoritmaları uygulanmıştır. Seçilen modeller, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan veri yapılarıyla uyumlu çalışabilen, literatürde sıkça kullanılan güvenilir yöntemlerdir. İlk olarak uygulanan K-En Yakın Komşu (KNN) Regresyonu, parametrik olmayan bir yöntem olarak veri noktalarının komşuluk ilişkilerini dikkate alarak tahminleme yapmaktadır. Bu özelliği sayesinde, özellikle karmaşık fiziksel sistemlerdeki yerel örüntüleri başarıyla yakalayabilmekte ve ani değişimlere karşı duyarlılık sunmaktadır [18]. Bir diğer önemli model olan Karar Ağacı Regresyonu, veriyi belirli eşik değerlerine göre dallara ayırarak çalışır ve doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde etkili bir araçtır. Düzenleştirme temelli regresyon teknikleri arasında yer alan Ridge, Lasso ve ElasticNet modelleri ise doğrusal yapılar üzerinden genellenebilir ve sade çözümler üretmeyi amaçlar. Ridge regresyon, regresyon katsayılarına L2 norm cezası uygulayarak çoklu doğrusal bağlantı problemini azaltır. Lasso

regresyon ise L1 cezası sayesinde hem modelin karmaşıklığını düşürür hem de değişken seçimi gerçekleştirir. Bu iki yaklaşımın bileşimi olan ElasticNet, özellikle çok sayıda açıklayıcı değişkenin bulunduğu durumlarda hem kararlılık hem de açıklayıcılık açısından güçlü performanslar sunmaktadır [19-21]. Son olarak kullanılan çoklu doğrusal regresyon, bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan klasik bir modeldir.

Regresyon modellerinin başarı düzeyini değerlendirmek için çeşitli hata metrikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, model performanslarını karşılaştırmak amacıyla en yaygın üç regresyon değerlendirme ölçütü olan aşağıdaki kıstaslar kullanılmıştır.

- Ortalama Mutlak Hata (MAE)
- Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)
- Determinasyon Katsayısı (R<sup>2</sup>)

MAE (Mean Absolute Error), tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların mutlak ortalamasını verir. Yorumlanması kolaydır ve her bir tahminin ortalama ne kadar sapma gösterdiğini belirtir. Düşük MAE değeri, modelin genel doğruluğunun yüksek olduğunu gösterir. MAE metrik formülü Denklem (15)'te verilmiştir [22].

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |Z_j - \hat{Z}_j|} \quad (15)$$

RMSE (Root Mean Square Error), tahmin hatalarının karesinin ortalamasının karekökünü alarak elde edilir. Büyük hatalara karşı daha hassastır, bu nedenle yüksek varyanslı veri setlerinde önemli bir ölçüttür. MAE'ye kıyasla daha cezalandırıcıdır ve modelin büyük sapmalara karşı duyarlılığını ortaya koyar. RMSE metrik formülü Denklem (16)'da verilmiştir [22-23].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Z_j - \hat{Z}_j)^2} \quad (16)$$

R<sup>2</sup>, modelin bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarını açıkladığını gösteren istatistiksel bir ölçüdür. 0 ile 1 arasında değişir ve 1'e yakın değerler modelin yüksek açıklayıcılığa sahip olduğunu gösterir. Bu değer, modelin genel uyum düzeyini anlamada

temel bir göstergedir.  $R^2$  metrik formülü Denklem (17)'de verilmiştir [24].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Z_j - \hat{Z}_j)^2}{\sum_{j=1}^n (Z_j - \bar{Z}_j)^2} \quad (17)$$

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Geliştirilen metot ile Nijerya, Etiyopya ve Kenya'da kurulması öngörülen 100 MW kapasiteli parabolik oluklu bir CSP santrali için

performans çıktıları elde edilmiştir. Çizelge 2, her ülkeye ait senaryo kapsamında hesaplanan ara ısıl parametreleri ve hedeflenen 100 MW güce ulaşmak için gereken kolektör sayısını içerecek şekilde temel sonuçları özetlemektedir. Sunulan tüm veriler, tasarım noktası koşulları altında yüksek güneş ışınımı seviyelerinde elde edilen performans değerlerine dayanmaktadır.

