

## Vakum Tüp Güneş Kolektörlerinde Termal Performans İyileştirme Yöntemleri

Hakan DUMRUL<sup>1\*</sup>, Edip TAŞKESEN<sup>1</sup>, Fatih ARLI<sup>1</sup>, Mustafa YENER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye

<sup>2</sup>Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Bilimi ve Teknolojileri, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye

\*(hakandumrul@sirnak.edu.tr)

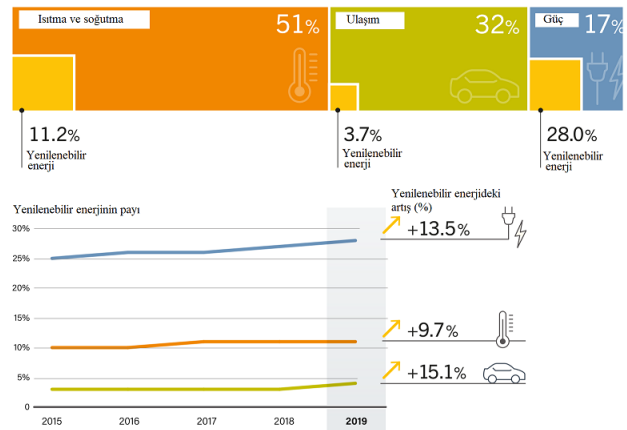
**Özet** – Artan enerji ihtiyacıyla birlikte, temiz enerjiyi verimli bir şekilde üretmek için geleneksel olmayan enerji kaynaklarını kullanmak amacıyla birçok çalışma yürütülmektedir. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında insanlık için her zaman ilgi odağı olmaktadır. Güneş enerjisinden endüstriyel ve evsel alanlarda tarımsal ürünlerin kurutulması, deniz suyunun damıtılması, fotovoltaik hücrelerle elektrik enerjisi üretilmesi gibi çok sayıda uygulamada faydalanılmaktadır. Güneş enerjisini ısıtma uygulamalarında kullanmak, güneş enerjisinden faydalanmanın en önemli yollarından biridir. Vakum tüp güneş kolektörleri, yüksek ısıl verim ve elverişsiz hava koşullarında arzu edilen performans sağlaması nedeniyle güneş enerjili termal uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, vakum tüp güneş kolektörlerinin termal performanstaki iyileştirmeler ısı transfer materyalleri, tasarım parametreleri, faz değiştiren malzemeler (FDM) ve çalışma akışkanları başlıkları altında tartışılmıştır. Çalışma sonucunda vakum tüp güneş kolektörlerinin termal veriminin yapılan yapısal farklılıklarla ve faz değiştiren malzeme kullanımı ile artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca farklı çalışma akışkanları kullanılarak termal verimde önemli artış sağlanabileceği belirtilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** – Vakum Tüp Güneş Kolektörü, Termal Performans İyileştirme, Güneş Enerjili Su Isıtma, Çalışma Akışkanı, Faz Değiştiren Malzeme.

### I. GİRİŞ

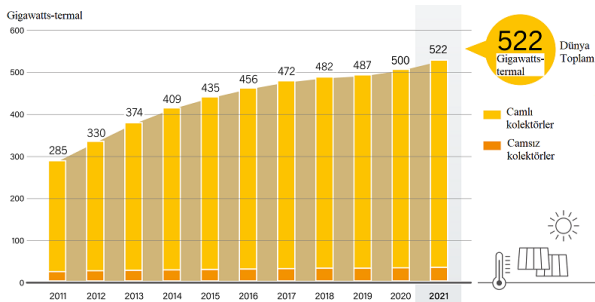
Fosil yakıt tüketimine bağlı olarak oluşan çevresel sorunlar bunların en başında gelen küresel ısınmadan dolayı yenilenebilir enerji kaynakları son dönemde büyük ilgi görmüştür ve bu kaynaklar arasında güneş enerjisi ilk sıralarda yer alır. Bu nedenle, güneş kolektörleri gibi sürekli gelişen teknolojileri kullanarak güneş enerjisinden yararlanılmaktadır. Güneş enerjisinden endüstriyel ve evsel alanlarda; ürün kurutma, deniz suyunun damıtılması, fotovoltaik hücrelerle elektrik enerjisi üretilmesi gibi çok sayıda uygulamada faydalanılmaktadır [1], [2]. Şekil 1’de toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payı verilmiştir. 2015 ve 2019 yılları arasında ulaştırma sektöründeki yenilenebilir enerji payı %0.5, ısıtma ve soğutma sektöründeki yenilenebilir enerji payı ise %1 artmıştır. Enerji sektöründe yenilenebilir enerjinin payı ise %3’ten fazla artış göstermiştir.

