

# Bir Parabolik Oluk Kolektörün Termodinamik Analizi: Yemen Örneği

Eissa ALKUBATI<sup>1\*</sup>, Atılgan TEMİR<sup>2</sup>, İbrahim ÜÇGÜL<sup>3</sup>, Hilmi Cenk BAYRAKÇI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Mühendisliği, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9719-0143), [issakubati@gmail.com](mailto:issakubati@gmail.com)

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Mühendisliği, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0129-5053), [atilgantemir@gmail.com](mailto:atilgantemir@gmail.com)

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9794-0653), [ibrahimucgul@sdu.edu.tr](mailto:ibrahimucgul@sdu.edu.tr)

<sup>4</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-5064-7310), [cenkbayrakci@isparta.edu.tr](mailto:cenkbayrakci@isparta.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 15.12.2022 ve Kabul Tarihi 21.07.2023)

(DOI: 10.35354/tbed.1219723)

**ATIF/REFERENCE:** Alkubati, İ., Temir, A., Üçgül, İ., Bayrakçı H. C. (2023). Bir Parabolik Oluk Kolektörün Termodinamik Analizi: Yemen Örneği. *Teknik Bilimler Dergisi*, 13 (2), 7-14.

## Öz

Günümüzün en büyük problemlerinin başında enerji kaynaklarındaki hızlı tükenme gelmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke, diğer ülkelere göre daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Her geçen gün artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve enerji maliyetlerini azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve verimlerinin artırılması üzerine çalışmalara hız verilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir. Güneş enerjisinden kullanılabilir enerji üretimi için birçok farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden biri de yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerdir. Bu sistemlerde ısınarak geçen su ve buhar son üniteden istenilen sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşıldığında üretilen buhar doğrudan buhar türbinine gönderilerek karbon emisyonu yaratmadan elektrik enerjisi üretilir. Çalışmada, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinden biri olan parabolik oluk kolektörlü enerji üretim sisteminin Yemen'in üç bölgesi için termodinamik analizi yapılmıştır. İnceleme bölgesi olarak iç savaş nedeniyle enerji sıkıntısı çekmekte olan Yemen seçilmiştir. Yemende devam etmekte olan iç savaş, elektrik üretim ve dağıtım altyapılarına zarar vermiştir. Bu da bölgesel ve sık olmak üzere enerji kesintilerine neden olmaktadır. Yemen hükümetinin kontrolü dışındaki bölgelerde yaşayan nüfus bu kesintilerden dolayı ortaya çıkan temiz su temini, temel sağlık hizmetlerine ulaşım ve sanayi üretiminin azalmasına bağlı olarak artan işsizlik gibi sorunlar ile yüzleşmektedir. Savaş nedeni ile çıkarılan petrol ve doğalgaz miktarlarındaki azalma, enerji dağıtım tesislerinin ve altyapısının zarar görmesi enerji arz talep dengesinin sağlanamamasına neden olmaktadır. Bu analiz ile bölgenin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin alternatif enerji kaynakları ile karşılanması adına bir ön inceleme yapılmıştır. Alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisinden elektrik üretiminde yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemlerinin ulusal çapta ve bölgesel tesisleşme ile kurulması bu sıkıntılarının önüne geçecektir. Bu sayede enerji güvenliği artırılabilecek, sürdürülebilirlik sağlanarak enerji sıkıntısı çözülecektir. Ayrıca alternatif enerji projeleri, yeni projeler için ön ayak oluşturarak istihdam ortamı yaratacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, Güneş takip, Parabolik oluk kolektör, Yemen enerji kaynakları

## Thermodynamic Analysis of a Parabolic Trough Collector: The Case of Yemen

### Abstract

One of the major problems of our time is the rapid depletion of energy resources. Many developed and developing countries require more energy compared to other nations. In order to meet the increasing energy demands and reduce energy costs, there has been a significant effort to research renewable energy sources and enhance their efficiency. Solar energy is among the prominent renewable energy sources. Various methods exist for harnessing usable energy from solar power, and one such method is concentrated solar power

\* Sorumlu Yazar: [atilgantemir@gmail.com](mailto:atilgantemir@gmail.com)

systems. In these systems, water is heated and converted into steam, which is then sent directly to a steam turbine to generate electricity without creating carbon emissions. This study focuses on the thermodynamic analysis of a specific type of concentrated solar power system, namely the parabolic trough collector system, for three regions in Yemen. Yemen was selected as the study area due to its energy shortage resulting from the ongoing internal conflict. The ongoing civil war in Yemen has caused damage to the electricity generation and distribution infrastructure, resulting in frequent regional power outages. The population living in areas outside the control of the Yemeni government faces various challenges due to these outages, such as difficulties in accessing clean water, basic healthcare services, and increased unemployment resulting from reduced industrial production. The decline in oil and natural gas extraction due to the war, coupled with damage to energy distribution facilities and infrastructure, has created an imbalance between energy supply and demand. This analysis aims to provide a preliminary assessment for meeting the region's electricity needs through alternative energy sources. The establishment of concentrated solar power systems for electricity generation from solar energy on a national and regional scale would alleviate these difficulties. It would enhance energy security, address energy shortages through sustainability, and stimulate employment opportunities by serving as a catalyst for new alternative energy projects.

