



# YEKARUM

JOURNAL of YEKARUM

e - DERGI



e-ISSN: 1309-9388



<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yekarum>

Cilt:8 Sayı:1

2023

Volume:8 Number: 1

**DergiPark**

AKADEMİK



# ***YEKARUM e-DERGİ***

Cilt:8 Sayı: 1 Yıl: 2023

---

## **Journal of YEKARUM**

Volume:8 Number: 1 Year: 2023

-----  
E - ISSN:1309-9388  
-----

Yazıların tüm bilimsel sorumluluğu yazara veya yazarlara aittir. Dergide yayınlanan yazılardan editör, editör yardımcısı ve yayıncı sorumlu tutulamaz..Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır. All the scientific responsibilities of the manuscripts belong to the authors (s). The editor, assistant editor and publisher accept no responsibility for the articles published in the journal.

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yekarum>

İndeksler

<https://scholar.google.com/> , <https://www.base-search.net/> , <https://atif.sobiad.com/>,





*Süleyman Demirel Üniversitesi*  
**YEKARUM e-DERGİ**  
*(Journal of YEKARUM)*



*Cilt 8, Sayı 1, 2023*  
*E - ISSN:1309-9388*

**Baş Editör / Editor in Chief**

Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

**Editörler / Editors**

Doç. Dr. Ramazan ŞENOL

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKSOY

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erhan ŞAHİN

Öğr. Gör. Dr. Ahmet Elbir

**Yayın Danışma Kurulu**

Dr. N. Nnamdi Ekere

Wolverhampton Üniversitesi, İngiltere

Dr. Serhii YEVSEİEV

Kharkiv Politeknik Enstitüsü, Ukrayna

Dr. Khaoula IKHLEF

Politeknik Üniversitesi, CEZAYİR

Dr. Salah LARBİ

Politeknik Üniversitesi, CEZAYİR

Prof. Dr. Reşat SELBAŞ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta

Dr. Onur SELVİ

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, BURDUR

Doç. Dr. Utku KÖSE

Süleyman Demirel Üniversitesi, ISPARTA

Dr. Öğr. Üyesi Özdemir DENİZ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ISPARTA



*Süleyman Demirel Üniversitesi*  
**YEKARUM e-DERGİ**  
**(Journal of YEKARUM)**



*Cilt 8, Sayı 1, 2023*  
*E - ISSN:1309-9388*

## **İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

### **Araştırma Makalesi / Research Articles**

Güneş Enerjili Ejektörlü Soğutma Sisteminin Teorik İncelemesi: Yemen için Örnek Bir Uygulama  
Theoretical Analysis Of Solar-Powered Ejector Cooling System: An Application Example for Yemen  
Eissa ALKUBATI, İbrahim ÜÇGÜL .....1-12

Olivin Atık Tozunun Pozolanik Özelliğinin Araştırılması  
Investigation of Pozzolanic Properties of Olivine Waste Powder  
Yusuf Tahir ALTUNCI, Hakan CEYLAN .....13-19

### **Derleme / Review**

Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi  
Uses of Hydrogen and Hydrogen Economy  
Halil MUTLUBAŞ, Zafer Ömer ÖZDEMİR .....20-31



# Süleyman Demirel Üniversitesi

## YEKARUM e-DERGI

### (Journal of YEKARUM)



Cilt 8, Sayı 1, 1-12, 2023  
E - ISSN:1309-9388

## Güneş Enerjili Ejektörlü Soğutma Sisteminin Teorik İncelemesi: Yemen için Örnek Bir Uygulama

Eissa ALKUBATI<sup>1\*</sup>, İbrahim ÜÇGÜL<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9719-0143), [issakubati@gmail.com](mailto:issakubati@gmail.com)

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9794-0653), [ibrahimucgul@sdu.edu.tr](mailto:ibrahimucgul@sdu.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 07/07/2023 ve Kabul Tarihi 16/07/2023)

### ÖZET:

Bu çalışmada, güneş enerjisi kaynaklı ejektörlü soğutma sistemi Yemen örneğinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yemen'deki enerji sorununa özellikle sanayi sektörüne bir çözüm olabilecek yenilenebilir enerji kullanımına dayalı sistemler bu çalışmanın odak noktasını oluşturmuştur. Güneş parabolik kollektör ve ejektörlü soğutma sistemi, Yemen'deki enerji sorununa çözüm olabilecek önemli bir teknolojidir, özellikle Yemen gibi güneş ışımından zengin, soğutma ihtiyacının büyük olduğu bölgelerde bu sistemler, temiz ve sürdürülebilir enerji sağlamak için idealdir.

Çalışmada, ejektörlü soğutma sisteminin performansı, COP ve verim değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda elde edilen analizler ve sonuçları, Python programlama dili kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada farklı jeneratör ve evaporatör sıcaklıkları göre COP değerleri 0,4 ile 1,2 arasında bulunmuştur. Bu çalışmada, kapsamında sistemin teorik hesaplaması ve analizi yapılarak yemen için bir teorik uygulama gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, Ejektörlü sistem, Soğutma sistemi, ısı tahrikli soğutma sistemi.

## Theoretical Analysis Of Solar-Powered Ejector Cooling System: An Application Example for Yemen

### ABSTRACT

In this study, a solar-powered ejector cooling system has been thoroughly examined using the example of Yemen. Systems based on renewable energy usage, which can be a solution to the energy problem in Yemen, particularly in the industrial sector, have been the focus of this study. Solar parabolic collectors and ejector cooling systems are important technologies that can provide a solution to the energy problem in Yemen. Especially in regions like Yemen with abundant solar radiation and high cooling needs, these systems are ideal for providing clean and sustainable energy.

The performance of the ejector cooling system has been evaluated in terms of COP (Coefficient of Performance) and efficiency values. The analyses and results obtained in the calculations were obtained using the Python programming language. In this study, COP values ranging from 0.4 to 1.2 were found for different

\* Sorumlu yazar E-mail: [issakubati@gmail.com](mailto:issakubati@gmail.com)

generator and evaporator temperatures. The theoretical calculation and analysis of the system were conducted within the scope of this study, and a theoretical application for Yemen was performed.

**Keywords:** *Renewable energy, solar energy, ejector system, cooling system, thermally driven cooling system.*

## 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan soğutma sistemleri üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla birlikte, dünya genelinde bu tür uygulamaların zamanla yaygınlaştığı görülmektedir. Endüstriyel sektörde soğutma sistemi hem çok önemli bir yer almaktadır hem de çok yüksek enerji tüketen bir sistemdir.

Güneş enerjisi araştırmaları ve teknolojileri, enerji sektöründe dönüşümü hızlandırmak, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için kritik bir role sahiptir. Ejektörlü soğutma sistemlerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, bu konuyla ilgili yoğun araştırmalar başlamıştır. Ancak, ejektörlü soğutma sistemlerinin performans katsayısı düşük olduğundan, yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle, ejektörlü soğutma sistemlerinin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Literatür araştırmaları, ejektör tasarımı ve boyutlandırma hesaplamalarının zamanla arttığını göstermektedir. Ejektörlü soğutma sistemleri çevre dostu bir sistem olup, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve sera gazı salınımının azalması açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Dünya genelinde global ısınma nedeniyle soğutma ihtiyaçlarındaki talepler artmaktadır. Verimliliği artırmak için hava koşullandırma cihazlarının standartlara uygun olması gerekmektedir. Ayrıca, pasif, doğa tabanlı ve refrigerantsız hava koşullandırma sistemleri gibi alternatif çözümler, geleneksel refrigerant tabanlı klimaların yerine geçmesi için binaların ve bölgelerin daha iyi tasarlanmasıyla öncelikli olarak ele alınmalıdır. Son yedi yıl, kaydedilen en sıcak yıllar olmuştur. 2021 yılında binaların soğutma talebi, yıllık büyümede en yüksek seviyeye ulaşmış ve elektrik tüketiminin yaklaşık %16'sini (yaklaşık 2000 TWh) oluşturmuştur [1].

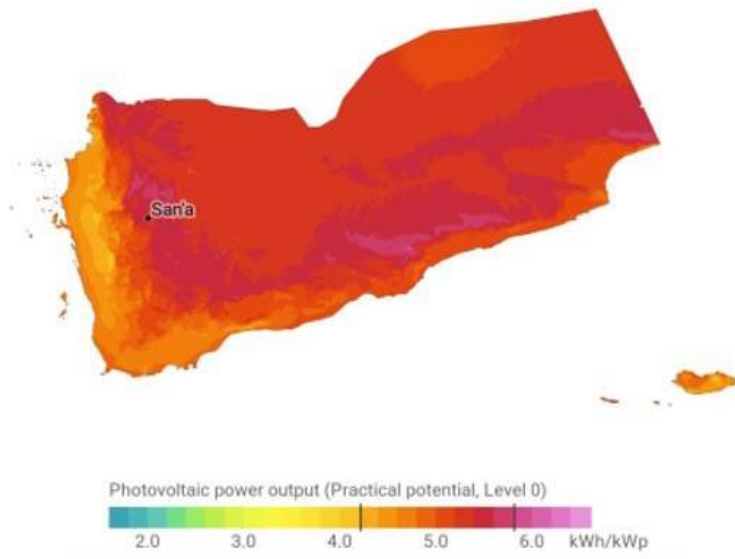
Bu çalışmada, güneş enerjisiyle çalışan ejektörlü soğutma sisteminin teorik ve matematiksel analizi yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada teorik araştırma kapsamında sistemin hesaplaması yapılmıştır ve analizi yaptıktan sonra yemen için bir teorik uygulama gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. Yemen’de Güneş Enerjisi

Yemen güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça zengindir. Ülkenin geniş bir kısmı geniş güneş ışığına maruz kalmaktadır ve ortalama güneş ışığı miktarı yılda 2500 kWh/m<sup>2</sup>'ye ulaşmaktadır.

Yemen yılda ortalama 3000 saatten fazla güneş alan bir bölgedir ve Orta Doğu bölgesinde öne çıkan bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Orta doğuda yıllık ortalama güneşlenme saatleri 7,3 ile 9,1 saat arasındadır (solargis verilerine göre 11-13 saat/gün arasında gösterilmiştir). Yıllık ortalama güneş ışınımı miktarı 18–26 MJ/(m<sup>2</sup>/gün) olarak tahmin edilmektedir, bu da 5.2–6.8 kWh/(m<sup>2</sup>/gün) denk gelir [2].