Grafiğe göre toplam enerji tüketiminde fosil yakıt kullanımı yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim olduğunu göstermekte ve bu yönelimin arttığı gözlemlenmektedir [3].



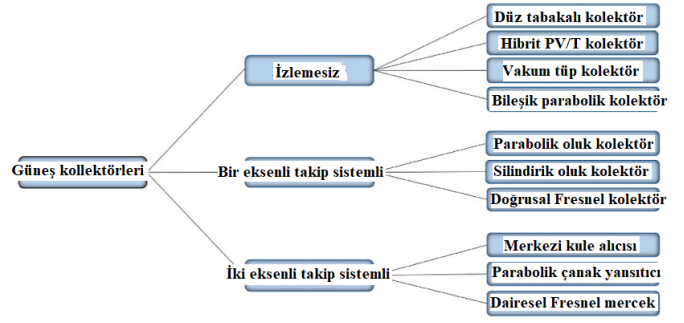
Şekil 1. Toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerji [3].

Güneşten gelen enerji, evlerde ve endüstriyel kullanımlarda suyu ısıtmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisi, basit çalışma prensibi nedeniyle dünya genelinde genellikle su ısıtmak için kullanılmaktadır [4], [5]. Son zamanlarda, güneş termal kolektörlerin evsel ve endüstriyel kullanımı, verimlerdeki önemli artışlar nedeniyle genişlemiştir [6], [7]. Şekil 2’de güneş enerjili su ısıtma kolektörlerinin küresel kapasitesi verilmiştir. İşletmedeki kümülatif küresel güneş termal kapasitesi 2020’de 502 gigawatt (GW) iken 2021’de %4’lük artışla tahmini 522 GW’a ulaşmıştır [3].



Şekil 2. Güneş enerjili su ısıtma kolektörlerinin küresel kapasitesi [3].

Isı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığı kolektörler güneş enerjili su ısıtıcıları olarak adlandırılırken, güneş enerjili hava ısıtıcıları çalışma akışkanı olarak havayı kullanan kolektörlerdir [8]. Güneş enerjili su ısıtıcıları, güneş ışığını absorbe etmek ve bunu akışkana vermek için kullanılan ve sonunda ısıyı bir depolama rezervuarındaki suya aktaran verimli bir teknolojidir. Bu sistemlerin termal verimi (yaklaşık %70) güneş elektrik dönüşüm sistemlerinin veriminden (yaklaşık %17-20) önemli ölçüde daha yüksektir. Güneş enerjili su ısıtıcıları aktif ve pasif sistemler olarak bilinen iki sınıfa ayrılmaktadır. Aktif sistemler ısı transfer akışkanını sirküle etmek için bir pompa kullanırken, pasif sistemler ısı transfer akışkanını yerçekimi kuvvetleri ile sirküle eder [9], [10]. Güneş kolektörleri, güneş ışınımının termal ve elektrik enerjilerine dönüştürüleceği termal ve fotovoltaik uygulamalara sahiptir. Termal uygulamalarda, güneş kolektörü güneş ışınımının enerjisini absorblar; daha sonra ısı, kullanım suyu ısıtması veya termal depolama tanklarının şarj edilmesi için uygun olan çalışma sıvısına iletilir [11]. Güneş kolektörü çeşitleri Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Güneş kolektör çeşitleri [8].