**Keywords:** Solar energy, Solar tracking, Parabolic through collector, Yemeni energy sources.

## 1. Giriş

Tarihin ilk zamanlarından itibaren insanlık, yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek ve gelişmek için enerjiye ihtiyaç duymuştur. [1] Dünya çapında artan nüfusla doğru orantılı olarak gelişen sanayi ve kentleşme beraberinde enerjiye olan ihtiyacı artırmıştır. İhtiyaç olan bu enerji ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Enerji tüketimindeki artışlar, varolan fosil yakıt rezervlerinin tükenmesini hızlandırdığı gibi buna paralel olarak küresel emisyon oranlarında bir artışa sebep olmuştur.[2] Bu doğrultuda karbon ayak izini artıran ve doğa biyoçeşitliliğini azaltan fosil enerji kaynakları aynı zamanda küresel iklim problemlerine de neden olmaktadır. Ayrıca bu kaynakları elinde tutan ülkeler stratejik anlamda güçlü olup, enerji açığı olan ülkeler üzerinde belli yaptırımlara sahip olabilmektedir.

1970 yıllarda OPEC (petrol ihraç eden ülkeler örgütü) petrol üretimini düşürüp batılı ülkelere ambargo koymasının ardından artan petrol fiyatları ile birlikte fosil yakıtlara olan bağımlılıktan dolayı yaşanan küresel enerji krizi göz ardı edilemeyecek bir problemdir.[3] Bu nedenle yakın gelecekte yaşanacak fosil yakıt rezerv problemleri ve bu enerji kaynaklarının sebep olduğu çevresel etkilerden dolayı daha yeşilci ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlar için temiz ve sürdürülebilir bir çözüm olsada bu kaynakların doğru ve verimli kullanılması da bir o kadar önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında verim önemli bir faktördür. Günümüzde gelişen teknolojiye rağmen hala yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, yatırım ve işletme maliyetlerinden dolayı sektöre uğramaktadır. İktisatta bir terim olan dışlama(crowding-out) etkisine göre eğer devlet fazla borçlanma yapıyorsa özel sektör kaynak elde edememektedir. Bu terimi enerji alanına uyguladığımızda fosil enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran daha ucuz olması yeni sistem ve teknolojilerin piyasaya girişini zorlaştırmaktadır.[4] Bu nedenle sistem verimlerinin iyileştirilmeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim teşviğini artıracaktır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi diğer yenilenebilir kaynaklara göre potansiyeli en fazla olandır. Bunun yanında güneş enerjisi en bol, en modern ve en fazla uygulama alanına sahip olanıdır.[5] Güneş enerjisinden elektrik üretimi için farklı yöntemler mevcuttur. Teknolojik gelişmelerin her geçen gün artmasıyla güneş enerjisinden elektrik üretilmesi konusunda çalışmalar üzerinden durulmuş ve özellikle güneş enerjisinden yüksek sıcaklıklarda buhar elde ederek elektrik üretimi yaygınlaşmaya başlamıştır. Buhar ve buhar

türbinleri kullanarak elektrik üretimi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç olmaktadır.[6] Orta ve yüksek sıcaklık uygulamaları için yoğunlaştırıcı güneş sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin başında da parabolik oluk tipi güneş kollektörleri gelmektedir.

Parabolik güneş kollektörleri için verim önemli bir faktördür. Bu sistemde verimi yükseltmek amacıyla güneş takibi yapılabilmektedir. Güneşi takip eden sistemler tek ve çift eksen olarak ikiye ayrılmaktadır. Takip ekseni ne kadar artar ise verim de doğrusal olarak artmaktadır. Ancak bunun yanında yatırım maliyetleride artış göstermektedir. Parabolik oluk kollektör sistemlerinde tek eksen takip kullanılmaktadır.

Çalışmada tek eksen bir parabolik oluk kollektörün Yemen şartlarında üç bölge için termodinamik analizler gerçekleştirilecektir. Bu analizler sonucunda Yemen için uygulanabilir bir güneş enerji modelinin oluşturulması amaçlanmaktadır.

### 1.1. Yemen Enerji Durumu

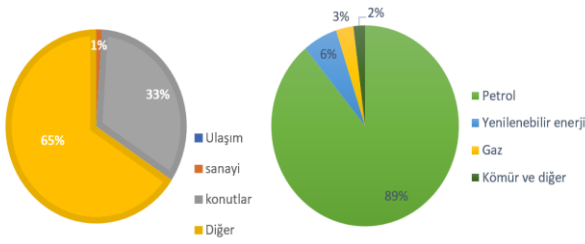
Yemen Cumhuriyeti'nin Resmî adı el-Cumhûriyyetü'l-Yemeniyye olup; Kızıldeniz, Aden körfezi ve Hint Okyanusu arasında yer almaktadır. 527.970 km<sup>2</sup> yüzölçümü ile yarımadanın ikinci büyük ülkesidir. Yemen'in nüfus büyüklüğü yaklaşık 30,4 milyondur. Nüfusun artmaya devam ederek 2050 yılında yaklaşık 48,1 milyona ulaşması beklenmektedir.[7] Şekil 1'de Yemen coğrafi konumu gösterilmiştir.