Yemen'in güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Güneş enerjisinden elektriği üretmek için kullanılan teknolojilerden biri, Konsantre Güneş Enerjisi (CSP) olarak adlandırılır. CSP sistemleri, aynaları veya lensleri kullanarak güneş ışığını bir alıcıya odaklar. Bu alıcı, yoğunlaştırılmış güneş enerjisini ısıya dönüştürür. Elde edilen ısı, türbinleri çalıştırarak elektrik üretir. Yemen'in teorik güneş elektrik potansiyeli yaklaşık olarak 2.446.000 Megavat (MW) civarındadır [3].

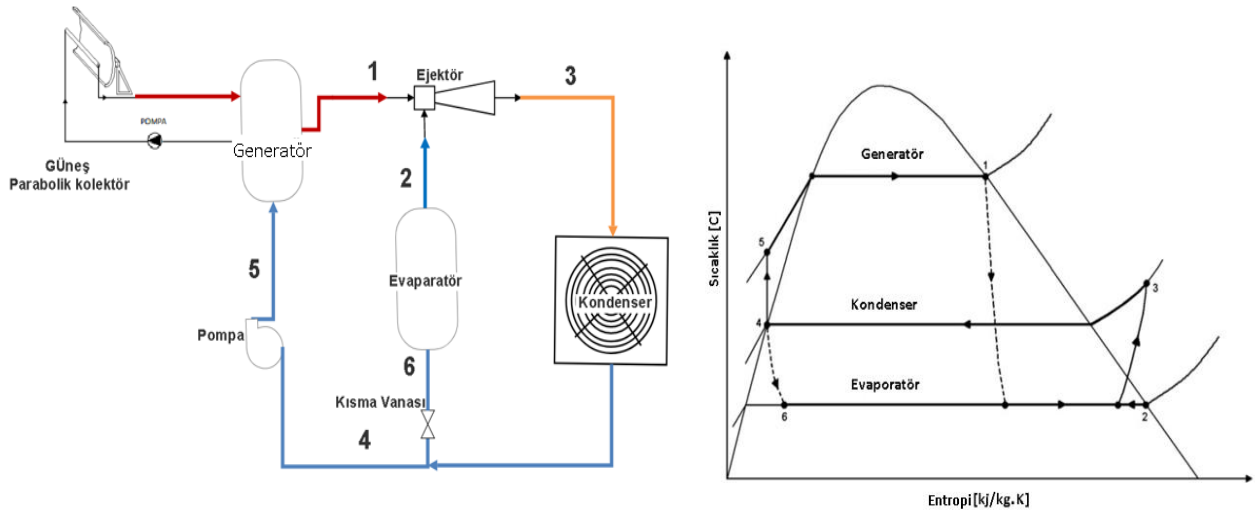


Şekil 1. Yemen güneşlenme potansiyeli, (solargis,2022)

Bu potansiyel büyük ölçekli güneş enerjisi projelerinin hayata geçirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması için önemli bir fırsat sunmaktadır. Güneş enerjisi projelerinin geliştirilmesi, enerji güvenliğini sağlamak, enerji maliyetlerini düşürmek ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek adına önemli bir adımdır. Yemen güneşlenme potansiyeli Şekil 1’de verilmiştir.

## 1.2. Sistemin Genel Tanımı

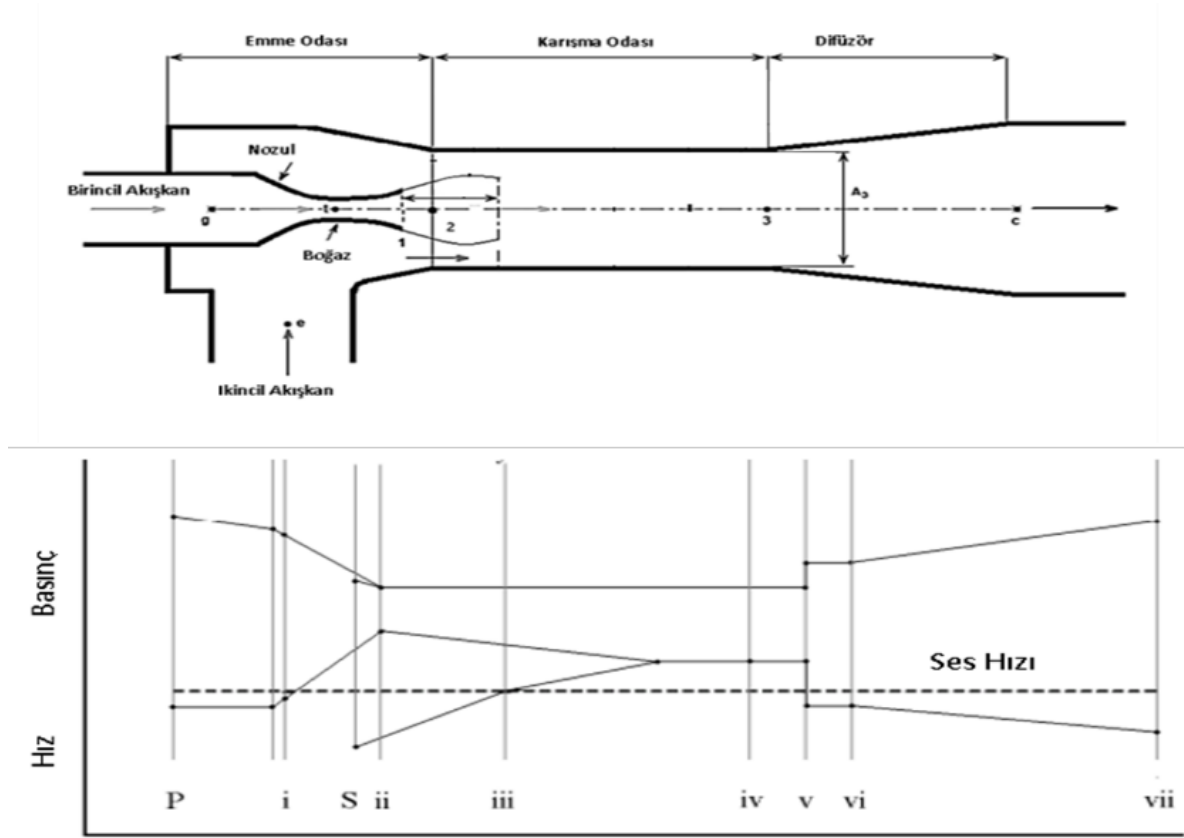
Bu çalışmada, ejektör soğutma sistemlerin güç devresinde dışardan güneş enerji kullanılmıştır. Sağlanan enerji ile jeneratörde yüksek basınçlı buhar sağlanır ve ejektöre gönderilir. Ejektöre gönderilen buhar, ejektör memesinden yüksek hızda çıkarken sağladığı basınç düşümü ile evaporatördeki soğutucu akışkan emilir. Bu iki akışkan karışım odasında karışır ve kondensere girerek çevreye ısı verir. Soğutma devresinde, genişleme vanasından geçirilerek basıncı düşürülen sıvı-buhar karışımı halinde yeniden evaporatöre girer ve ısı çekerek buharlaşır. Bu işlemler sürekli tekrarlanır. Şekil 2’de güneş enerjili ejektör soğutma sistemi ve TS şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. Güneş enerjili ejektör soğutma sistemi ve TS şeması [4]

Ejektörün yapısının, akışkanın hız ve basınç üzerine etkisi bulunmaktadır. Jeneratörden gelen akışkan birincil nozuldan yüksek hızla çıkarak evaporatörden düşük hızla gelen akışkan ile karışmaktadır. Ejektör girişinden geçen birincil akışkan yüksek basınçta olduğunda ikincil akışkan ise daha düşük basınçta sahip bulunmaktadır. Emme bölgesinden geçen akışkan basıncının tersine hız eğrisinde görüldüğü gibi birincil akışkan ses üstü hızında ve ikincil akışkan ile karışma bölgesine gelmeden önce ses üstü hızda ilerler ve boğulma olayının neticesi ile hızı ses hızından daha düşük olmaktadır. Karışım ve difüzör bölgesinde genişlemeden dolayı akışkanın basıncı artırırken hızı azalmaktadır [4].





Şekil 3. Ejektör kesiti ve basınç ve hız profilleri [5,6]

Şekil3'te Ejektöre (1) noktasından geçer ve (2) noktasında jeneratörden ve evaporatörden gelen akışkanlar karışmaktadır. Ejektörde karıştırılan akışkanlar sabit basınçta ve artan sıcaklık ile ejektörün boğazına gelmektedir. Akışkan (3) noktaya gelene kadar şok olayın neticesinden Rayleigh ve Fanno eğrilerini oluşturmaktadır. Difüzör çıkışından (c) sabit basınç ile kondensere gider ve yoğuşur. Yoğuşan akışkan evaporatör ve jeneratöre giderek çevremi tamamlar.

## 2. MATERYAL ve METOD

Bu Çalışmada, yapılacak analiz ve hesaplanmalar için Sireng Enerji Firması tarafından üretilen SİRENG-GÜNPOT 2500 modeli parabolik oluk kolektörler referans olarak alınmıştır. Tabo1.'de SİRENG-GÜNPOT 2500 modeli parabolik oluk kolektörün teknik özellikleri verilmiştir.