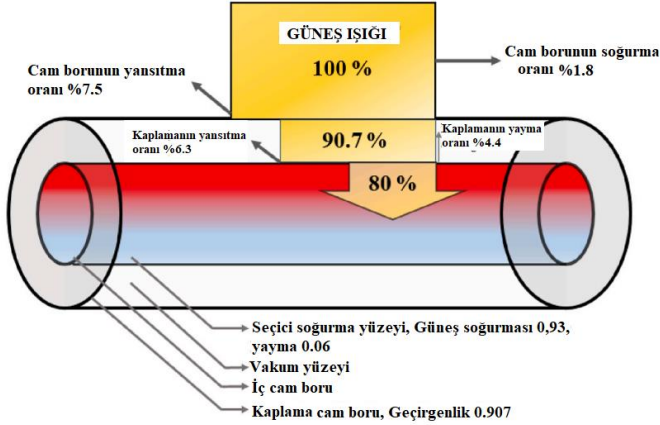
Tüm güneş kolektörü tipleri belirli çalışma sıcaklıklarına sahiptir; 100 °C’nin altındaki düşük sıcaklıklar için vakum tüp (VTGK) ve düz tabaka kolektörler (DTGK) yaygın olarak kullanılmaktadır. VTGK nihai amacı DTGK’nin aksine sıcak suya ulaşmak için ısı kaybı miktarını azaltmak olan bir pasif güneş enerjili su ısıtıcı türüdür ve bulutlu günlerde daha avantajlıdır [12]. Güneş enerjisini başlıca enerji ve ekonomik kar kaynağı olarak kullanmak, çeşitli uygulamalarda VTGK’nin kullanılması için iki temel ilkedir. Literatürdeki birçok çalışmada, VTGK’lerin avantajlarının, dezavantajlardan daha fazla olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada, literatürdeki VTGK termal performans iyileştirme çalışmaları ısı transfer materyalleri, tasarım parametreleri, faz değiştiren malzemeler (FDM) ve çalışma akışkanları başlıkları altında incelenmiştir. VTGK termal performans iyileştirme yöntemlerinin güneş su ısıtma sistemlerindeki termal verim artışına etkisi belirtilmiştir. Nanoakışkan kullanımının sistemin termal veriminde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

## II. VAKUM TÜP GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİ

Vakum tüp güneş kolektörleri, yüksek su sıcaklığı (genellikle 100 °C altındaki sıcaklıklar için) üretmek ve ısı kaybını en aza indirmek amacıyla en uygun ve en köklü güneş kolektörü türlerinden biridir. VTGK’lerin tüm hayati faktörleri üretim yapılarında yatmaktadır. Bunlardan en çarpıcı olanı, su sıcaklığını arttırmak için güneş ışınımını absorblayan soğurucu ve dış cam tüp arasında vakum boşluğu kullanılmasıdır. VTGK’lerin öne çıkan özelliği, taşınım ve iletim sürecindeki ısı kayıplarını azaltan vakum boşluğunun yanı sıra, soğurucu tüpü kaplayan yüksek soğuruculuğa ve düşük yansıtıcılığa sahip uygun malzemedir. VTGK iç ve dış olmak üzere iki ana tüpten oluşmaktadır; bunlardan dıştaki

şeffaftır ve içindeki ise kolektörün termal işlevselliğini iyileştirmeyi amaçlayan yüksek emiciliğe sahip seçici bir malzeme tabakası ile kaplanmıştır [13], [14]. İki borulu vakum tüp güneş kolektör yapısı Şekil 4’te, vakum tüp güneş kolektörlü su ısıtma sistemi tüm bileşenleri ile Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 4. İki borulu vakum tüp güneş kolektörü [15].

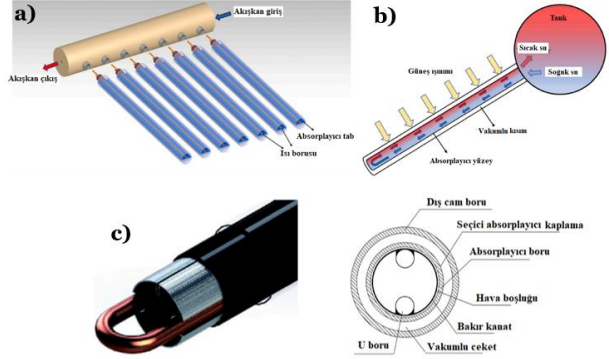


Şekil 5. Vakum tüplü güneş kolektör su ısıtma sisteminin tüm bileşenleri [16].

Şekil 4’te görüldüğü gibi güneş ışınımının kullanımında belirli kayıplar olmasına rağmen oldukça fazla bir kısmı (yaklaşık %80) VTGK tarafından termal enerjiye dönüştürülmektedir [15]. Vakum tüp güneş kolektörlerinin su ısıtma sistemlerinde kullanılmasının temel nedenlerinden biri vakum alanı ve özel tasarımları ayrıca farklı iklim koşullarındaki çalışma yetenekleri olarak belirtilebilir. VTGK’ler iki ana tipe sınıflandırılır: tek duvarlı tüp ve çift duvarlı tüp. Tek duvarlı vakum tüp güneş kolektörler, bir ısı borusuna

tutturulmuş kavisli veya düz bir metal şerit içerirken, çift duvarlı vakum tüp güneş kolektörleri iki eş merkezli silindirik cam tüpten oluşur [17]. VTGK’ler, farklı ısı çekme yöntemlerine göre üç tipe ayrılır (Şekil 6 a-c) [18]–[20]:

- Isı borulu vakum tüp güneş kolektörleri,
- Sadece cam vakum tüplü güneş kolektörleri,
- U tip vakum tüplü güneş kolektörleri.