Şekil 1. Yemen Coğrafi Konum [8]

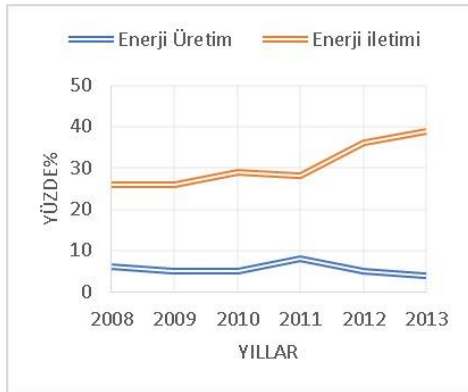
Yemen diğer Ortadoğu ülkelerinde olduğu gibi enerji ihtiyacını ağırlıklı olarak fosil yakıt ile karşılamaktadır. Petrol ve doğal gaz üreten bir ülke olmasına rağmen, nüfusunun ihtiyaç duyduğu enerji talebini karşılayamamaktadır. Bu nedenle ülke çapında uzun süreli elektrik kesintileri yaşanmaktadır. Enerji talebinin karşılanamaması hem hayat kalitesini hem de ekonomik faaliyetleri olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 2'de Yemen

toplam enerjisinin sektörel üretim ve tüketim oranları grafikleri gösterilmiştir.



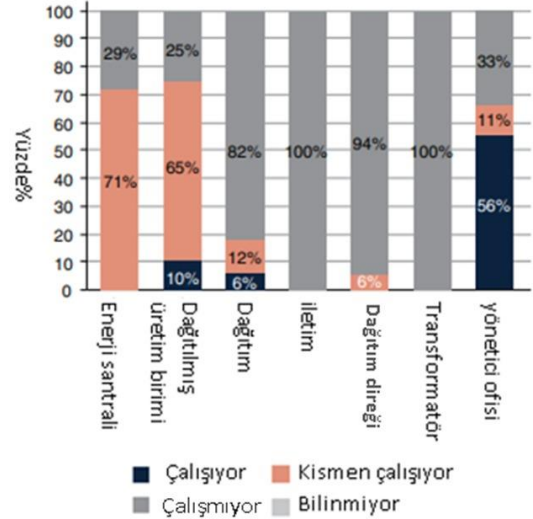
Şekil 2. Yemen Toplam Enerjisinin Sektörel Üretim ve Tüketim Oranları [9]

Gelişmekte olan bir ülke olan Yemen'in halkının %75'i kırsal bölgelerde yaşamakta ve bu bölgelerin sadece %23'ü elektrik şebekesine bağlıdır. Ülkede yaşanan enerji açığının 2013 yılında yaklaşık 500 MW olduğu tahmin edilmektedir.[10] Yemen'in kurulu elektrik kapasitesi 1.6 GW olmakla birlikte enerji açığını karşılamak için tahmini 0.25 GW enerjiye daha ihtiyaç duymaktadır.[11] Ülke enerji geliştirme planına göre 2020 yılında elektrik talebi 3.538 GW olacağı tahmin edilmektedir.[12] Bu tahmini değer ülkede yaşanan enerji krizinin ilerleyen zamanlarda artacağını göstermektedir. Ayrıca ülke genelinde iletim şebekesinden kaynaklanan kayıplar yüksektir. Bu kayıplar şebekenin yeterli teknolojide olmaması ve gerekli bakımlarının yapılamamasından kaynaklı nedenlerden dolayıdır. Şekil 3'de iletim şebekesi kayıplarının yıllara göre dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 3. İletim Şebekesi Kayıp Miktarı [13]

2014 Yılında Yemen iç savaşı başladığı zamandan bu yana elektrik üretim tesisleri kritik düzeyde fiziki hasar ile karşılaşmıştır. Şekil 4'de ülke genelinde bulunan elektrik üretim tesislerinin aldığı fiziki hasar düzeyleri gösterilmektedir.



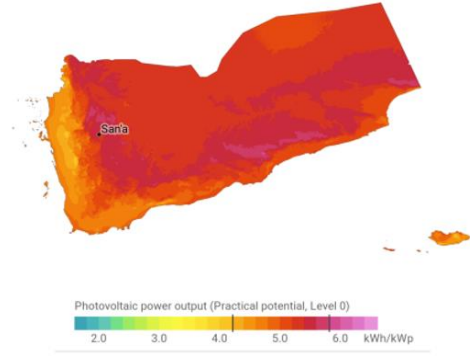
Şekil 4. Elektrik Üretim Tesisleri Fiziki Hasar Düzeyleri [14]

Yemen nüfusunun sadece %40'ı altyapı yetersizliği nedeniyle elektrik şebekesine bağlıdır. Geri kalan %60'lık nüfusun yarısı çatı tipi fotovoltaik (PV) kullanırken diğer yarısı ise dizel veya benzinli jeneratörler kullanmaktadır. [15] Ayrıca Yemen'de yakıt fiyatları küresel fiyat ortalamasına göre çok yüksek olduğu için jeneratör kullanımı pahalı bir alternatif olmaktadır. Ayrıca halkın akaryakıt ihtiyacını karşılama isteği ülke genelinde süregelen savaş nedeniyle karaborsa piyasalar ile daha da zorlaşmaktadır. Son yıllarda Yemen'de yenilenebilir enerji, nüfusun giderek artan enerji taleplerini karşılamak için en önemli ve karlı bir seçenek haline gelmiştir. Yemen, coğrafi konumu nedeniyle yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli açısından zengin bir ülke olmasına rağmen gerekli olan tesislerin olmamasından dolayı bu potansiyelinden mahrum kalmaktadır.