**Çizelge 2.** Ülkelere göre parabolik oluk kolektörü (PTC) performans parametreleri.

Parametre	Nijerya	Etiyopya	Kenya	Birim
Reynolds	22028	18841	21090	-
Nusselt	121	110	118	-
Rüzgâr Kayıp	36.57	33.3	35.64	W/m <sup>2</sup> -K
Isı İletim Katsayısı (Ortam-Kaplama)	6.45	6.34	6.4	W/m <sup>2</sup> -K
Isı İletim Katsayısı (Alıcı-Kaplama)	14.79	14.65	14.64	W/m <sup>2</sup> -K
Ortalama Kolektör Isı Kayıp Katsayısı	11.94	11.75	11.89	W/m <sup>2</sup> -K
Kolektör Verim Faktörü	0.957	0.958	0.957	-
Isı Taşınım Faktörü	0.93	0.933	0.932	-
Absorbe Güneş Radyasyon Enerji Değeri	82.3	129.88	119.78	kW
Akışkan Çıkış Sıcaklığı	189.35	209.21	204.99	°C
Kolektör Adeti	2430	1606	1669	-

Analiz sonuçları, incelenen üç ülke özelinde parabolik oluklu CSP santral performansında belirgin farklılıklara işaret etmektedir. Alıcı borular içerisindeki Reynolds sayıları tüm senaryolarda benzer düzeylerde hesaplanmış olup, akışın açık şekilde türbülanslı rejimde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu duruma paralel olarak, Nusselt sayıları da 110-121 aralığında bulunmuş ve taşınım yoluyla ısı transferinin etkili olduğu doğrulanmıştır. Rüzgâr kaynaklı taşınım ısı kaybı katsayısı, varsayılan tipik rüzgâr koşulları doğrultusunda Nijerya'da en yüksek değere (36.57 W/m<sup>2</sup>·K), Etiyopya'da ise en düşük değere (33.30 W/m<sup>2</sup>·K) ulaşmıştır. Toplam ısı kaybı katsayısı, ülkeler arasında %1-2 düzeyinde küçük farklılıklar göstermektedir; Etiyopya'da bu değer 11.75 W/m<sup>2</sup>·K ile en düşük seviyededir. Bu farklar mutlak olarak sınırlı görünse de, büyük alanlara ölçeklendiğinde toplam sistem kayıpları üzerinde anlamlı etkiler oluşturabilmektedir. Kolektör verim faktörü ( $F'$ ) ve ısı uzaklaştırma faktörü ( $F_R$ ), tüm ülkelerde yüksek düzeyde bulunmuş olup sırasıyla yaklaşık 0.957, 0.958 ve 0.93 aralığında gerçekleşmiştir. En çarpıcı fark ise, kolektör başına absorbe edilen ısıl güç miktarında gözlenmiştir: Etiyopya'da her kolektör çevriminde 129.88 kW, Kenya'da 119.78 kW, Nijerya'da ise yalnızca 82.30 kW

ısıl enerji soğurulmuştur. Bu farklılıklar, sırasıyla kolektör çıkış sıcaklıklarına da yansımış; Etiyopya için 209.21 °C, Kenya için 204.99 °C ve Nijerya için 189.35 °C olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, hedeflenen 100 MW ısıl güce ulaşmak için gerekli kolektör sayısı Etiyopya'da 1606, Kenya'da 1669 ve Nijerya'da 2430 olarak belirlenmiştir. Bu veriler, Nijerya'da yaklaşık %50 daha fazla alan ve dolayısıyla daha yüksek yatırım ihtiyacı doğurduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık Kenya, Etiyopya'ya kıyasla yalnızca %4 daha az elverişli bir performans sergilemiştir. Elde edilen bulgular, Etiyopya'nın sahip olduğu yüksek DNI seviyeleri ve uygun iklim koşulları sayesinde, üç ülke arasında parabolik oluklu CSP kurulumu için en avantajlı bölge olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.

Geleneksel ısıl analizler, parabolik oluk kolektör sistemlerinin enerji performansını değerlendirmede temel bir araç olarak kullanılmaktadır. Sistemin verimliliği, enerji dengesi ve ısı transferi karakteristikleri bu yöntemlerle belirlenmektedir. Ancak bu analizler çoğunlukla deterministik varsayımlar çerçevesinde yürütülmekte ve değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri tam olarak yansıtamama riski taşımaktadır. Bu nedenle, çalışmada ısıl analizlerin yanı sıra makine

öğrenmesi tabanlı regresyon analizleri de uygulanarak, sistem davranışının istatistiksel modeller aracılığıyla öğrenilmesi ve öngörülebilmesi amaçlanmıştır.