Şekil 6. a) ısı borulu b) Sadece cam c) U tip vakum tüp güneş kolektörleri [18]–[20].

Tablo 1’de vakum tüp güneş kolektör tiplerinin avantajları ve dezavantajları verilmiştir. Tabloda belirtilen avantaj ve dezavantajlar düşünülerek güneş ısıtıcı sistemlerinde değişik tipteki vakum tüplü güneş kolektörleri tercih edilmektedir [21].

Tablo 1. Vakum tüp güneş kolektör türlerinin avantaj ve dezavantajları [21].

Kolektör tipi	Avantajları	Dezavantajları
Isı borulu vakum tüp güneş kolektörleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>Donma önleme özelliği</li> <li>Hızlı tetikleme süreci</li> <li>Yüksek basınç direnci</li> <li>Bakım ve kurulum kolaylığı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vakum koşulunu korumak zordur</li> <li>Kısıtlı çalışma ömrü</li> </ul>
Sadece cam vakum tüplü güneş kolektörleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek termal verim</li> <li>Tasarım basitliği</li> <li>Düşük bakım ve üretim maliyeti</li> <li>Isıdan yararlanmanın en iyi yöntemi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çalışma sıvısının çalışma basıncı birkaç metre su yüksekliği ile sınırlıdır</li> </ul>
U tip vakum tüplü güneş kolektörleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek basınç taşıma kabiliyeti</li> <li>Daha düşük çalışma koşulları gereksinimleri</li> <li>Basit yapı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tesisat ve ısı transfer kanatlığı nedeniyle yüksek maliyet</li> </ul>

### III. VAKUM TÜP GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE TERMAL PERFORMANS İYİLEŞTİRME

VTGK'ler, taşınım ve ışıınımdan kaynaklanan düşük ısı dağılımına bağlı olarak daha yüksek bir su sıcaklığı elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, kolektörün geleneksel yapısında büyük bir değişiklik yapılabilir ve ısı kaybını azaltmak ve termal verimi artırmak için çeşitli yöntemler verilebilir. VTGK'lerin termal performansının artırılmasına yönelik yöntemler ısı transfer materyalleri, tasarım parametreleri, faz değiştiren malzemeleri ve çalışma akışkanları başlıklarında verilmiştir. Bu dört yöntem VTGK işlevselliğini geliştirmeyi amaçlayan son çalışmaların ana odak noktaları olmuştur [21].

#### A. Isı Transfer Materyalleri

Isı transfer hızını artırarak veya tüpler içindeki ısı kaybını azaltarak sistemin termal veriminin iyileştirmesi amaçlanan VTGK'lerde kullanılan malzemeler çok önemlidir. Isı transfer hızını artırma veya tüpler içindeki ısı kaybını azaltma amacına ulaşmak için soğurucu şekilleri, dolgu katmanlar, ısı kalkanları, termoelektrik modüller, paslanmaz çelik ağ, bileşik parabolik yoğunlaştırıcı ve vakum seviyesi dahil olmak üzere farklı malzemeler kullanılarak çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [21].

#### B. Tasarım ve İşlem Parametreleri

Tasarım parametreleri ve çalışma koşulları iklim koşulları, güneş ışıını, cam tüp sayısı, kütle akış hızı, tüplerin eğim açısı, soğurucu uzunluğu ve çapı, giriş sıvısı sıcaklığı ve farklı çalışma sıvısı türlerini ifade eder. Her bir tasarım parametresinin optimum değerlerine ulaşmak ve sistemin termal veriminin önemli ölçüde artmasını sağlamak amacıyla parametrelerin kolektörün termal performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için birçok çalışma yapılmaktadır [21].

#### C. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

Soğurma sistemlerinin besleme prosedüründe güneş enerjili su ısıtıcılarının kullanımıyla ilgili önemli bir dezavantaj, desorpsiyon işlemi sırasında 100 °C'nin üzerine çıkabilen yüksek sıcaklıklardır. Son yıllarda, FDM'lerle entegre kolektör/depolamalı güneş enerjili su ısıtıcıları şeklinde yenilikçi bir termal sistem yapısını içeren geniş çaplı araştırmalar yapılmaktadır [21], [22].