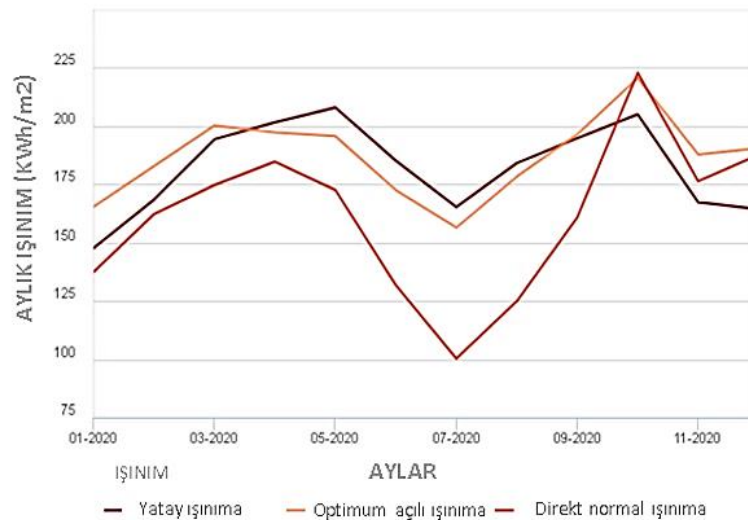
**Tablo 1.** SİRENG-GÜNPOT 2500 modeli teknik özellikleri [7]

SİRENG-GÜNPOT 2500 modeli	
Kollektör Uzunluğu	12 m
Kollektör Genişliği	2,5 m
Alıcı Boru Çapı	25-50 mm
Termal Verim	67%
Çalışma Sıcaklığı	150-300 °C
Optik Verim	>75%
Yansıtıcılık	95%
Isı Transfer Ortamı	Su Buharı

Bu çalışma Aden şehri bölgesine odaklanmaktadır. Aden, Aden Körfezi'nin kıyısında ve Bab-el-Mandeb'in doğusunda konumlanmaktadır. Aden'in enlem değeri 12.80 ve boylam değeri 44.90'dur. Aden bölgesi yüksek bir yıllık güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Geniş bir sahil şeridine ve bol güneş ışığı alan bir konuma sahip olması, güneş enerjisi üretimi için etkili bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, bölge genellikle yaz aylarında yüksek güneş ışınlarına maruz kalmakta ve kurak bir iklimi bulunmaktadır.

Bu çalışmada analizi yapılan veriler iki kısma ayrılmıştır. Aden şehrinin yıllık ışıınım değerlerinin (en yüksek ve en düşük ışıınım) değişik aylar için analizi yapılmış. Ayrıca, sıcaklığa göre (en yüksek ve en düşük sıcaklık aylar) analizi yapılmıştır. SAM programdan alınan verileri 2020 yılın gerçek verilerine dayanarak çalışmalar yapılmıştır.

Seçilen bölgenin yıllık ortalama sıcaklıkları yüksek olduğu için güneş panelleri için ideal bir ortam sağlar. Güneş aylık ışıınımı değerleri şekil 4'te gösterilmektedir.



**Şekil 4.** Aden'de aylık güneş ışıınım

## 2.1.Sistemin Teorik Hesaplaması

### 2.1.1. Güneş Parabolik Kollektörün Optik ve Termodinamik Analizi

Optik verim, alıcı tarafından emilen enerjinin, kollektöre açıklığına gelen enerjiye oranı olarak tanımlanır [8].

$$\eta_o = \rho\tau\alpha\gamma \left[ (1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta) \right] \quad (1)$$

Burada, ( $\tau\alpha$ ): yutma-geçirime çarpımı

Vakum nedeniyle alıcıdan taşınım ile ısı kaybı ve cam kılıfı absorbe ihmal edilirse, ısı kaybı QL olarak yazılabilir [9].

$$Q_L = UA_{ab,e}(T_{ab,e} - T_a) \quad (2)$$

Toplam ısı kaybı katsayısı (U) şu şekilde verilir,

$$U = \left[ \frac{D_{ab,e}}{(h_{c,co-a} + h_{r,co-a})D_{co,e}} + \frac{1}{2k_{co}} \ln\left(\frac{D_{co,e}}{D_{co,i}}\right) + \frac{1}{h_{r,ab-co} + h_{c,ab-co}} \right]^{-1} \quad (3)$$

Termal performans, yararlı enerji cinsinden verilmiştir. Kazanç, alıcının ısı kaybı ve ısı verim. Bu kullanıcıya verilen faydalı enerji aşağıdaki denklemlerle verilir: [10]

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

Burada m kütle akış hızı, cp ısı transfer akışkanının özgül ısı kapasitesi, Tout ısı transfer akışkanı çıkış sıcaklığı ve Tin soğurucu boru giriş sıcaklığıdır.

Ayrıca yararlı enerji şekilde elde edilebilir.

$$Q_u = A_a F_R [G_t(\tau\alpha)_n - U_L(T_i - T_a)] \quad (5)$$

Buradan, termal verim, Qu'nun enerji girdisine, gelen enerji (Ao I) bölünerek elde edilir (8).

$$\eta_g = \frac{Q_u}{IA_o} \quad (6)$$

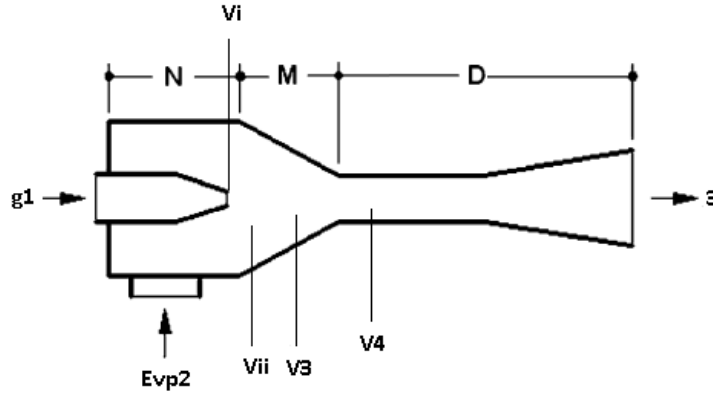
Güneş kollektörlerinin verimliliği ( $\eta_{col}$ ) tipik olarak aşağıdaki genelleştirilmiş denklem ile ifade edilir:

$$\eta_{col} = a - b \frac{\bar{T}_{HTF} - T_{amb}}{i_{sol}} - c \left( \frac{\bar{T}_{HTF} - T_{amb}}{i_{sol}} \right)^2 \quad (7)$$

Tamb'nin ortam sıcaklığı ve THTF'nin kollektörlerden geçerken ortalama HTF sıcaklığı olduğu ifade edilir. Güneş enerjisiyle çalışan soğutma uygulamalarında en yaygın olarak üç kollektör tipi kullanılmaktadır a, b ve c sabitleri toplayıcı tipine bağlıdır.[11]

### 2.1. 2. Ejektörlü Soğutma Sisteminin Teorik Analizi

Bir ejektör soğutma çevriminde, ejektör kritik ve analizde önemli bir bileşendir bulmaktadır. Güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemin termodinamik modellemesini için ejektörün performansını ve soğutma çevrenin termodinamik birinci kanununa göre değerlendirmektir. Bu çalışmada ejektör analizinde dikkate alınacak ve kullanılacak model sabit basınçlı karıştırma modeli olacaktır.



Şekil 5. Ejektörün şematik üzerinde hızları (12)

Analiz için gerekli olan kütle, momentum ve enerji dengeleri temel denklemler uygulanarak elde edilmektedir.

Devreye giren yüksek basınçlı sıvı akışkan (soğutucu akışkan), dışarıdan sağlanan enerji ( $Q_g$ ) ile kazanda veya jeneratörde buharlaştırılır. Jeneratörden ısı girişi hesaplaması için şu şekilde elde edilir:

$$Q_g = m_g \cdot (h_2 - h_1) \quad (8)$$

Evaporatör enerji girişi ise, şu şekilde verilir.

$$Q_e = m_e \cdot (h_3 - h_6) \quad (9)$$

Bu iki akışkanların, direncin olduğu ve akışın yavaşlatıldığı ejektördeki difüzöre girmeden önce karıştırma odasında karışır. Daha sonra yoğuşturucuya giren bu karışım, ortama ısı ( $Q_c$ ) vererek yoğuşur. Kondenserin ortama ısı atımı şu şekilde hesaplanır:

$$Q_c = m_c \cdot (h_4 - h_5) \quad (10)$$

Kütle akış hızı dengesi aşağıdaki gibidir:

$$m_c = m_e + m_g \quad (11)$$

Kütle korunum denklemden faydalanarak Akış sürüklenme oranı ( $\omega$ ), Denklem (12)'de verildiği gibi hesaplanabilir (13):

$$\omega = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} \quad (12)$$

$$\omega = \frac{h''_g - h''_c}{h''_c - h''_e} \quad (13)$$

Burada  $h''_g$  , Buhar durumunda entalpisi.

Bir soğutma çevriminin performansı genellikle, bir birim enerji girişi için çıkış soğutma gücü olan performans katsayısı ile ifade edilir:

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W} \quad (14)$$

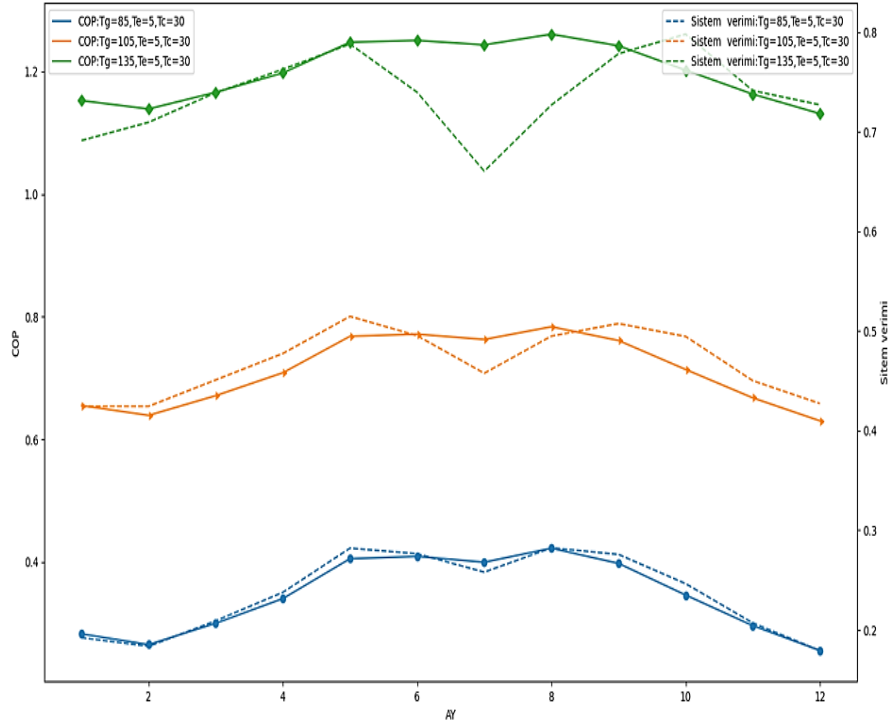
Sistem verimi şu formül ile elde edebilmektedir: (14)