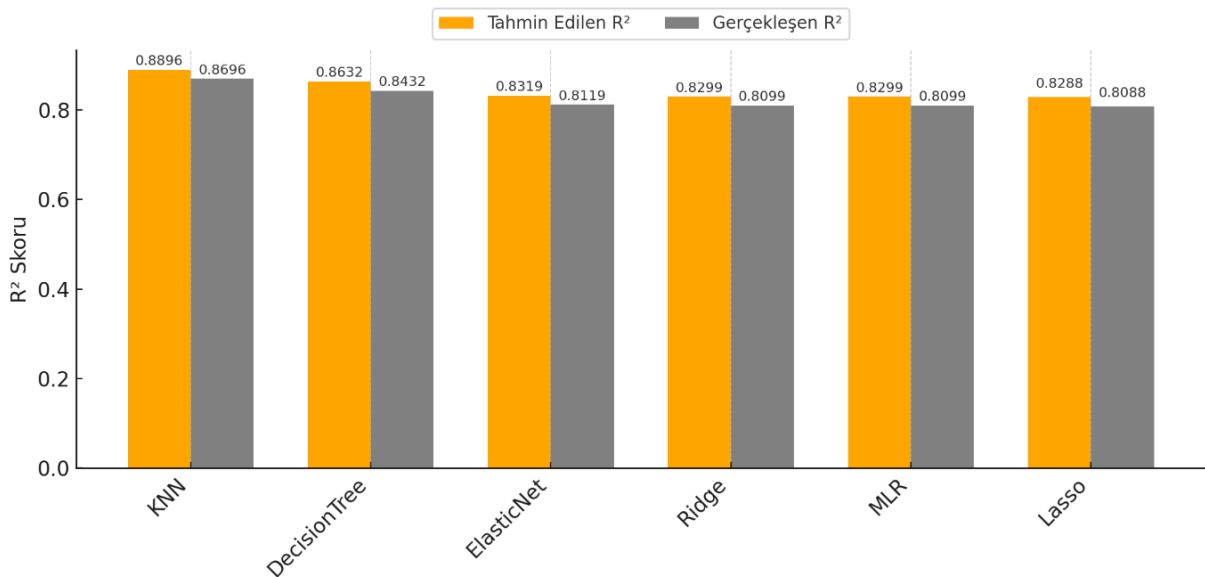
Regresyon modelleri, ölçülen çok sayıda çevresel ve operasyonel değişken arasındaki nedensel ve doğrusal/doğrusal olmayan ilişkileri tanımlayabilme kapasitesi sayesinde ısıl analizlere tamamlayıcı bir nitelik kazandırmaktadır. Böylece sadece teorik yaklaşımlarla değil, aynı zamanda veriye dayalı istatistiksel yöntemlerle de sistemin performansı tahmin edilebilmekte; bu da modelin hem doğruluğunu hem de uygulama alanındaki geçerliliğini artırmaktadır. Çizelge 3'te gerçekleştirilen regresyon analizlerine ait performans metrikleri verilmiştir.

**Çizelge 3. Regresyon model sonuç karşılaştırılması.**

Makine Öğrenme Algoritması	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE
KNN	0.8896	1.52	2.61
DecisionTree	0.8632	1.4	2.9
ElasticNet	0.8319	2.34	3.22
Ridge	0.8299	2.3	3.24
MLR	0.8299	2.3	3.24
Lasso	0.8288	2.32	3.25

Makine öğrenmesi algoritmalarına dayalı regresyon analizleri, parabolik oluk kolektör sistemlerinin çıkış sıcaklığının başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir. Çizelge 3'e göre, en yüksek doğruluk K-En