Güneş kolektörlerinde FDM kullanımının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ FDM entegre güneş kolektörleri kullanılarak geleneksel depolama rezervuarlarından bağımsızlığın bir sonucu olarak maliyet ve alanda bir azalma sağlanacaktır.
- ✓ Kolektörün etkinliğinin olmadığı durumlarda maksimum sıcaklık artışı nedeniyle kolektörün ömründe önemli bir artış beklenmektedir.
- ✓ Kolektör en yüksek sıcaklık aralığında çalışırken meydana gelen önemli bir ısı dağılımını en aza indirir.

En önemlisi, FDM entegreli güneş kolektörleri kullanılırken dikkat edilmesi gereken diğer hayati unsurlar, sistemin faaliyeti sırasında en yüksek sıcaklık değerlerinin elde edileceği malzeme türlerinin ve konumlarının seçilmesidir [23].

#### D. Çalışma Akışkanları

VTGK'lerin termal işlevselliği üzerindeki son etkili unsur çalışma akışkanıdır. Çalışma akışkanları, güneş enerjisi sistemlerinin termal performansını pozitif veya negatif yönde etkileyebilir. VTGK'lerde en yaygın kullanılan çalışma akışkanı türlerinden biri olan su gibi geleneksel temel akışkanların tüm kayda değer etkilerinin yanı sıra, bu temel akışkanın sürdürdüğü dezavantajlar, ısı enerjisini transfer etme ve absorbe etme kabiliyetinin düşük olmasıdır. Bu tür baz sıvıların eksikliklerinin üstesinden gelmek ve termofiziksel özelliklerini iyileştirmek için, baz sıvılara nano boyutlu (1-100 nm) metalik veya metalik olmayan katı parçacıkların dağıtılmasıyla yenilikçi bir çalışma sıvısı olan nanoakışkanlar üretilmiştir [24]. VTGK'lerde kullanılan nanoakışkanların sisteme katkıları aşağıdaki gibi verilebilir [21]:

- 1) VTGK sisteminde nanopartiküllerin temel akışkan içinde dağılması, ısı transferinin iyileştirilmesi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.
- 2) VTGK'lerde nanoakışkan kullanımı yıllık elektrik maliyetini düşürür ve çevreye zarar veren emisyonları önemli ölçüde azaltır.
- 3) Isı transferi artışında nanoakışkan kullanımı önemlidir; ancak hacim oranı değerleri sistemin performansında etkili parametre olarak kabul edilir. Nanoakışkanın hacim

oranı ne kadar fazla olursa, ısı transferi o kadar fazla artar.

Vakum tüp güneş kolektörlerinde termal performans iyileştirme yöntemleri ile ilgili literatür çalışmaları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Literatürdeki farklı termal performans iyileştirme yöntemleri ile ilgili çalışmalar.

Araştırmacılar	Yöntem	Kolektörün tipi	Araştırma	Önemli çıktılar
Zhang vd., [25].	Isı transfer materyali	Sadece cam vakum tüp güneş kolektörü	Daha yüksek termal verim elde etmek amacıyla ısı kullanımına bağlı olarak sistemin termal işlevselliğini incelemek için ısı kalkanları VTGK’ye bağlanmıştır.	Uygulanan karşılaştırmalı analize göre, ısı kalkanlı VTGK’nin toplam veriminin yaklaşık %55 olduğu ve bunun ısı kalkanı olmayan VTGK’den %31.49 daha fazla olduğu belirtilmiştir.
Shah ve Furbo, [26].	Tasarım ve işlem parametreleri	Sadece cam vakum tüp güneş kolektörü	VTGK’de maksimum termal verimi elde etmek için iki değişken parametre olarak farklı tüp uzunlukları ve kütle akış hızlarını teorik olarak analiz edilmiştir. Tüp uzunlukları 0,59 ila 1,47 m arasında üç değer seçilmiştir ve kütle akış hızları 0,05-10 kg/dk aralığında beş farklı değer için incelenmiştir.	En iyi termal verimin en kısa uzunluğa (0,59) sahip tüp için elde edildiğini ve optimum giriş kütle akış hızının 0,4-1 kg/dk aralığında olduğu gösterilmiştir.
Felinski ve Sekret, [22]	Faz Değiştiren Malzemeler	Isı borulu vakum tüp güneş kolektörü	Parafinin sistemin termal performansı üzerindeki etkisinin incelenmiştir.	PCM entegre ETSC için faydalı emilen ısının toplam değeri %45-79 oranında artmıştır. PCM’nin dahil edilmesi, geleneksel VTGK’ye kıyasla ısıtma ortamı döngüsünün çalışma sıvısı sıcaklığında bir düşüşe yol açtığı belirtilmiştir.
Kim vd., [27]	Çalışma akışkanı	U tip vakum tüp güneş kolektörü	%20 Propilen glikol-%80 su temel akışkanında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , nanopartikülleri kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların kullanımı ile U tip VTGK’de termal performans değişimi incelenmiştir.	Termal iletkenliğin, nano sıvı konsantrasyonunun artmasının bir sonucu olarak arttığı göstermiştir. En yüksek termal verim %0.2 hacim ÇDKNT nano sıvı kullanılan kolektör için %62.8 olarak elde edilmiştir. Nano akışkanların termal verim üzerine etkisi en çok CDKNT’de gözlenmiş en az etki ise SiO <sub>2</sub> nanoakışkanında gözlemlenmiştir.