Yemende devam etmekte olan iç savaş, elektrik üretim ve dağıtım altyapılarına zarar vermiştir. Yemen hükümetinin kontrolü dışındaki bölgelerde yaşayan nüfus bu kesintilerden dolayı ortaya çıkan temiz su temini, temel sağlık hizmetlerine ulaşım ve sanayi üretiminin azalmasına bağlı olarak artan işsizlik gibi sorunlar ile yüzleşmektedir. Bu analiz ile bölgenin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin alternatif enerji kaynakları ile karşılanması adına bir ön inceleme yapılmıştır. Alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisinden elektrik üretiminde yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemlerinin ulusal çapta ve bölgesel tesisleşme ile kurulması bu sıkıntıların önüne geçecektir. Bu sayede enerji güvenliği artırılabilecek, sürdürülebilirlik sağlanarak enerji sıkıntısı çözülecektir. Ayrıca alternatif enerji projeleri, yeni projeler için ön ayak oluşturarak istihdam ortamı yaratacaktır.

## 1.2. Yemen Güneş Enerji Potansiyeli

Yemen'in yılda 3000 saatten fazla güneşlenme süresi ile yaklaşık 18–26 MJ/m<sup>2</sup>/gün, yani 5.2–6.8 kWh/m<sup>2</sup>/gün ortalama güneş ışınımı almaktadır. Bu özelliğinden dolayı Yemen Ortadoğu'da en yüksek güneş radyasyonu seviyelerine sahip bölgelerden biridir. Yıllık ortalama günlük güneşlenme saati 7.3 ile 9,1 saat/gün arasındadır.[16]



Şekil 5. Yemen Güneşlenme Potansiyeli [17]

Yemen güneş enerji brüt potansiyeli (teknik, ekonomik ve çevresel koşullardan bağımsız enerji potansiyeli) 527,970km<sup>2</sup>'lik arazi yüzeyi üzerinde %10'luk bir verim ile yaklaşık 5,2-6,8kWh/m<sup>2</sup>/gün olmaktadır. Yemen güneş enerji potansiyeli çeşitli teknoloji uygulamaları için toplamda azami 2200 MW'a kadar ulaşabileceği öngörülmektedir.[12] Tablo 1'de bu teknoloji uygulamaları için ulaşılacak enerji teknik potansiyelleri gösterilmiştir.

Tablo1. Güneş Enerjisi Uygulamaları Teknik Potansiyel [12]

Teknoloji	Teknik Potansiyel (MW)
Fotovoltaik	43.4
Yoğunlaştırıcı Güneş Uygulaması	1824
Su Isıtma	332.7
Toplam	2200.2

Tablo 1 incelendiğinde Yemen genelinde yoğunlaştırıcı güneş uygulamalarının teknik potansiyel olarak diğer teknolojilerden ayrıldığı görülmektedir. Çalışma kapsamında yoğunlaştırıcı güneş uygulama teknolojisinin Yemen'de bulunan Sana, Taiz ve Mukala şehirleri için termodinamik analizler gerçekleştirilecektir.

Tablo 2. Bölgeler İçin Direkt Güneş Radyasyonu (kWh/m<sup>2</sup>) [18]

	Sana(kWh/m2)	Taiz(kWh/m2)	Mukala(kWh/m2)
Ocak	222.78	132.82	157.63
Şubat	224.26	153.27	164.2
Mart	214.69	173.06	158.26
Nisan	159.52	181.79	174.97
Mayıs	166.11	157.03	144.57
Haziran	168.71	117.27	141.59
Temmuz	104.96	83.56	128.81
Ağustos	129.47	98.74	129.37
Eylül	203.19	133.65	122.06
Ekim	249.03	178.33	203.76
Kasım	226.93	181.26	175.81
Aralık	252.28	161.63	194.97

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Termodinamik Analiz

Ülkeler, çevre duyarlılığı, kolay temini ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre maliyetinin daha ucuz olmasından dolayı güneş enerjisi üzerinde yoğunlaşmışlardır.

PTC sistem güneş ışınlarını yansıtıcı yüzey sayesinde parabolik oluk tipi güneş kolektörünün odak noktasında yer alan alıcı boruya yansıtılarak yoğunlaştırma yapmaktadır. Bu çalışmada parabolik yoğunlaştırıcıların termodinamik incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Sistem içinde yer alan yansıtıcı kısım, emici boru, cam örtü ve güneş takip mekanizması detaylı bir şekilde incelenerek ısı denklemleri verilmiş ve değerleri hesaplanmıştır.