$$\eta_{sys} = \eta_{col} \times COP \quad (15)$$

### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLAR ve TARTIŞMA

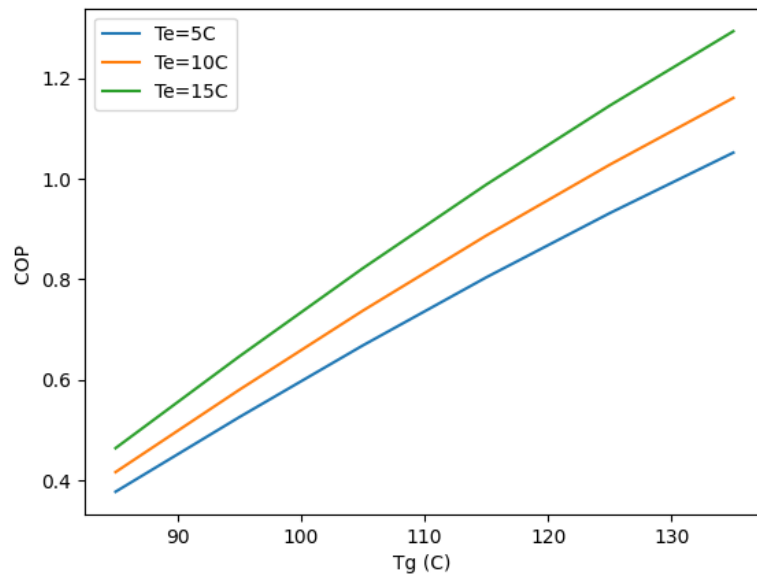
Bu çalışmada analizi yapılan veriler iki kısma ayrılmıştır. Aden şehrinin yıllık ışıınım değerlerinin (en yüksek ve en düşük ışıınım) değişik aylar için analizi yapılmış. Ayrıca, sıcaklığa göre (en yüksek ve en düşük sıcaklık aylar) analizi yapılmıştır. SAM programdan alınan verileri 2020 yılının gerçek verilerine dayanarak çalışmalar yapılmıştır. Python dilinde yazılan program vasıtasıyla teorik analiz yapılmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 1’de ki parabolik kollektör özellikleri kullanılmıştır. Kollektörlerin giriş ve çıkış sıcakların farkı  $\Delta T=10$  °C alınmıştır. Ayrıca kollektörleri bağlayan borular yalıtılmış olup, borularda ısı kayıpları ihmal etmiştir.

Sonuçlarda Aden şehrindeki aylara göre değişimi gösterilmektedir. Sonuçlardan aylık COP değerlerinin, jeneratör sıcaklığı artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Burada, en yüksek COP değerinin Ağustos ayında, en düşük değer ise Aralık ayında olduğu görülmektedir. Şekil 6’da Aden için farklı  $T_g, T_e, T_c$  sıcaklarına göre sistemin verimi ve COP değerlerinin aylara göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6. Aden için farklı Tg, Te, Tc sistemin verimi ve COP'nin aylara göre değişimi

Güneş enerjisi ile çalışan ejektörlü soğutma sisteminde farklı jeneratör ve evaporatör sıcaklıklarıyla, performans katsayısı (COP) değişimleri incelenmiştir. Şekil 7'de, evaporatör sıcaklığı Te'nin 5, 10 ve 15 °C olduğu durumlarda, jeneratör sıcaklıkları ve COP değerleriyle birlikte değişimi gösterilmektedir. Sonuçlar, evaporatör ve jeneratör sıcaklıkları yükseldikçe, güneş enerjisi ile çalışan ejektörlü soğutma sisteminin performans katsayısının arttığı görülmüştür.



Şekil 7. Te ve Tg COP ile değişim grafiği

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, güneş enerjisi kaynaklı ejektörlü soğutma sistemi Yemen örneğinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yemen'deki enerji sorununa özellikle sanayi sektörüne bir çözüm olabilecek güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kullanımına dayalı sistemler bu çalışmanın odak noktasını oluşturmuştur. Güneş parabolik kollektör ve ejektörlü soğutma sistemi, Yemen'deki enerji sorununa çözüm olabilecek önemli bir teknolojidir. Zira Yemen gibi özellikle güneş ışımından zengin ve soğutma ihtiyacının büyük olduğu bölgelerde bu sistemler, temiz ve sürdürülebilir enerji sağlamak için idealdir.

Çalışmada, güneş enerjisi destekli ejektörlü soğutma sisteminin performansı, COP ve sistem verimi üzerinden değerlendirilmiştir. Bu değerler, sistemin etkinliği ve enerji kullanım verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Yemende güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemleri ile ilgili literatürde hiçbir çalışma bulunmadığından bir karşılaştırma yapılamamıştır. Bu çalışma yemende güneş enerjili ejektörlü soğutma sistemi ile ilgili yapılmış olan ilk çalışmadır ve daha sonra yapılacak olan çalışmalara öncülük edecektir. Bu çalışmanın elde ettiği sonuçlar, gelecekteki çalışmalarda daha ileri araştırmaların yapılmasını ve sistemin performansının optimize edilmesini sağlayabilecektir.

#### Teşekkür

Bu araştırma için bizleri destekleyen, Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM Merkezine Teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- [1] BP Energy Outlook , [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>. [Accessed: July 08, 2023].
- [2] Hadwan, M. and Alkholidi, A. *Solar power energy solutions for Yemeni rural villages and desert communities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 838-849, 2016.
- [3] Sufian, T. *Post Conflict Reconstruction Strategy Study for the Electricity and Energy Sector of Yemen*, 2019.
- [4] Meyer, A. J., Harms, T. M., and Dobson, R. T. *Steam jet ejector cooling powered by waste or solar heat*. Renewable Energy, vol.34(1), pp. 297-306, 2009.

- [5] Chunnanond, K., and Aphornratana, S. *Ejectors: applications in refrigeration technology*. Renewable and sustainable energy reviews, vol. 8(2), pp. 129-155, 2004.
- [6] Sumeru, K., Nasution, H., & Ani, F. N. *A review on two-phase ejector as an expansion device in vapor compression refrigeration cycle*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16(7), pp. 4927-4937, 2012.
- [7] Arslan, Ö. *Yerleşkeler İçin Odaklamalı Güneş Enerji Sistemlerinden Enerji İhtiyacının Karşıllanması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, 2019.
- [8] Kalogirou, S. A. *Solar thermal power systems*. Sol. Energy Eng. Pp. 521-552, 2014.
- [9] Goswami, D. Y. *Principles of solar engineering*. CRC Press, 2022.
- [10] Mwesigye, A., and Meyer, J. P. *Optimal thermal and thermodynamic performance of a solar parabolic trough receiver with different nanofluids and at different concentration ratios*. Applied Energy, vol. 193, pp. 393-413, 2017.
- [11] Braimakis, K. *Solar ejector cooling systems: A review*. Renewable Energy, vol. 164, pp. 566-602, 2021.
- [12] Yu, J., Chen, H., Ren, Y., & Li, Y. *A new ejector refrigeration system with an additional jet pump*, Applied Thermal Engineering, vol. 26(2-3), pp. 312-319, 2006.
- [13] Khattab, N. M., & Barakat, M. H. *Modeling the design and performance characteristics of solar steam-jet cooling for comfort air conditioning*. Solar Energy, vol. 73(4), pp. 257-267, 2002.
- [14] Varga, S., Oliveira, A. C., Diaconu, B. *Numerical Assessment of Steam Ejector Efficiencies Using CFD*. International Journal of Refrigeration, vol. 32(6), pp. 203–1211, 2009.





# Süleyman Demirel Üniversitesi

## YEKARUM e-DERGİ

### (Journal of YEKARUM)



Cilt 8, Sayı 1, 13-19, 2023  
E - ISSN:1309-9388

## Olivin Atık Tozunun Pozolanik Özelliğinin Araştırılması

Yusuf Tahir ALTUNCI<sup>1\*</sup>, Hakan CEYLAN<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-5418-7742), yusufaltunci@isparta.edu.tr

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8099-9819), hakanceylan@isparta.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 11/07/2023 ve Kabul Tarihi 16/07/2023)

### ÖZET:

Dümit metamorfik ve magmatik kayaç türleri arasında yer alan bir kayaçtır. Olivin ise silikat grubuna ait bir mineral olmakla birlikte dümitin ana bileşenlerindedir. Olivin dayanıklı, sert ve çevre dostu bir malzeme olması nedeniyle refrakter sanayinde, döküm sanayinde, cam sanayinde, metalürji sanayinde, çevresel uygulamalarda, tarım ve birçok alanda kullanılmaktadır. Olivinin, CO<sub>2</sub> salınımını azaltıcı etkisi ve alkali silika reaksiyonu (ASR) açısından sakıncasız olması kimyasal yapısının pozolanik özellik gösterip göstermediği açımdan önemlidir. Yapılan bu çalışmada; Denizli bölgesinden temin edilen olivin atığı tozunun pozolanik özelliği araştırılmıştır. Çalışmanın sonunda malzemenin pozolanik özellik göstermediği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dümit, Olivin, Pozolanik özellik

## Investigation of Pozzolanic Properties of Olivine Waste Powder

### ABSTRACT

Dunite is a rock that lies between metamorphic and igneous rock types. Olivine is a mineral belonging to the silicate group and is one of the main components of dunite. Olivine-resistant, tough and eco-friendly material because it is refractory industry, foundry industry, Glass Industry, metallurgy industry, environmental applications, agriculture, and are used in many fields. The fact that olivine reduces CO<sub>2</sub> emissions and is unobjectionable in terms of alkaline silica reaction (ASR) is important in terms of whether its chemical structure shows pozzolanic properties. In this study; The pozzolanic property of the region of Denizli obtained from olivine dust was investigated. At the end of the study, it was determined that the material did not show pozzolanic properties.

**Keywords:** Dunite, Olivine, Pozzolanic property

\* Sorumlu yazar E-mail: yusufaltunci@isparta.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Olivin, kimyasal formülü  $(Mg, Fe)_2 SiO_4$  şeklinde olan bir silikat mineralidir [1]. Genellikle yeşil renklidir. Olivin; refrakter malzeme üretiminde, demir-çelik endüstrisinde, döküm uygulamalarında, ağırlık uygulamalarında, yol yüzey kaplamalarında, çevresel uygulamalarda, tarım ve bahçecilikte, atıkların arındırılması ve yok edilmesinde, dekorasyon uygulamalarında vb. birçok alanda kullanılan ve yaygın olarak bulunan önemli bir mineraldir [1].