Yakın Komşu (KNN) algoritmasıyla elde edilmiş (R<sup>2</sup>=0.8896), bunu Karar Ağacı (DecisionTree) modeli takip etmiştir (R<sup>2</sup>=0.8632). Özellikle DecisionTree modelinin en düşük ortalama mutlak hata (MAE=1.40) değerine sahip olması, bu modelin tutarlı tahmin yeteneğini ortaya koymaktadır. Lineer ve düzenlemeli regresyon yöntemleri olan Ridge, Lasso, ElasticNet ve Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR), birbirine yakın ancak daha düşük R<sup>2</sup> ve daha yüksek hata değerleriyle, doğrusal olmayan yapıları modellemede sınırlı kalmıştır. Buna karşılık, KNN ve Karar Ağacı gibi örüntü tabanlı algoritmalar, kolektör sisteminin karmaşık ilişkilerini daha etkili şekilde yansıtmıştır. Şekil 5, çeşitli regresyon modellerine ait tahmin edilen ve gerçekleşen R<sup>2</sup> değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. En yüksek performans, hem eğitim hem de doğrulama verileri üzerinde yüksek skorlar elde eden K-En Yakın Komşu (KNN) modeliyle elde edilmiştir. DecisionTree algoritması da benzer şekilde güçlü bir genelleme başarısı sergilemiştir. Buna karşılık, ElasticNet, Ridge, MLR ve Lasso gibi doğrusal modeller daha düşük ancak birbirine yakın performans göstermiştir. Bu durum, doğrusal yaklaşımların sınırlı örüntü tanıma kapasitesine sahip olduğunu, buna karşın KNN ve ağaç tabanlı yöntemlerin PTC sisteminin karmaşık yapısını daha iyi modelleyebildiğini göstermektedir.



**Şekil 5. R<sup>2</sup> Değerinin farklı regresyon modellerine ait tahmini ve gerçek değer karşılaştırması.**

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, Sahra Altı Afrika koşullarında parabolik oluklu güneş enerjisi sistemlerinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bölgenin yüksek güneşlenme potansiyeline sahip olması nedeniyle bu teknolojinin enerji arz güvenliğine katkı sunabileceğini göstermektedir. Ancak bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi için bazı temel zorlukların aşılması gerekmektedir. Her şeyden önce, yapılan modelleme sonuçları, benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir. Nijerya'da gerçekleştirilen 25 MW kapasiteli bir santral için yapılan fizibilite analizinde kapasite faktörünün %35'in üzerinde olduğu raporlanmış, ancak seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyetinin (LCOE) mevcut sübvansede edilmiş şebeke tarifesine kıyasla yaklaşık %99 daha yüksek olduğu belirlenmiştir [25]. Bu durum, ekonomik sürdürülebilirlik açısından sistemlerin ancak uygun teşvik mekanizmalarıyla birlikte uygulanabilir olacağını göstermektedir. Cezayir'de yapılan çalışmalarda parabolik oluklu sistemlerin özellikle güney bölgelerde, termal enerji depolama (TES) ve yedek enerji kaynaklarıyla entegre edildiğinde yüksek verimlilikle çalışabileceği ortaya konmuştur [26]. Bu bulgu, çalışmamızda öngörülen konum seçiminin ve depolama sisteminin önemini destekler niteliktedir.

Çalışmada yalnızca parabolik oluklu CSP sisteminin uygulanabilirliği ele alınmış olmasına rağmen, elde edilen bulgular bu sistemin tek başına bile Sahra Altı Afrika koşullarında enerji arz güvenliği için teknik ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir. Literatürde ise PV, CSP ve batarya depolama sistemlerinin hibrit kombinasyonları önerilmektedir. Aguilar-Jiménez vd. [27], izole mikroşebekelerde PV-CSP entegrasyonunun maliyetleri %26 azalttığını belirtmiştir. Ding vd. [28] ise batarya entegrasyonunun sistem güvenilirliğine katkı sağladığını ortaya koymuştur. Ancak bu sistemler daha karmaşık altyapı ve maliyet gerektirirken, çalışma yalnızca CSP kullanarak daha düşük ilk yatırım, daha basit bakım süreçleri ve daha kolay bölgesel entegrasyon gibi avantajlar sunmaktadır. Bu yönüyle yapılan çalışma, kırsal alanlarda hızlı, uygulanabilir ve sürdürülebilir çözümler geliştirmek açısından

literatürdeki hibrit modellere kıyasla yalın ama etkili bir alternatif sunmaktadır.

Fas'ta yer alan Noor 1 santraline yönelik yapılan kapsamlı simülasyon çalışmaları, parabolik oluklu CSP tesislerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olduğunu, ancak uzun vadede enerji üretimine önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Noor 1 örneğinde 160 MW kapasiteye sahip sistemin kurulum maliyeti 7 milyon MAD civarındadır ve elektrik üretim maliyeti 1.62 MAD/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu durum, CSP teknolojisinin başlangıç yatırımında finansal destek ihtiyacını ortaya koymakta; ancak uzun vadeli performans ve enerji arz güvenliği açısından olumlu etkiler sağladığını göstermektedir. Ayrıca, kurak ve yarı kurak bölgelerde su kıtlığı nedeniyle kuru soğutmalı sistemlerin kullanılması, hem su tüketimini azaltmakta hem de verimliliği artırmaktadır [29]. Bu bulgular, çalışmamızda incelenen bölgenin su kaynakları açısından sınırlı olması nedeniyle stratejik sistem konfigürasyonlarının önemini desteklemektedir.