Parabolik oluk kolektörlerinde hesaplamaların temelinde yüzey alanları gelmektedir. Denklem 1'de verilen formül ile alıcı alanı ( $A_r$ ) hesaplanır.

$$A_r = \pi * D_0 * L \quad (1)$$

Sıradaki adım cam kaplama alanının ( $A_g$ ) bulunmasıdır. Cam kaplama alanı Denklem 2'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$A_g = \pi * D_g * L \quad (2)$$

Son olarak gölgelenmemiş kolektör açıklık alan formülü Denklem 3'te verilmiştir.

$$A_a = (W - D_g) * L \quad (3)$$

Denklem 3'te verilen  $W$ , kolektörümüzün genişliğini ifade etmektedir. Bu aşamadan sonra sistemde yaşanan kayıp ve katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. İlk olarak cam kaplamada oluşan rüzgâr ısı transfer katsayısını ( $h_w$ ) bulunacaktır. Bunun için yapılması gereken ilk işlem Reynolds sayısının hesaplanmasıdır. Reynolds sayısı, Denklem 4'te verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$Re = \rho V D_g / \mu \quad (4)$$

Denklem 4'te verilen  $\rho$ , hava özkütlesini,  $D_g$ , 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 5'te bulunan formül ile elde edilmektedir.

$$Ort. Sıcaklık = 1/2(T_g + T_a) \quad (5)$$

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;

$$Nu = 0.4 + 0.54(Re^{0.52}) \quad (6)$$

$1000 < Re < 50000$  aralığında ise;

$$Nu = 0.3(Re^{0.6}) \quad (7)$$

Nusselt sayısı bulunduktan sonra  $h_w$ , rüzgâr ısı transfer katsayısını Denklem 8 ile hesaplanabilir.

$$h_w = Nu * k / D_g \quad (8)$$



Denklem 8'de 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.

$$h_{r,c-a} = \varepsilon_g \sigma (T_g + T_a) * (T_g^2 + T_a^2) \quad (9)$$

Denklem 9'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 10'da ise alıcı tüp ile cam kaplama arasındaki ışıma ısı transfer katsayısını veren formül gösterilmiştir.

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{(1/\varepsilon_r) + (A_r/A_g)((1/\varepsilon_g) - 1)} \quad (10)$$

Denklem 10'da verilen  $T_r$ , alıcı tüp sıcaklığını  $\varepsilon_r$ , Alıcı emicilik katsayısını ifade etmektedir. Yukarıdaki formüller yardımıyla ısı transfer katsayıları bulunmuştur. Bunlardan yararlanılarak Denklem 11 ile alıcı alanı temel alınarak ortalama kollektör ısı transfer katsayısı bulunur.

$$U_L = \left( \frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_g} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right) \quad (11)$$

Denklem 11 'de elde edilen  $U_L$  değeri ile tahmini  $T_g$  değeri bulunup sağlanması yapılabilmektedir. Bu ise Denklem 12'de verilen eşitlik ile gerçekleştirilmektedir.

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_g (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_g (h_{r,c-a} + h_w)} \quad (11)$$

Kollektör verim faktörünün ( $F'$ ) hesabı ise Denklem 12'de verilmiştir.

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{\bar{h}_f D_i} + \left( \frac{D_o \ln D_o}{2k D_i} \right)} \quad (12)$$

Bu denklemden yararlanılarak Denklem 13'de ısı değişim faktörü hesaplanmaktadır.

$$F_R = \frac{m c_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{U_L F' A_r}{m c_p} \right) \right] \quad (13)$$

Denklem 13'de verilen  $c_p$ , suyun özgül ısısını,  $m$  ise kütleli debiyi ifade etmekte ve Denklem 14'de verilen denklemden bulunmaktadır. Bu parametreler dikkate alınarak güneş sisteminden elde edilen kullanılabilir radyasyon sonucundaki elektriksel güç değeri ise Denklem 15 ile hesaplanmaktadır.

$$m = V \left( \frac{\pi D_i^2}{4} \right) \rho \quad (14)$$

Denklem 14'de verilen  $V$ , su akış hızını,  $\rho$  ise suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$Q_u = F_R [S A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (15)$$

Denklem 15'te verilen  $S$ , ışıma değerini,  $T_i$  ise su giriş sıcaklık değerini ifade etmektedir. Son olarak akışkanın çıkış sıcaklığı ise Denklem 16 ile hesaplanmaktadır.

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{m c_p} \quad (16)$$

Tablo 3'de sistemin kurulumunun ve termodinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan parametreler gösterilmiştir.