Dünya üzerindeki olivin tesisleri; büyükten küçüğe doğru, Norveç-Aheim, İtalya-Torino, İspanya-Galicia, İsveç, A.B.D.-Washington ve North Carolina, Yeni Zelanda, Meksika, Güney Afrika, Rusya, Avusturya, Pakistan, İran ve eski Yugoslavya bölgelerindedir [2]. Dünyadaki yıllık ortalama olivin üretim miktarları Tablo 1’de verilmiştir [3].

**Tablo 1.** Dünyadaki yıllık ortalama olivin üretim miktarları

Ülke	Üretim miktarı (ton)	Ülke	Üretim miktarı (ton)
Norveç	3500000	Tayvan	400000
Japonya	2000000	Brezilya	350000
İspanya	700000	A.B.D.	200000
Güney Kore	500000	Meksika	150000
Çin	425000	İtalya	100000
Avusturya	20000	Türkiye	590000

Ülkemizde ise özellikle Adana, Antalya, Bursa, Konya, Isparta, Denizli, Muğla, Kütahya, Tekirdağ bölgelerinde olivin yatakları mevcuttur.

Olivin madenlerinin çıkarılması ve işlenmesi sürecinde açığa çıkan toz atıkların endüstriyel kullanıma sunulması ve ekonomiye kazandırılması önemli bir husustur. Bu atıklar endüstriyel atık olarak değerlendirilir ve endüstride kullanılması çevresel etki açısından önem arzeder. Olivin atık tozunun hem kimyasal içeriği hem de ASR açısından sorunsuz malzeme olması, çimento ve beton içerisinde sorunsuz bir şekilde kullanılabilmesi açısından önemlidir[4].

Endüstriyel atıkların çimento ve beton üretiminde değerlendirilmesi çevresel ve ekonomik katkılar sağlar. Puzolanik etki gösteren atıkların kullanımı çimento tüketimini azaltacağı için inşaat sektörünün karbon ayak izini de azaltacaktır. Ekonomik maliyeti yüksek olan çimento üretiminin azalması da ekonomiye katkı sağlaması açısından önemlidir. Aynı

zamanda çimento ve beton maliyetlerinin düşmesini sonucunda inşaat maliyetlerinde de azalma oluşacaktır.

Literatürde; andezit tozunun [5], doğal ve kalsine pilekinin [6], asidik ve bazık karakterli tüflerin [7], perlitin [8], Isparta tüfünün [9], tuğla ununun [10], tezek külünün [11], analsimin [12], öğütülmüş atık cam tozunun [13], mikrodalga ısı işlemi uygulanan kaolinin [14], zeolit in [15] vb. malzemelerin puzolanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Çalışmamızda ise endüstriyel atık olarak değerlendirilen olivin atığı tozunun puzolanik özelliği araştırılmıştır. Bu amaçla puzolan olarak kullanılan uçucu küllere ait standartlar ve puzolan standartları belirlenmiş ve bu standarttaki değerlere göre kıyaslama yapılmıştır.

## 2. MATERİYAL ve METOD

Çalışmada Denizli bölgesinden temin edilen olivin atığı tozunun puzolanik özelliğini belirlemek amacıyla; olivin atığı tozunun kimyasal içeriği, özgül ağırlığı, özgül yüzey alanı ve aktivite endeks değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler TS 25 doğal puzolan [16], TS EN 450 uçucu kül [17] ve ASTM C 618-12 puzolan [18] standartlarında belirtilen sınır değerler ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Denizli bölgesinden temin edilen olivin atığı tozu elendikten sonra kimyasal analiz işlemine tabi tutulmuştur. Olivin atığı tozuna ait kimyasal analiz sonucu Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Olivin atığı tozuna ait kimyasal analiz sonucu

Kimyasal bileşen	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	LOI
Oran (%)	30.19	14.71	6.90	44.15	0.02	0,41	3.53

Oivin atığı tozunun kimyasal içeriği; TS 25 doğal puzolan [16] standardına göre karşılaştırılarak Tablo 3’de, TS EN 450 [17] ve ASTM C 618-12 [18] standardına göre karşılaştırılarak Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Olivin atığı tozunun TS 25 standardına göre karşılaştırılması

Parametreler	Birim	Sınır değeri	Olivin atığı tozu
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≤ 70	44.90
SO <sub>3</sub>	%	≤ 3	0.02
Özgül ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	-	3.20
Özgül yüzey	cm <sup>2</sup> /g	≤ 4000 +- % 25	3310
Kızdırma kaybı	%	-	3.53
45 µ elek üstü	%	-	19.16
28 günlük aktivite endeksi	%	≥ 75	73
90 günlük aktivite endeksi	%	≥ 85	80

**Tablo 4.** Olivin atığı tozunun TS EN 450 ve ASTM C 618-12 standardına göre karşılaştırılması

Parametreler	Birim	Olivin atığı tozu	ASTM C 618-12	TS EN 450
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	44.90	≥ 70-50	≥ 70
SO <sub>3</sub>	%	0.02	≤ 5	≤ 3
K <sub>2</sub> O	%	-	≤ 1.5 <sup>[1]</sup>	≤ 5 <sup>[1]</sup>
Na <sub>2</sub> O	%	0.41	≤ 1.5 <sup>[1]</sup>	≤ 5 <sup>[1]</sup>
MgO	%	44.15	-	≤ 4
Kızdırma kaybı	%	3.53	≤ 6.0	≤ 5-9
45 µ elek üstü	%	19.16	≤ 34	≤ 40
Özgül ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	3.20	-	-
Özgül yüzey	cm <sup>2</sup> /g	3310	-	-
28 gün. aktivite en.	%	73	≥ 75	≥ 75
90 gün. aktivite en.	%	80	-	≥ 85

<sup>[1]</sup> Eşdeğer alkali madde içeriği (K<sub>2</sub>O + 0.658 Na<sub>2</sub>O)

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Denizli bölgesinden temin edilen olivin atığı tozunun, puzolanik özelliğini belirlemek için; TS 25 [16], TS EN 450 [17] ve ASTM C 618-12 [18] standartlarına göre yapılan deney sonuçlarıyla ilgili olan önemli hususlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- $SO_3, K_2O, Na_2O, MgO$ , kızdırma kaybı ve  $45 \mu$  elek üstü değerlerinin, üç standarda göre değerlendirildiğinde, sınır değerleri sağladığı belirlenmiştir.
- 28 ve 90 günlük aktivite endeks değerlerinin sınır değerlere yaklaştığı ancak sınır değerleri sağlayamadığı tespit edilmiştir.
- $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  kütle toplamının, üç standarda göre değerlendirildiğinde, en az % 70 olma şartını sağlayamadığı tespit edilmiştir.
- MgO miktarının TS EN 450’de belirtilen sınır değerden yaklaşık 11 kat, TS EN 197-1 de belirtilen sınır değerden de yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Bu bilgiler ışığında, çalışmada kullanılan olivin atığı tozunun, temin edildiği haliyle beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılması uygun görülmemektedir.
- Çalışmada kullanılan olivin atığı tozuna kalsinasyon işlemi uygulandıktan sonra puzolanik özelliğın bir miktar daha artacağı düşünülmektedir. Ancak önemli olan, kalsinasyon işlemine gerek kalmadan malzemenin puzolanik özellik göstermesidir.
- Farklı bölgelere ait olivin atığı tozlarının puzolanik özelliğının araştırılması önerilir.
- Puzolanik özelliğı araştırılacak farklı malzemelerin ayrıca serbest CaO ve reaktif  $SiO_2$  açısından da değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

### **Araştırma ve Yayın Etiğı Beyanı**

Çalışma, araştırma ve yayın etiğıne uygundur.

### **KAYNAKLAR**

- [1] Altuğ, C. Türkiye’deki Olivin Mineralinin Fiziksel ve Optiksel Özelliklerinin Farklı Tekniklerle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi 2019.
- [2] Genç, C., 2000. Olivin Raporu. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, 1-7.
- [3] Örgün, Y. ve Erarslan, C., (2012). 21. Yüzyılda Olivin ve Türkiye'nin Olivin Potansiyeli. Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi, 23, 62-75.

- [4] Altuncı, Y. T., & Ceylan H. (2023). Olivin Agregalı Harçların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Mekanik Davranışları. UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 5(1): 1-10.
- [5] Ceylan, H., & Davraz, M. (2013). Andezit Kesim Artıklarının Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması. Scientific Mining Journal, 52(3): 3-8.
- [6] Kara, İ. B. (2021). Doğal Ve Kalsine Pilekinin Karakterizasyonu, Puzolanik Aktivitesi ve Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 555-570.
- [7] Aslan, Y., & Gürocak, Z. (2022). Asidik ve Bazik Karakterli Tüflerin Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması: Elazığ ve Gümüşhane Yörelerinden Örnek Bir Çalışma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1024-1035.
- [8] Bulut, Ü., & Tanaçan, L. (2011). Perlitin puzolanik aktivitesi. *İTÜDERGİSİ/a*, 8(1).
- [9] Ceylan, H. (2020). Isparta Tüfünün Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 10(2), 1-6.
- [10] Şimşek, O., & Çiftci, M. M. (2006). Tuğla Ununun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği. *Politeknik Dergisi*, 9(4), 325-329.
- [11] Altuncı, Y. T., & Öcal, C. (2021). Tezek Küllü İkameli Çimento Harçlarının Mühendislik Özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 24-31.
- [12] Akgün, Y., & Yazıcıoğlu, Ö. F. (2017). Analsim'in Puzolanik Aktivitesi ve Priz Sürelerinin Belirlenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 135-147.
- [13] Orhan, E., & Esen, Y. (2017). Öğütülmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Puzolanik Aktivitesi ve Yarmada Çekme Dayanımının Belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 12(2), 108-116.
- [14] Gültekin, A., & Ramyar, K. (2022). Mikrodalga Isıl İşlemi Uygulanan Kaolinin Puzolanik Aktivitesinin İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 758-765.
- [15] Aruntaş, H. Y., & Beycioğlu, A. (2014). Makale/Research Paper Puzolanik Zeolit (Klinoptilolit) Katkılı Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Science and Engineering*, 1(2), 57-67.
- [16] TS 25, 2008. Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Yusuf Tahir ALTUNCI, Hakan CEYLAN, “Olivin Atık Tozunun Pozolanik Özelliğinin Araştırılması”, Yekarum e-Dergi, 8 / 1 (2023) 13-19

- [17] TS EN 450, 2013. Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [18] ASTM 618-12, 1994. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, USA.