Bu çalışmada, parabolik oluklu kolektör sisteminin çıkış sıcaklığını tahmin etmek amacıyla kullanılan regresyon modelleri arasında K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması,  $R^2=0.8896$  değeriyle en yüksek doğruluk oranını sağlamıştır. DecisionTree algoritması da benzer biçimde yüksek performans göstererek  $R^2=0.8632$ 'ye ulaşmıştır. Bu sonuçlar örüntü tabanlı yöntemlerin PTC sisteminin karmaşık ve doğrusal olmayan yapısını daha etkili biçimde modelleyebildiğini göstermektedir. Literatüre baktığımızda bu konu ile ilgili Suwa [30], doğrudan buhar üretimi kullanan sistemlerde ısı depolama performansını tahmin etmek için Gaussian Süreç Regresyonu (GPR) modelini uygulamış ve 14 günlük türbin çıkış tahminlerinde %1.45'in altında hata oranı elde etmiştir. Bu elde edilen sonuçlar makine öğrenmesi modellerinin zaman alan sayısal simülasyonlara kıyasla ciddi bir hesaplama avantajı sunduğunu göstermektedir. Kottala vd. [31], PCM (faz değişimli malzeme) entegreli parabolik oluk sistemlerinde GPR modelinin termal verim tahmininde  $R^2 = 0.9977$  ve  $RMSE=0.0049$  ile en iyi sonuçları verdiğini raporlamıştır. Alhamayani [32] ise ANN modeliyle ortalama termal verim tahmininde %99.99 gibi olağanüstü bir  $R^2$  değeri rapor

ederek, yapay sinir ağlarının da bu alanda oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar, CSP sistemleri özelinde farklı ML algoritmalarının karşılaştırmalı olarak test edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada kullanılan regresyon algoritmaları da benzer doğruluk düzeylerine ulaşarak literatürle uyumlu sonuçlar sunmuş, bu da modellerimizin geçerliliğini desteklemiştir.

#### 4.1. Çalışmanın Genişleme Potansiyeli

Bu çalışma, Sahra Altı Afrika bölgesinde parabolik oluk kolektörlerinin performansının hem fiziksel modeller hem de makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerle değerlendirilmesi açısından önemli bir temel sunmaktadır. Elde edilen sonuçların, farklı iklim kuşakları ve coğrafi koşulları kapsayacak şekilde genişletilmesi mümkün olup, bölgesel enerji planlaması açısından daha bütüncül analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır. Kullanılan regresyon temelli modellerin, ileri düzey derin öğrenme algoritmaları ile güçlendirilmesi ve gerçek zamanlı veri akışlarıyla entegre edilmesi halinde, öngörü doğruluğunun artırılması hedeflenebilir. Ayrıca, mevcut sistemin diğer yoğunlaştırıcı güneş teknolojileriyle karşılaştırmalı olarak incelenmesi, teknolojik tercihlerin daha sağlıklı yapılmasını sağlayacaktır. Bununla birlikte, teknik bulguların sosyoekonomik parametrelerle bütünleştirilmesi halinde çalışmanın çok disiplinli sürdürülebilir enerji politikalarına katkı sunacak biçimde genişletilmesi mümkündür.

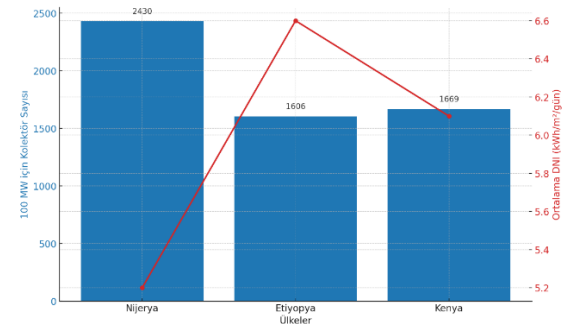
#### 5. SONUÇ

Bu çalışma, Sahra Altı Afrika'da güneş enerjisinin etkin kullanımına yönelik olarak parabolik oluk kolektörlerinin potansiyelini değerlendirmekte ve bu sistemlerin bölgesel enerji ihtiyacına katkısını hem teorik hem de uygulamalı bir düzlemde ortaya koymaktadır. Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve kolektör giriş suyu sıcaklığı gibi çevresel ve operasyonel parametrelerin, çıkış sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel veriler aracılığıyla analiz edilmiş ve buna ek olarak regresyon tabanlı makine öğrenmesi modelleri ile ısıl davranışların tahmin performansı karşılaştırılmıştır. Regresyon modellerinin kullanılmasının temel nedeni, klasik ısıl analiz yöntemlerinin fiziksel denklemler üzerinden kurulan deterministik modellere dayanması ve bu yapıların, özellikle dış çevre koşullarının ani