Tablo 3. Parabolik Oluk Kollektör Parametreleri

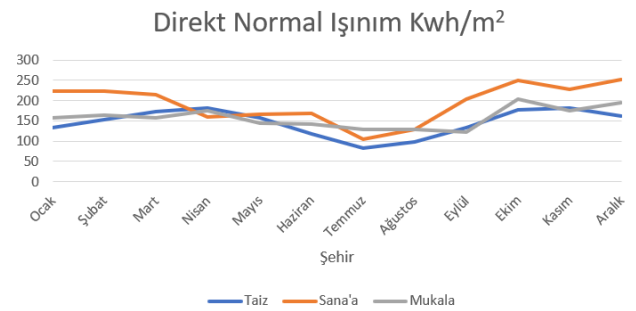
Parametre	Değer	Birim
Cam kaplama emicilik	0.87	-
Alıcı emicilik	0.92	-
Alıcı boru dış çap	0.05	m(Metre)
Alıcı boru iç çap	0.04	m(Metre)
Alıcı cam örtü dış çap	0.09	m(Metre)
Hava yoğunluğu	1.044	Kg/m3
Su giriş sıcaklığı	155	°C
Kollektör uzunluğu	100	m(Metre)
Kollektör Eni	5.76	m(Metre)
Cp	4327.25	J/kg-K
Sistem termal güç değeri	500	MW
Hava dinamik viskozite	2,01E-05	Kg/m-s
Hava ısı iletkenlik katsayısı	0.0272	W/m-K
Güneşlenme süresi	12	h(Saat)
Stefen boltzman sabiti	5,67E-08	-
Alıcı boru içi ısı transfer katsayısı	330	W/m2-K
Cam tüp ısı iletkenlik katsayısı	15	W/m-K
Su özkütlesi	913.94	Kg/m <sup>3</sup>
Su akış hızı	0.28	m/sn

Tablo 2.1.'de verilen parabolik oluk kollektör parametrelerinde güneşlenme süresi hariç diğer parametreler sabit alınmış olup herhangi bir konumdan bağımsızdır. Güneşlenme süresi ise Yemen için yıllık ortalama değer olan 12 saat olarak seçilmiştir. [18]

### 3. Araştırma Bulguları

Tablo 2.1.'de verilen parabolik oluk kollektör parametreleri baz alınarak adet başına brüt alanı 576 m<sup>2</sup> olan bir parabolik oluk kollektörü (PTC) ile içinde basınçlı su+buhar bulunan bir sistem teorik olarak oluşturularak analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu termodinamik analiz, sistemin güneş ışımasını absorbe eden ve enerji üretiminin başladığı yer olan oluk kısmına uygulanmıştır. Analiz sırasında olukta gerçekleşen hava, kaplama ve ışıma kayıpları hesaplanmıştır.

Analiz için gerekli olan direkt normal ışıma değerleri her bir şehir için yıllık ortalama üzerinden hesaplanmıştır. Şehirlere ait olan bu ışıma değerlerinin aylık ortalama değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6 Direk Normal İşıma Değerleri [19]

Şekil 6’da gösterilen tablo incelendiğinde direkt normal ışınımı en yüksek şehir Sana olmaktadır ve bunu sırasıyla Mukalla ve Taiz şehirleri izlemektedir. Bu farklılıklar bölgeler arası coğrafi değişiklikten kaynaklanmaktadır.

Analiz sonucunda Tablo 3’de Sana şehri için parabolik oluk kollektörün çıkış parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 3. Parabolik Oluk Kollektör Çıkış Parametreleri (Sana Şehri)

Çıkış Parametresi	Değer
Reynolds sayısı	11763
Nusselt sayısı	83
Rüzgâr kaybı	25.1 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (ortam-kaplama)	6.05 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (alıcı-kaplama)	14 W/m <sup>2</sup> -K
Ort. kollektör ısı kayıp katsayısı	10.76 W/m <sup>2</sup> -K
Kollektör verim faktörü	0.9611
Isı taşınım faktörü	0.9228
Absorbe güneş radyasyon enerji değeri	310 kW
Su çıkış sıcaklığı	284.6 °C
Kollektör adedi	3218

Tablo 4’te Taiz şehri için parabolik oluk kollektörün çıkış parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 4. Parabolik Oluk Kollektör Çıkış Parametreleri (Taiz Şehri)

Çıkış Parametresi	Değer
Reynolds sayısı	15232
Nusselt sayısı	97
Rüzgâr kaybı	29.31 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (ortam-kaplama)	6.16 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (alıcı-kaplama)	14 W/m <sup>2</sup> -K
Ort. kollektör ısı kayıp katsayısı	11.07 W/m <sup>2</sup> -K
Kollektör verim faktörü	0.96
Isı taşınım faktörü	0.92
Absorbe güneş radyasyon enerji değeri	257.3 kW
Su çıkış sıcaklığı	262.4 °C
Kollektör adedi	3885

Son olarak Tablo 5’te Mukalla şehri için parabolik oluk kollektörün çıkış parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 5. Parabolik Oluk Kollektör Çıkış Parametreleri (Mukalla Şehri)

Çıkış Parametresi	Değer
Reynolds sayısı	17013
Nusselt sayısı	104
Rüzgâr kaybı	31.32 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (ortam-kaplama)	6.32 W/m <sup>2</sup> -K
Isı iletim katsayısı (alıcı-kaplama)	14 W/m <sup>2</sup> -K
Ort. kollektör ısı kayıp katsayısı	11.21 W/m <sup>2</sup> -K
Kollektör verim faktörü	0.96
Isı taşınım faktörü	0.92
Absorbe güneş radyasyon enerji değeri	257.7 kW
Su çıkış sıcaklığı	262.48 °C
Kollektör adedi	3880

Tablo 6’ da Sana Taiz ve Mukalla şehirleri için termodinamik analiz için gerekli olan kayıpların hesaplanması adına rüzgar hızı değerleri verilmiştir.