# Süleyman Demirel Üniversitesi

## YEKARUM e-DERGİ

### (Journal of YEKARUM)



Cilt 8, Sayı 1, 20-31, 2023  
E - ISSN:1309-9388

## Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi

Halil MUTLUBAŞ<sup>1\*</sup>, Zafer Ömer ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Organik Kimya, İzmir, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-8079-5290), halil.mutlubas@hotmail.com

<sup>2</sup> Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Eczacılık Fakültesi, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-8362-3136), ozdemirz@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 25/05/2023 ve Kabul Tarihi 16/07/2023)

### ÖZET:

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı gelecekte önemli bir rol oynayabilir. Geleneksel yakıtların yerini alabilecek ve temiz enerji kaynaklarına yönelik bir alternatif olabilecek hidrojen, birçok sektörde kullanılabilir. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilerek depolanabilir ve daha sonra enerji üretiminde kullanılabilir. Elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların depolanması ve taşınması için kullanılabilir. Hidrojenin kullanımı enerji sektöründe daha fazla temiz enerjiye erişimi sağlayabilir. Hidrojen ayrıca ulaşım sektöründe de kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı araçlar, benzinli ve dizel araçlara alternatif olarak kullanılabilir. Bu araçlar, sıfır emisyonlu taşımacılık için bir seçenek olabilir. Bununla birlikte, hidrojenin depolanması, taşınması ve dağıtım gibi teknolojik zorluklar hala var ve bu zorlukların ele alınması gerekiyor. Hidrojenin enerji sektöründe kullanımı, aynı zamanda enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi çevresel faydalar da sağlayabilir. Hidrojen, fosil yakıtlara kıyasla daha az çevresel etkiye sahip olduğu için, enerji sektöründeki dönüşümün bir parçası olarak daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir rol oynayabilir. Sonuç olarak, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı, temiz enerji kaynaklarına yönelik bir alternatif olarak gelecekte önemli bir rol oynayabilir. Ancak, hidrojenin potansiyelinden tam olarak yararlanmak için teknolojik zorlukların ele alınması ve hidrojenin daha yaygın olarak kullanımı için altyapının geliştirilmesi gerekiyor.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrojen, Hidrojen Ekonomisi, Yakıt Hücresi.

## Uses of Hydrogen and Hydrogen Economy

### ABSTRACT

The use of hydrogen as an energy carrier may play an important role in the future. Hydrogen, which can replace traditional fuels and be an alternative to clean energy sources, can be used in many sectors. Hydrogen can be produced from renewable energy sources and stored and then used in energy production. Hydrogen produced by electrolysis can be used to store and transport renewable resources such as solar and wind energy. The use of hydrogen could provide access to more clean energy in the energy sector. Hydrogen fueled vehicles can be used as an alternative to gasoline and diesel vehicles. These vehicles could be an option for zero emission transport. However, technological challenges such as the storage, transportation and distribution of hydrogen still exist and need to be addressed. The use of hydrogen in the energy sector can also provide environmental benefits such as energy efficiency and reduction of carbon emissions. As hydrogen has less environmental impact than fossil fuels, it can play an important role as part of the energy sector transformation for a more sustainable future. As a result, the use of hydrogen as an energy carrier may play an important role in the future as an alternative to clean energy

\* Sorumlu yazar E-mail: halil.mutlubas@hotmail.com



sources. However, to fully exploit hydrogen's potential, technological challenges need to be addressed and the infrastructure developed for more widespread use of hydrogen.

**Keywords:** *Hydrogen, Hydrogen Economy, Fuel Cell.*

## 1. GİRİŞ

Enerji, yaşamın sürdürülebilirliği için gerekli olan bir unsurdur. Dünya genelinde nüfusun sürekli artması enerji tüketimini hızlandırmış ve enerjiye olan talebi arttırmıştır. Günümüzde ağırlıklı olarak kullanılan fosil kökenli yakıtların tükenebilir olması, CO<sub>2</sub> salımı yapması ve bölgesel kaynaklar olmasından dolayı yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir kaynaklar kullanılmaya başlanmış ve yenilenebilir teknolojiler her geçen gün gelişmeye başlamıştır [1].

Yenilenebilir kaynakların kullanımı esnasında bazı kısıtlamalar bulunmakla birlikte, bu kısıtlamalar hidrojen kullanımı ile giderilebilmektedir. Hidrojen tek başına kullanılan bir kaynak değildir. Diğer enerji kaynakları ile kullanılan ve genellikle enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilen hidrojen; ulaşım alanında, güç tesislerinde, yakıt hücrelerinde, içten yanmalı motorlarda kullanılır [2].

Hidrojenin fiziksel özellikleri; renksiz, kokusuz ve tadı olmayan bir elementtir. Toksik özelliği bulunmaz. Ametaldir ve yanıcı bir gazdır. Hidrojen gazı 1 atm basınçta -252,77 °C sıvı forma geçer. Sıvı formda bulunan hidrojenin hacmi, gaz fazın 1/700 kat hacmine denk gelir. Hidrojenin kimyasal özellikleri ise; oksijen ile birleşerek yanıcı bir reaksiyon oluşur. Ürün olarak su meydana gelir. Birçok ametal ile kovalent bağ yaptığı için doğada moleküler yapıda bulunur [3].

Doğada en çok bulunan elementler arasında yer alan hidrojen çeşitli sektörlerde kullanılır. Bunlar arasında, endüstriyel üretim süreçleri, evlerde ve iş yerlerinde ısıtma, enerji depolama ve taşıma yer alır. Ayrıca, hidrojen yakıtlı araçlar, geleneksel benzinli ve dizel araçlara alternatif olarak kullanılabilir ve sıfır emisyonlu taşımacılık için bir seçenek olabilir [4].

Hidrojen, enerji depolama ve taşıma için bir seçenek olabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinin düzenli aralıklarla üretilebildiği ancak talep edilmediği zamanlarda depolanması gerekmektedir. Hidrojen, bu amaçla kullanılacak bir enerji depolama yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen, elektrik enerjisine dönüştürülebilir ve daha sonra hidrojen yakıt pilleri aracılığıyla elektrik enerjisi olarak geri dönüştürülebilir [5].

Ancak, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımını hala bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Hidrojenin üretimi, depolanması ve taşınması, teknolojik olarak zorlu bir süreçtir. Hidrojen, endüstriyel işlemler veya elektroliz yoluyla üretilir, ancak bu süreçlerin enerji yoğunluğu yüksektir ve genellikle fosil yakıtların kullanımını gerektirir [6]. Bu çalışmada hidrojen üretim yöntemlerinden, hidrojen yakıt hücrelerinden ve hidrojen ekonomisinden bahsedilecektir.

## 2. HİDROJEN ÜRETİMİ







Hidrojen, temiz enerji kaynaklarına yönelik alternatif bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, hidrojenin yanma sonucu sadece su ve enerji üretmesidir. Hidrojen gazının üretimi, birçok farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, hidrojen gazının üretildiği kaynağa, üretim prosesi ve kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak değişmektedir.

Hidrojen gazının üretim yöntemleri arasında, su elektrolizi, hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, biyokütle gazlaştırma ve fotokatalitik hidrojen üretimi yer almaktadır. Su elektrolizi, elektrik enerjisi kullanarak sudan hidrojen gazı üretmektedir [7]. Hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, doğal gaz, nafta veya LPG gibi hidrokarbon kaynaklarından hidrojen gazı üretmektedir [8]. Biyokütle gazlaştırma, organik atıkların yakılması sırasında hidrojen gazı üretmektedir [9], [10]. Fotokatalitik hidrojen üretimi ise güneş enerjisi kullanarak hidrojen gazı üretmektedir [11]. Su elektrolizi, hidrojen gazı üretimi için en yaygın kullanılan yöntemdir [12]. Ancak, su elektrolizi sırasında kullanılan elektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmadığı sürece hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak konumunu zayıflatmaktadır [13].

Hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi, hidrojen gazının sanayi ölçeğinde üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi sırasında CO<sub>2</sub> emisyonu meydana gelmektedir ve bu, hidrojenin çevre dostu bir enerji kaynağı olarak konumunu zayıflatmaktadır [14]. Biyokütle gazlaştırma yöntemi, organik atıkların yakılması sırasında hidrojen gazı üretir ve atık yönetimi sorunlarına çözüm olabilir. Fotokatalitik hidrojen üretimi ise yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisini kullanarak hidrojen gazı üretir ve çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkar [15].

Daha geniş tanımla, hidrojen üretiminde birincil enerji kaynağı gereklidir. Kullanılan kaynakların çeşidine göre hidrojenin üretim yöntemleri de farklılık gösterir. Şekil.1’de kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri gösterilmektedir. Hidrojen, yenilenebilir

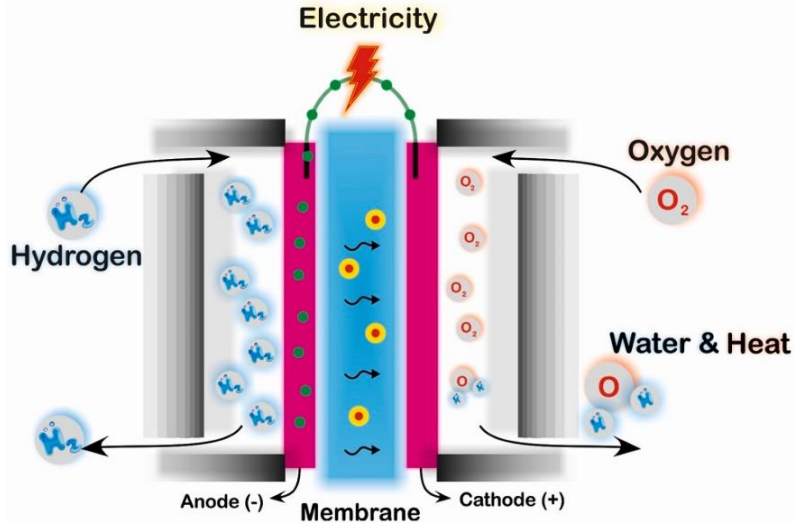
kaynaklardan elde edilirse “yeşil hidrojen” olarak tanımlanır [16]. Fosil kökenli yakıtların kullanımıyla CO<sub>2</sub> tutma sistemleriyle elde edilen hidrojene “mavi hidrojen” denir. Fosil kökenli yakıtlar kullanılarak CO<sub>2</sub> salımı olmadan elde edilen hidrojene ise “turkuaz hidrojen” denir. Nükleer kaynakların kullanımı ile üretilen hidrojen de “pembe hidrojen” olarak isimlendirilir. “Gri hidrojen” ise doğal gazın yeniden yapılandırılması (reformasyonu) sonucu elde edilir. Son olarak termokimyasal dönüşüm teknolojilerinden gazlaştırma yöntemiyle üretilen hidrojene ise “kahverengi hidrojen” denir [17].