değişimleri ve sistem içi karmaşık etkileşimler karşısında sınırlı kalabilmesidir. Bu bağlamda makine öğrenmesi regresyon algoritmaları çok değişkenli, doğrusal olmayan ve gürültülü veri yapıları altında dahi etkin tahmin yapabilme kapasiteleriyle öne çıkmaktadır.

Makine öğrenmesi temelli modellerden elde edilen sonuçlar, enerji denklemleriyle yapılan ısıl hesaplamaların ötesinde bir performans sunmaktadır. Kolektör çıkış sıcaklığı gibi performans göstergelerinin, yalnızca enerji denklemleriyle değil, aynı zamanda veri temelli modellerle de güvenilir biçimde öngörülebileceğini göstermiştir.

Sahra Altı Afrika'da sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik artan arayış bağlamında, parabolik oluklu kolektörlere dayalı yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santralleri, özellikle yüksek direkt güneş ışınımına sahip ülkelerde kayda değer bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışma Nijerya, Etiyopya ve Kenya için kavramsal olarak tasarlanmış 100 MW kapasiteli bir parabolik oluklu CSP santralinin performansını karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve farklı coğrafi ile iklimsel koşulların teknik çıktılar üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymuştur. Ülkeler arası sistem verimliliği karşılaştırması Şekil 6'da görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 6. Ülkeler arası verimlilik karşılaştırılması.

Şekil 6'da üç ülke için 100 MW'lık bir parabolik oluklu CSP santralinin hedeflenen güce ulaşması için gereken kolektör sayılarıyla bu ülkelerin ortalama DNI değerleri birlikte sunulmaktadır. Grafikte açıkça görüldüğü üzere Etiyopya, yüksek güneş ışınımı seviyeleri sayesinde aynı kapasiteye en az kolektörle ulaşırken, Kenya daha sınırlı bir farkla onu takip etmektedir. Güneşlenme potansiyeli görece düşük olan Nijerya'da ise kolektör ihtiyacı belirgin biçimde artmakta ve bu durum ülkenin

teknik ve ekonomik açıdan dezavantajlı konumda olduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmeler ışığında çalışmanın temel bulguları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Etiyopya’da yüksek DNI ve düşük ısı kayıpları sayesinde yalnızca 1606 kolektör yeterli olurken, Kenya 1669, Nijerya ise 2430 kolektöre ihtiyaç duymuştur.
- Kolektör sayısındaki bu farklılıklar, doğrudan arazi gereksinimi ve yatırım maliyetlerine yansımakta ve yüksek güneş kaynağına sahip bölgelerde birim enerji maliyetinin belirgin şekilde düşebildiğini göstermektedir.
- CSP’nin uygulanabilirliği teknik olarak mümkün olsa da ekonomik başarı büyük ölçüde düşük faizli finansman ve destekleyici politika ortamına bağlıdır.
- Makine öğrenmesi analizlerinde KNN modeli  $R^2=0.8896$  ile en yüksek doğruluğa ulaşmış, DecisionTree modeli ise en düşük hata değerleriyle güçlü bir tahmin performansı sergilemiştir.
- Ridge, Lasso, ElasticNet ve MLR gibi lineer modeller daha tutarlı ancak daha düşük doğruluk düzeyi göstermiş; bu durum sistem davranışının doğrusal olmayan karakterini yansıtmaktadır.
- Regresyon modelleri genel olarak kolektör çıkış sıcaklığının yalnızca fiziksel denklemlerle değil, veri odaklı yöntemlerle de güvenilir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, Sahra Altı Afrika’nın yüksek ve istikrarlı güneş potansiyeli, parabolik oluk teknolojisinin bölgesel enerji arzını güçlendirecek biçimde etkin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, özellikle yüksek DNI seviyelerine sahip bölgelerde CSP sistemlerinin hem teknik açıdan rekabetçi hem de uzun vadeli enerji güvenliği açısından stratejik bir seçenek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu potansiyelin gerçek projelere dönüşebilmesi yalnızca ısıl performansın yüksek olmasına değil, aynı zamanda uygun finansman koşullarının sağlanmasına, yatırım risklerini azaltan politikaların geliştirilmesine ve yerel teknik kapasitenin güçlendirilmesine bağlıdır. Termal depolama entegrasyonu ile CSP