Tablo 6. Bölgeler İçin Aylık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s) [20]

Ay	Sana(m/s)	Taiz(m/s)	Mukalla(m/s)
<b>Ocak</b>	2.1	3.3	3.8
<b>Şubat</b>	2.3	3.4	3.6
<b>Mart</b>	2.3	3.9	3.3
<b>Nisan</b>	2.1	3.8	3
<b>Mayıs</b>	2.5	2.6	2.7
<b>Haziran</b>	2.9	2.8	3.8
<b>Temmuz</b>	3.2	4.1	5.1
<b>Ağustos</b>	3	3.6	4.6
<b>Eylül</b>	2.9	2.4	3.1
<b>Ekim</b>	2.7	2.8	3.2
<b>Kasım</b>	2.2	3.1	3.6
<b>Aralık</b>	2	3.2	3.8
<b>Ortalama</b>	2.51	3.25	3.63

## 4. Sonuç

Bölüm 3’de bulunan Sana, Taiz ve Mukalla şehirlerine ait parabolik oluk kollektör çıkış parametre tabloları incelendiğinde bölgesel farklılıklardan kaynaklı değişiklikler olduğu görülmektedir. Coğrafi alana bağlı olarak başta rüzgâr hızı, ışınım değeri ve ortam sıcaklığı değerleri ve buna bağlı kayıp katsayılarında farklılıklar görülmektedir.

Çıkış parametre hesaplamalarında Sana şehri için yıllık ortalama direkt normal ışınım değeri 643 W/m<sup>2</sup>, Taiz için 542W/m<sup>2</sup> ve son olarak Mukalla şehri için ise 541.66 W/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Bu değerler ile doğru orantılı olarak sistem tarafından absorbe edilen güneş radyasyon değerleri sırasıyla 310 kW, 257.3 kW ve 257.7 kW olarak hesaplanmıştır.

Tablolar üzerinden bir değerlendirme yapıldığında sistem için belirlenen termal güç değeri olan 500 MW için en verimli bölge Sana olmaktadır. Bunun nedeni bölgeye ait çevresel faktörlere bağlı, ısı kayıplarının diğer bölgelere kıyasla asgari düzeyde olmasıdır.

Çevresel faktörlerden biri olan rüzgâr nedeni ile kaybı en yüksek olan bölge Mukalla olurken en düşük olan ise Sana'dır. Buna bağlı olarak kollektör rüzgar kaybı değeri en yüksek 31.32 W/m<sup>2</sup>-K ile Mukalla olurken en düşük ise 25.1 W/m<sup>2</sup>-K ile Sana bölgesi olmaktadır. Tablo 6 incelendiğinde en düşük rüzgar hızı ortalamasının Sana şehri olduğu ve bu nedenle rüzgar kaybı değerinin diğer bölgelere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Bölgeler İçin Sonuç Karşılaştırılması(500MW)

	Sana	Taiz	Mukalla
<b>Direkt Normal Işınım(W/m<sup>2</sup>)</b>	643	542	541.66
<b>Absorbe Güneş Enerjisi(kW)</b>	310	257.3	257.7
<b>Rüzgar Kaybı(W/m<sup>2</sup>-K)</b>	25,1	29.31	31.32
<b>Su Çıkış Sıcaklığı(°C)</b>	284.6	262.4	262.48
<b>Kollektör Adet</b>	3218	3885	3880

Sistem için gerekli olan termal güç değerimizin(500MW) sağlanması adına bu üç bölge için gerekli olan kollektör adetlerini incelediğimizde Sana bölgesi için 3218 adet kollektör, Taiz bölgesi için 3885 adet kollektör som olarak Mukalla bölgesi için ise 3880 adet kollektör gerekli olduğu görülmektedir. En verimli bölgenin Sana olduğu anlaşılmaktadır ancak Taiz bölgesinin kayıp oranları Mukalla bölgesine oranla fazla olmasına rağmen gerekli güç için Mukalla bölgesi daha az kollektör adedine ihtiyaç duymaktadır. Bunun nedeni Mukalla bölgesinin Taiz'e oranla yıllık ortalama sıcaklığının daha yüksek olmasıdır.