Teknoloji	Birincil Enerji/Elektrik Kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Maliyeti (ABD doları/kgH <sub>2</sub> )
 Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
 Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
 Piroliz	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
 Buhar metan reformlama (karbon yakalama ile)	Doğal gaz, kömür	<4	1,5-3,00
 Buhar metan reformlama (karbon yakalamadan)	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
 Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2

Şekil 1 Hidrojen üretim yöntemleri [18]

### 3. HİDROJEN YAKIT HÜCRESİ

Kimyasal enerjinin elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere yakıt hücreleri denir. Elektrolit membran, anot ve katot olmak üzere üç ana bileşenden oluşan yakıt hücreleri yüksek verimlilik ile çalışır. Anot ve katot kısımlarda gerçekleşen reaksiyonlar sonucu elektrik enerjisi oluşur [19]. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi iyon pillere benzer ancak sürekli olarak bir yakıtle beslemeye ihtiyaç duyarlar. Şekil.2’de yakıt hücresinin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2 Yakıt hücresinin yapısı [20]

Çalışma prensibi; anot bölgesinden hidrojen, katot bölgesinden oksijen girer. Hidrojen, yakıt hücresi katmanlarından geçerken proton ve elektronlara ayrılır. Elektrolit elektron geçişinin engeller ve sadece protonların katot bölgesine geçmesini sağlar. Elektronlar ise başka bir devre aracılığıyla elektrik akımı ve ısı üretir. Katot bölgesinde ise harici devreden gelen elektron ve hidrojenin protonları oksijen reaksiyona girerek su oluşturur.

Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, çevre dostu bir enerji üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır [21]. Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi, düşük karbon salımı nedeniyle çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Hidrojen yakıt hücresinin avantajları arasında yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük işletme maliyetleri ve sıfır emisyon bulunmaktadır. Hidrojen yakıt hücresinin dezavantajları arasında yüksek üretim maliyeti, hidrojen gazının depolanması ve taşınması sırasında güvenlik sorunları bulunmaktadır [22].

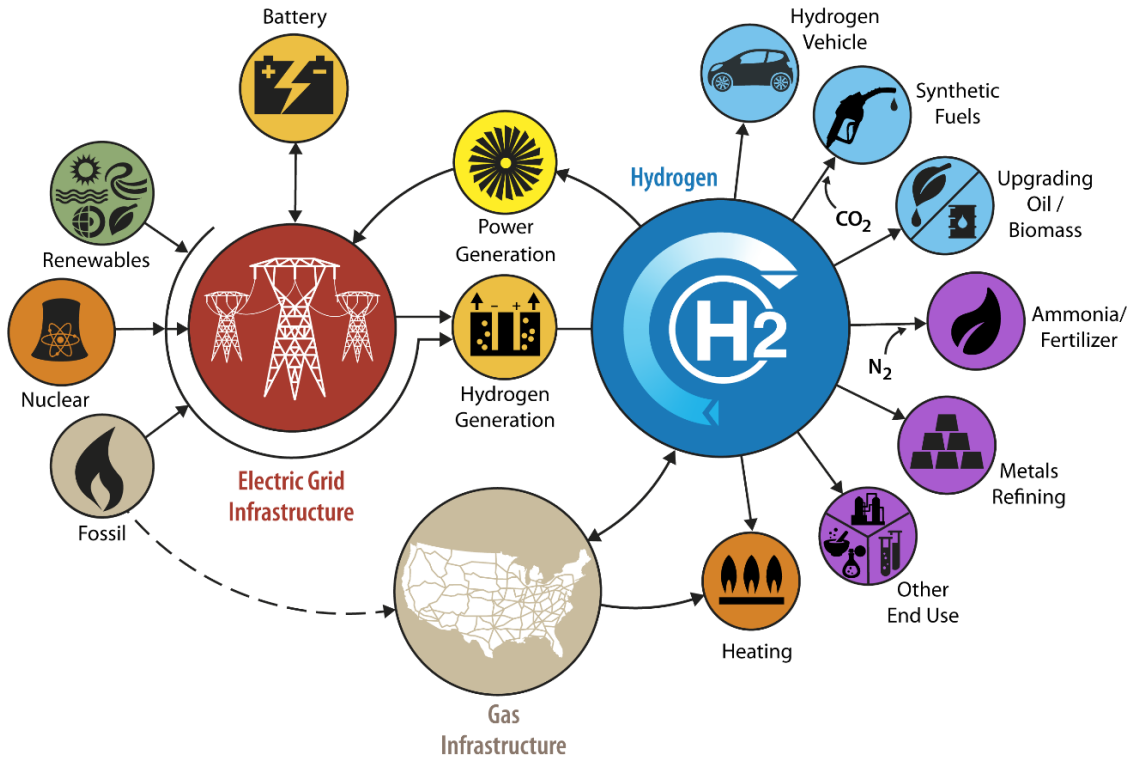
Hidrojen yakıt hücresi, farklı türlerde üretilebilmektedir. Bunlar arasında proton değişim membranlı (PEM), katı oksit (SOFC) ve karışık yakıt (MCFC) yakıt hücreleri yer almaktadır. PEM yakıt hücreleri, düşük işletme sıcaklığı nedeniyle özellikle taşıt uygulamaları için uygundur [23]. SOFC yakıt hücreleri, yüksek sıcaklıklarda işletilebilir ve çeşitli uygulamalar için kullanılabilir [24]. MCFC yakıt hücreleri, fosil yakıtların yanı sıra biyokütleyi de kullanarak hidrojen gazı üretebilir ve bu nedenle enerji kaynaklarının çeşitliliğine olanak tanır [25].

Yakıt pilleri genellikle taşıt uygulamalarında kullanılır. Otomotiv firmaları yakıt pilleri teknolojilerini geliştirmek için büyük yatırımlar yapmaktadır. Yakıt pilleri yüksek verimlilik ile çalışan, çevreyi kirlenmeyen ürünler oldukları için ulaşım sektörü için avantaj oluştururlar.

#### 4. HİDROJENİN ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK ROLÜ

Hidrojen taşıyıcı olarak açık denizlerde elde edilen elektriğin depo edilmesi ve güvenli olarak iletilmesinde kullanılabilir. Okyanuslarda bulunan rüzgâr çiftlikleri ürettiği elektrik ve gelgit hareketiyle üretilen okyanus altındaki santrallerden üretilen elektrik, hidrojen ile güvenilir olarak taşınabilir. Açık denizlerde elde edilen elektriğin depolanması, elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen ile mümkün hale gelir. Elektroliz olayı, suyun hidrojen ve oksijene ayrışmasıdır. Bu ayrışmayla hidrojen gazı depolama tanklarında ya da iletim hatlarında taşınabilir [26].

Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu sayesinde uzun süre taşınabilir ve saklanabilir. Mevcut boru iletim hatları da hidrojenin taşınmasında kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı araçlarda, endüstriyel uygulamalarda, ısıtmada, gübrelemede ve birçok sektörde kullanılabilir. Şekil.3'te hidrojenin üretim ve kullanım şekilleri gösterilmektedir [27]. Okyanuslarda üretilen elektriğin depo edilmesinde, iletilmesinde ve tüketilmesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasını sağlamak için hidrojen kullanılır. Hidrojen enerji arzının dengeler. Hidrojen sistemlerinin alt yapısının iyileştirilmesi gerekmektedir. Hidrojen ekonomi modelleri oluşturularak alt yapı sistemleri desteklenebilir. Hidrojenin kullanımı karbon ayak izini azaltıp, enerji sektöründe sürdürülebilirlik sağlayabilir [28].



Şekil 3 Hidrojenin üretimi, kullanımı ve taşıyıcı olarak rolü [29]

#### 4. HİDROJEN EKONOMİSİ

İklim krizi, yenilenen enerji güvenliği ve jeopolitik önemi ile ekonomik çıkarlar, hidrojen ekonomisine olan ilgiyi artırmaktadır. Henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, mali ve siyasi taahhütler göz önüne alındığında, hidrojen ekonomisinin hızla gelişme potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte, birçok bilim insanı, hidrojen ekonomisi üzerine sosyal değerlendirmelerin önemli ölçüde eksik olduğunu belirtmiştir [30].

Ülkeler için enerji kaynaklarına sahip olmak ekonomik bağımsızlığın göstergesidir. Uluslararası ilişkiler enerji temini, arzı, güvenliği gibi politikalar üzerine kuruludur. Dünya genelinde kullanılan enerji kaynakları temel olarak üç sınıfa ayrılır. Bunlar; fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji kaynaklarıdır. Enerji türündeki çeşitlilik endüstride ve günlük kullanımda geniş yer kapladığı için ekonomik faaliyetlerin temelinde yer alır [31].

Enerji ekonomisi, var olan enerji kaynaklarının ekonomik faaliyetlerle olan etkileşimini inceler. Ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtların CO<sub>2</sub> salımı yapması, tükenbilir olması, sera gazı emisyonları oluşturması gibi sebeplerle karbon salımını, hava kirliliğini, asit yağmurlarını azaltacak enerji kaynaklarının kullanılması sağlanarak hidrojen ekonomisine geçiş yapılması hayati önem arz etmektedir [32].

Bir operasyonel hidrojen ekonomisinin gerçekleştirilmesi, teknik altyapı ve halk desteği gerektirir. Hidrojen ekonomisine toplumun kabul edilmesini değerlendirmek, halkın desteğini anlamak ve sonuç olarak hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı isteksizlikleri önlemek önemlidir [33], [34]. Hidrojen, enerji taşıyıcısı olarak işlev gören bir bileşiktir ve üretimi, depolanması, taşınması ve enerji ağı içinde dağıtımını gibi çeşitli süreçler gerektirir [35]. Halkın algısı ve kabulü, hidrojen tedarik zincirindeki her bir adımdan etkilenebilir çünkü hidrojen üretmek ve depolamak için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu nedenle, halkın hidrojeni bir sistem perspektifinden algılamasını ve kabul etmesini değerlendiren ulusal çalışmalarda bir eksiklik mevcuttur [36], [37].