sistemlerinin şebeke esnekliğini artırabilmesi, kesintili üretim sorunlarını azaltarak bölgenin artan enerji talebi için sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Dolayısıyla, bölgesel ve uluslararası ölçekte oluşturulacak destekleyici politika çerçeveleri, yenilikçi finansman modelleri ve kapasite geliştirme programları ile birleştiğinde, CSP teknolojisi Sahra Altı Afrika’nın temiz enerji dönüşümünde yalnızca teknik olarak uygulanabilir bir seçenek değil, aynı zamanda ekonomik kalkınmayı ve enerji güvenliğini destekleyen güçlü bir araç hâline gelebilecektir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde gerekli imkânların sağlanması konusunda verdikleri destekten dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi’ne (YEKARUM) teşekkür ederiz. Ayrıca, Yükseköğretim Kurulu 100/2000 Doktora Burs Programı (Akıllı Enerji Sistemleri) kapsamında sağlanan destek için bursiyer olarak teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bu araştırma makalesine sağladıkları katkılar nedeniyle Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne, 2022-D1-0176 numaralı proje desteği kapsamında teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

1. Ambrose, J., “Fossil fuel use reaches global record despite clean energy growth”, <https://www.theguardian.com/environment/article/2024/jun/20/fossil-fuel-use-reaches-global-record-despite-clean-energy-growth> , July 25, 2025.
2. Tesfaye, M., “The hub goes to the sun insights from to our visit to world’s largest CSP project”, <https://energyforgrowth.org/article/the-hub-goes-to-the-sun/> , April 2, 2025.
3. Rapid Transition Alliance, “Doing development differently: How Kenya is rapidly emerging as Africa’s renewable energy superpower”, <https://rapidtransition.org/stories/doing-development-differently-how-kenya-is-rapidly-emerging-as-africas-renewable-energy-superpower/> , August 01, 2025.
4. Ogunmodimu, O.O., “CSP technology and its potential contribution to electricity supply in northern Nigeria”, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3, Issue 3, Pages 529-537, 2013.