Bu çalışmada üç ayrı şehir için güneş enerji potansiyeli ve silindirik parabolik kollektör sistemleriyle üretilebilecek termal enerji potansiyeli ortaya konmuştur. Tablo 7'de verilen su çıkış sıcaklığı, sisteme giren su giriş sıcaklığının, sisteme dahil olan güneş ışınımı sonucunda elde edilen toplam sıcaklıktır. Kollektör sayısı ise 500MW termal güç elde edinimi için gerekli olan adedi temsil etmektedir. Sistem analizi yapılırken elde eilmek istenen bu termal güç için gerekli olan az kollektör adedi için karşılaştırma yapılmaktadır. Bunun nedeni ise sistem için gerekli olan gücün asgari maliyet ile gerçekleştirme amacıdır. Sonuç olarak sistemlerin üç şehir için analizi yapıldığında en verimli bölgenin Sana olduğu tespit edilmiştir. Termal enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm verimlilik ortalaması, literatür çalışmaları incelendiğinde %38-%44 arasında olduğu belirlenmiştir. [21,22] 500 MW ölçeğinde bir termal enerjiden belirtilen verim oranında yaklaşık 150-220 MW elektrik üretim kapasitesine ulaşılmaktadır. Sana bölgesinde 500 MW bir termal güç elde etmek için toplamda 3218 adet parabolik oluk kollektör kullanılacaktır.

İç savaş nedeni ile Yemen'de çıkarılan petrol ve doğalgaz miktarlarındaki azalma, enerji dağıtım tesislerinin ve altyapısının zarar görmesi enerji arz talep dengesinin sağlanamamasına neden olmaktadır. Bu analiz ile bölgenin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin alternatif enerji kaynakları ile karşılanması adına bir ön inceleme yapılmıştır. Alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisinden elektrik üretiminde yoğunlaştırıcı güneş enerji sistemlerinin ulusal çapta ve bölgesel tesisleşme ile kurulması bu sıkıntılarının önüne geçecektir. Bu sayede enerji güvenliği artırılacak, sürdürülebilirlik sağlanarak enerji sıkıntısı çözülecektir. Ayrıca alternatif enerji projeleri, yeni projeler için ön ayak oluşturarak istihdam ortamı yaratacaktır.

## 5. Teşekkür

Çalışmalarımızın gerçekleştirilmesinde gerekli imkanların sağlanması konusunda desteklerini esirgemeyen Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (YEKARUM) teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca Atılgan Temir olarak öğrencisi olduğum YÖK 100/2000 Doktora Burs Programına (Akıllı Enerji Sistemleri) teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynakça

- [1] Üçgül, İ., Arslan, Ö., Elibüyük, Ufuk., Emen, Yeşim. (2019). Parabolik Oluk Yoğunlaştırıcı Sistemlerin Isparta Organize Sanayi Bölgesinde Kullanımı, YEKARUM Dergisi, 4(2), 40-48.
- [2] Temir, A. (2019) GPS Tabanlı 2-Eksen Güneş Takip Sisteminin Geliştirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [3] 1973 Petrol Krizi. ([https://tr.wikipedia.org/wiki/1973\\_Petrol\\_Krizi](https://tr.wikipedia.org/wiki/1973_Petrol_Krizi)) [Erişim Tarihi:Aralık 2022]
- [4] Bayındır S., M. (2010). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği ve Türkiye Uygulamaları. [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Üniversitesi.
- [5] Chafiou, H., Üçgül, İ. (2022). Komor Adaları'nda Parabolik Oluk Güneş Kollektörü ile Enerji Üretimi, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 30-39.
- [6] Şanlı G. (2010) Parabolik Oluk Tipi Güneş Kollektörlerinin İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi.
- [7] Central Statistical Organisation. (<https://cso-yemen.com>) [Erişim Tarihi:Aralık 2022]
- [8] Google Map. (<https://www.google.com/maps>) [Erişim Tarihi:Aralık 2022]
- [9] International Renewable Energy Agency. (<https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [10]Sufian, C. T., Barra, M. (2016). Energy Investment and Business Climate Report for Observer Countries. International Energy Chapter2016.
- [11]Qasem, A. (2018). Applications of Renewable Energy in Yemen, Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications, 8(1), 1-3.
- [12]Renewable Energy Strategy and Action Plan. (<https://moec-ye.com/>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [13]Public Electricity Corporation Annual Report. (<http://www.pecaden.com>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [14] Damage Report. (<https://data.worldbank.org/>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [15]Shetwi, A., Hannan, M., Abdullah, M., Rahman, M., Ker, P., Alkahtani, A., Mahlia, T., Muttaqi, K. (2021). Utilization of Renewable Energy for Power Sector in Yemen: Current Status and Potential Capabilities, IEEE Access, 9, 79278-79292.

- [16]Hadwan, M., Alkholidi, A. (2016). Solar Power Energy Solutions for Yemeni Rural Villages and Desert Communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 838-849.
- [17]Solargis. (<https://solargis.com/>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [18]Worlddata. (<https://www.worlddata.info/asia/yemen/sunset.php>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [19]Global Solar Atlas. (<https://globalsolaratlas.info/>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [20]Wind Speed. (<https://weatherspark.com/>) [Erişim Tarihi: Aralık 2022]
- [21]Garcia, F., Zarza E., Valanzuela, L., Perez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1695-1721.
- [22]Geyer, M., Lüpfert, E., Osuna R., Esteban, A., Schiel, W., Schweitzer, A., Zarza, E., Nava P., Langenkamp, J., Mandelberg, E. (2002). EUROTROUGH- Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. 11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Sept 4-6, 2002, Zurich, Switzerland.