Türkiye’de yapılan bir çalışmada, “fen öğretmeni adaylarının hidrojeni geleceğin enerji taşıyıcısı olarak görüşleri” konulu yapılan bir araştırmada, fen öğretmeni adaylarının hidrojenle ilgili yeterli bilgiye sahip olmadıkları görülmektedir. Hiçbiri “hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olduğu, kaynak olmadığı” veya “hidrojenin elektrige benzediği” gibi ifadelerden bahsetmemiştir. Bu nedenle, ilkökul öğrencilerinin ilham almasında öğretmenlerin büyük etkisi olduğu düşünüldüğünde, öğretmen yetiştiren eğitim fakülteleri, donanımlı bir şekilde mezun olan öğretmenleri yetiştirmekle sorumludur. On ilkökul fen öğretmeni adayıyla yapılan nitel

analiz sonuçlarına göre, deney grubundaki adayların kontrol grubundaki adaylara göre hidrojen konusunda daha bilinçli oldukları görülmüştür [38].

## 5. SONUÇ

Son yıllarda artan küresel ısınma, sera gazı emisyonları ve çevre kirliliğinin temelinde fosil yakıtların kullanımı yatar. Çevresel problemleri çözmek ve enerji bağımlılığı azaltabilmek için enerji taşıyıcı olarak, yakıt olarak kullanılabilen hidrojen ekonomisine geçiş sağlamak için atılımlar yapılmalıdır. Ekonomik bağımsızlık için hidrojenin yakıt olarak kullanımı sağlanmalıdır. Üretim-dağıtım-depolama sistemleri geliştirilmelidir. Yeni iş sahaları oluşturularak istihdam artırılabilir. Elde edilen sonuçlara göre hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak kullanımı, gelecekte için umut vericidir. Hidrojenin üretimi, depolanması ve taşınması konusunda yaşanan zorluklar, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesiyle birlikte çözülmeye başlamıştır. Günümüzde, hidrojenin üretimi için fotokatalitik yöntemler, biyokütle gazlaştırma, elektroliz ve hidrokarbonların yeniden yapılandırma (reforming) işlemi gibi farklı teknolojiler kullanılmaktadır.

Hidrojen yakıt hücresi teknolojisi de çevre dostu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük işletme maliyetleri ve sıfır emisyon gibi avantajlarıyla hidrojen yakıt hücresi, farklı türlerde üretilen PEM, SOFC ve MCFC gibi yakıt hücreleriyle birlikte, gelecekte enerji sektöründe daha fazla kullanılmaya başlanabilir.

Hidrojenin temiz bir enerji kaynağı olarak konumunu güçlendirmek için, teknolojik gelişmelerin yanı sıra politik ve ekonomik faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hidrojen ekonomisini toplumun benimsemesi, halkın desteği ve hidrojen teknolojisi ve altyapı uygulamalarına karşı olumsuz tavırlara karşı gerekli girişimlerde bulunmak önemlidir. Bu nedenle, hidrojen ekonomisi konusunda dünya genelindeki ülkelerin iş birliği yaparak ortak bir strateji geliştirmeleri ve bu alanda yatırım yapmaları gerekmektedir.

Sonuç olarak, hidrojen, temiz bir enerji kaynağı olarak gelecekte enerji sektöründe daha fazla kullanılabilir hale gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesi ve teknolojik gelişmelerin yanı sıra politik ve ekonomik faktörlerin de dikkate alınması, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi için önemlidir. Bu sayede, fosil yakıtların yerine temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan hidrojenin kullanımını artabilir ve dünyamızın geleceği için daha iyi bir çevre sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, and D. Hissel, “Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, p. 111180, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111180.
- [2] A. Zahedi, H. A. Z. AL-bonsrulah, and M. Tafavogh, “Conceptual design and simulation of a stand-alone Wind/PEM fuel Cell/Hydrogen storage energy system for off-grid regions, a case study in Kuhin, Iran,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103142, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103142.
- [3] T. Yusaf *et al.*, “Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.02.086.
- [4] M. D. Scovell, “Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19, pp. 10441–10459, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.099.
- [5] A. V. Vorontsov and P. G. Smirniotis, “Advancements in hydrogen energy research with the assistance of computational chemistry,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 40, pp. 14978–14999, May 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.356.
- [6] S. Salahshoor and S. Afzal, “Subsurface technologies for hydrogen production from fossil fuel resources: A review and techno-economic analysis,” *Int J Hydrogen Energy*, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.08.202.
- [7] S. Z. Zhiznin, N. N. Shvets, V. M. Timokhov, and A. L. Gusev, “Economics of hydrogen energy of green transition in the world and Russia.Part I,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.069.
- [8] Y. Woo, J. M. Park, J. W. Bae, and M. J. Park, “Kinetic modeling of the steam reforming of light hydrocarbon mixture from waste resources: Effects of gas composition on hydrogen production,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 41, pp. 15383–15391, May 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.01.050.
- [9] İ. Üçgül and G. Akgül, “Biyokütle Teknolojisi,” *YEKARUM DERGİ*, vol. 1, no. 1, pp. 3–11, 2010.
- [10] M. M. Soltani, P. Ahmadi, and M. Ashjaee, “Techno-economic optimization of a biomass gasification energy system with Supercritical CO<sub>2</sub> cycle for hydrogen fuel and electricity production,” *Fuel*, vol. 333, p. 126264, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.FUEL.2022.126264.
- [11] W. Shi *et al.*, “Realization of photocatalytic hydrogen production by optimizing energy band structure and promoting charges separation over the S-doped CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> microrods,” *Mater Today Commun*, vol. 35, p. 105588, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2023.105588.



- [12] D. Li, J. Tu, Y. Lu, and B. Zhang, “Recent advances in hybrid water electrolysis for energy-saving hydrogen production,” *Green Chemical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 17–29, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.GCE.2022.11.001.
- [13] S. F. Ahmed *et al.*, “Sustainable hydrogen production: Technological advancements and economic analysis,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 88, pp. 37227–37255, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.12.029.
- [14] R. El Mrabet and A. Berrada, “Hydrogen production and derivatives from renewable energy systems for a best valorization of sustainable resources,” *Hybrid Energy System Models*, pp. 343–363, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-821403-9.00010-X.
- [15] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 850–866, May 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.112.
- [16] Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, M. Jaszczur, M. Al-Hitmi, and M. Alghoul, “Energy futures and green hydrogen production: Is Saudi Arabia trend?,” *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101165, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101165.
- [17] F. Pruvost, S. Cloete, C. Arnaiz del Pozo, and A. Zaabout, “Blue, green, and turquoise pathways for minimizing hydrogen production costs from steam methane reforming with CO<sub>2</sub> capture,” *Energy Convers Manag*, vol. 274, p. 116458, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116458.
- [18] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası,” 2023.
- [19] N. A. Al-Mufachi and N. Shah, “The role of hydrogen and fuel cell technology in providing security for the UK energy system,” *Energy Policy*, vol. 171, p. 113286, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.ENPOL.2022.113286.
- [20] P. Ahmadi, M. Raeesi, S. Changizian, A. Teimouri, and A. Khoshnevisan, “Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques,” *Energy*, vol. 259, p. 125003, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.125003.
- [21] Y. Lee, M. C. Lee, and Y. J. Kim, “Barriers and strategies of hydrogen fuel cell power generation based on expert survey in South Korea,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 9, pp. 5709–5719, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.212.
- [22] Z. Fu *et al.*, “Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103181, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103181.
- [23] M. Atif Mahmood *et al.*, “Sensitivity analysis of performance and thermal impacts of a single hydrogen fueled solid oxide fuel cell to optimize the operational and design

- parameters,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103241, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103241.
- [24] T. Hai *et al.*, “Comparison analysis of hydrogen addition into both anode and afterburner of fuel cell incorporated with hybrid renewable energy driven SOFC: An application of techno-environmental horizon and multi-objective optimization,” *Int J Hydrogen Energy*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.02.016.
- [25] Q. Ding, M. Zhang, and H. Huang, “Biomass-derived carbon immobilized ultrafine Pt nanoparticle as a highly efficient catalyst for hydrogen fuel cell,” *Mater Lett*, vol. 333, p. 133675, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.MATLET.2022.133675.
- [26] D. Berstad, S. Gardarsdottir, S. Roussanaly, M. Voldsund, Y. Ishimoto, and P. Nekså, “Liquid hydrogen as prospective energy carrier: A brief review and discussion of underlying assumptions applied in value chain analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111772, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111772.
- [27] F. Scheller, S. Wald, H. Kondziella, P. A. Gunkel, T. Bruckner, and D. Keles, “Future role and economic benefits of hydrogen and synthetic energy carriers in Germany: a review of long-term energy scenarios,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103037, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103037.
- [28] C. Chu, K. Wu, B. Luo, Q. Cao, and H. Zhang, “Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology - A review,” *Carbon Resources Conversion*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.CRCON.2023.03.007.
- [29] K. Epstein, “Hydrogen: The Energy Carrier of the Future,” May 23, 2023. <https://eta.lbl.gov/news/hydrogen-energy-carrier-future> (accessed May 23, 2023).
- [30] K. J. Dillman and J. Heinonen, “A ‘just’ hydrogen economy: A normative energy justice assessment of the hydrogen economy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112648.
- [31] M. I. Khan and S. G. Al-Ghamdi, “Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 28, pp. 10315–10344, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.12.033.
- [32] J. D. Hunt *et al.*, “Solid air hydrogen liquefaction, the missing link of the hydrogen economy,” *Int J Hydrogen Energy*, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.405.
- [33] M. Ricci, P. Bellaby, and R. Flynn, “What do we know about public perceptions and acceptance of hydrogen? A critical review and new case study evidence,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 21, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.106.

- [34] M. D. Scovell, “Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19. 2022. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.01.099.
- [35] IEA, “Offshore Wind Outlook 2019,” 2019.
- [36] K. Itaoka, A. Saito, and K. Sasaki, “Public perception on hydrogen infrastructure in Japan: Influence of rollout of commercial fuel cell vehicles,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.123.
- [37] J. Yap and B. McLellan, “Evaluating the attitudes of Japanese society towards the hydrogen economy: A comparative study of recent and past community surveys,” *Int J Hydrogen Energy*, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.05.174.
- [38] Y. E. Yüksel, “Elementary science teacher candidates’ views on hydrogen as future energy carrier,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 20, pp. 9817–9822, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.009.