5. Aly, A., Bernardos, A., Fernandez-Peruchena, C.M., Jensen, S.S., Pedersen, A.B., "Is concentrated solar power (CSP) a feasible option for sub-Saharan Africa?: Investigating the techno-economic feasibility of CSP in Tanzania", *Renewable Energy*, Vol. 135, Pages 1224-1240, 2019.
6. National Renewable Energy Laboratory, "Solar energy basics", <https://www.nrel.gov/research/re-solar>, June 21, 2025.
7. Okeke, C.J., Egberibine, P.K., Edet, J.U., Wilson, J., Blanchard, R.E., "Comparative assessment of concentrated solar power and photovoltaic for power generation and green hydrogen potential in West Africa: A case study on Nigeria", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 215, Pages 1-30, 2025.
8. International Energy Agency, "Africa Energy Outlook 2022", <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2022>, May 7, 2025.
9. South African Department of Energy, "The South African renewable energy IPP procurement programme", <https://www.ipp-projects.co.za/Publications/>, June 11, 2025.
10. Akello, O.O.P., Saoke, O.C., Kamau, N.J., Ndeda, H.O.J., "Modeling and performance analysis of solar parabolic trough collectors for hybrid process heat application in Kenya's tea industry using system advisor model", *Sustainable Energy Research*, Vol. 10, Issue 7, Pages 1-15, 2023.
11. World Bank Group, & ESMAP, "Global solar atlas: country DNI reports (Nigeria, Ethiopia, Kenya)", <https://globalsolaratlas.info/download/country>, April 28, 2025.
12. Gonzalez Gonzalez, A., Alvarez Cabal, J.V., Vigil Berrocal, M.A., Peón Menéndez, R., Riesgo Fernández, A., "Simulation of a CSP solar steam generator, using machine learning", *Energies*, Vol. 14, Issue 12, 3613, 2021.
13. Asif Iqbal Turja, Hasan, M.M., Ehsan, M.M., Khan, Y., "Multi-objective performance optimization & thermodynamic analysis of solar powered supercritical CO<sub>2</sub> power cycles using machine learning methods & genetic algorithm", *Energy and AI*, Vol. 15, 100327, 2024.
14. Peer, M.S., Melesse, T.Y., Orrù, P.F., Braggio, M., Petrollese, M., "Next-generation CSP: The synergy of nanofluids and Industry 4.0 for sustainable solar energy management", *Energies*, Vol. 18, Issue 8, 2083, 2025.
15. SolarMillennium, "The parabolic trough power plants andasol 1-3. the largest solar power plant in the World-Technology Premiere in Europe", <http://large.stanford.edu/publications/power/references/docs/Andasol1-3engl.pdf>, April 12, 2025.
16. Eylence, M., Aksoy, B., Özsoy, K., "Makine öğrenmesi ile 3 boyutlu yazıcı plastik filamentlerinin ergime noktası ve esneklik özelliklerine dayalı çekme dayanımının tahmini", *Yekarum*, Cilt 9, Sayı 2, Sayfa 91-107, 2024.
17. Kaya, Z., Aksoy, B., Özsoy, K., "Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen altı eksenli robot kol ile görüntü işleme ve yapay zekâ tabanlı ürünlerin tasniflemesi", *Journal of Materials and Mechatronics: A*, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 193-210, 2023.
18. Altman, N. S., "An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression", *The American Statistician*, Vol. 46, Issue 3, Pages 175-185, 1992.
19. Hoerl, A. E. and Kennard, R. W., "Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems", *Technometrics*, Vol. 12, Issue 1, Pages 55-67, 1970.
20. Tibshirani, R., "Regression shrinkage and selection via the lasso", *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Vol. 58, Issue 1, Pages 267-288, 1996.
21. Zou, H. and Hastie, T., "Regularization and variable selection via the elastic net", *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, Vol. 67, Issue 2, Pages 301-320, 2005.
22. Nayak, J., Vakula, K., Dinesh, P., Naik, B. and Pelusi, D., "Intelligent food processing: Journey from artificial neural network to deep learning", *Computer Science Review*, Vol. 38, Pages 1-28, 2020.
23. Khan, M. I. H., Sablani, S. S., Nayak, R. and Gu, Y., "Machine learning-based modeling in food processing applications: State of the art", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol. 21, Issue 2, Pages 1409-1438, 2022.
24. Chicco, D., Warrens, M. J. and Jurman, G., "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation", *PeerJ Computer Science*, Vol. 7, Pages 1-24, 2021.

25. John, A., and Oyekale, J. “Techno-economic feasibility analysis of a large-scale parabolic trough thermal power plant in Effurun-Warri, Nigeria”, *International Journal of Energy and Smart Grid*, Vol. 8, Issue 1, Pages 1-11, 2023.
26. T. E. Boukelia, M. S. Mecibah and I. E. Meliche, "Design, optimization and feasibility study of parabolic trough solar thermal power plant with integrated thermal energy storage and backup system for Algerian conditions", 3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA), Pages 1-5, Paris, 2014.
27. Aguilar-Jiménez, J. A., Velázquez, N., Acuña, A., Cota, R., González, E., González, L., López, R., and Islas, S., “Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids”, *Solar Energy*, Vol. 174, Pages 55-65, 2018.
28. Ding, Y., Vijay, A., Neal, D., & McCulloch, M. D., “Predictive control of rural microgrids with temperature-dependent battery degradation cost.”, 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Pages 509-513, Netherlands, 2020.
29. Yahya, A., Yessef, M., Bennouna, E., Lagrioui, A., and Boutammachte, N., “Parabolic Trough Plant Performance in Morocco for Techno-economic Evaluation: A Case Study of Noor 1”, 2024 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pages 1-4, Romania, 2024.
30. Suwa, T., “Transient heat transfer performance prediction using a machine learning approach for sensible heat storage in parabolic trough solar thermal power generation cycles”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 56, Pages 1-11, 2022.
31. Kottala, R., Balasubramanian, K. R., Jinshah, B. S., Divakar, S., and Kumar, R., “Experimental investigation and machine learning modelling of phase change material-based receiver tube for natural circulated solar parabolic trough system under various weather conditions”, *J Therm Anal Calorim*, Vol. 148, Pages 7101-7124, 2023.
32. Alhamayani, A., “Performance analysis and machine learning algorithms of parabolic trough solar collectors using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MWCNT as a hybrid nanofluid”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 57, Pages 1-16, 2024.