#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı tipteki VTGK'lerin termal performans iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. Isı transfer materyalleri, kolektör tasarım ve işlem parametreleri, faz değiştiren malzemeler ve çalışma sıvıları, VTGK'nin termal performansını etkileyen başlıca unsurlardır. Sonuç olarak güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde farklı tipte VTGK'lerin kullanım amacı ve kullanım yerine göre (endüstriyel, evsel) çeşitli termal performans iyileştirme yöntemleri ile verim artışları sağlanabilmektedir. Nanoakışkanların kullanımının verim artışında belirli düzeyde diğer yöntemlerden daha etkili olduğu söylenebilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] M. B. Elsheniti, A. Kotb, and O. Elsamni, "Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 154, no. March, pp. 315–325, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.106.
- [2] A. E. Kabeel, A. Khalil, S. S. Elsayed, and A. M. Alatyar, "Modified mathematical model for evaluating the performance of water-in-glass evacuated tube solar collector considering tube shading effect," *Energy*, vol. 89, pp. 24–34, 2015.
- [3] Secretariat REN21, "RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT," 2022. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf) (2022).
- [4] A. K. Pandey et al., "Energy, exergy, exergoeconomic and enviroeconomic (4-E) assessment of solar water heater with/without phase change material for building and other applications: A comprehensive review," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, p. 101139, 2021.
- [5] S. Aggarwal, R. Kumar, S. Kumar, M. Bhatnagar, and P. Kumar, "Computational fluid dynamics based analysis for optimization of various thermal enhancement techniques used in evacuated tubes solar collectors: A review," *Mater. today Proc.*, vol. 46, pp. 8700–8707, 2021.
- [6] A. Mostafaipour et al., "A conceptual new model for use of solar water heaters in hot and dry regions," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 49, p. 101710, 2022.
- [7] L. Siampour et al., "Techno-enviro assessment and ranking of Turkey for use of home-scale solar water heaters," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 43, p. 100948, 2021.
- [8] S. Suman, M. K. Khan, and M. Pathak, "Performance enhancement of solar collectors—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 192–210, 2015.
- [9] S. Jaisankar, J. Ananth, S. Thulasi, S. T. Jayasuthakar, and K. N. Sheeba, "A comprehensive review on solar water heaters," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3045–3050, 2011.
- [10] O. Ibrahim, F. Fardoun, R. Younes, and H. Louahli-Gualous, "Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects," *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 259–286, 2014.
- [11] Y. Tian and C.-Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013.
- [12] M. A. Essa and N. H. Mostafa, "Theoretical and experimental study for temperature distribution and flow profile in all water evacuated tube solar collector considering solar radiation boundary condition," *Sol. Energy*, vol. 142, pp. 267–277, 2017.
- [13] T. Zhu, Y. Zhao, Y. Diao, F.-F. Li, and Z. Quan, "Experimental investigation and performance evaluation of a vacuum tube solar air collector based on micro heat pipe arrays," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3517–3526, 2017.
- [14] J. A. Alfaro-Ayala et al., "Optimization of a solar collector with evacuated tubes using the simulated annealing and computational fluid dynamics," *Energy Convers. Manag.*, vol. 166, pp. 343–355, 2018.
- [15] J. T. Kim, H. T. Ahn, H. Han, H. T. Kim, and W. Chun, "The performance simulation of all-glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 34, no. 5, pp. 587–597, 2007.
- [16] J. Ghaderian and N. A. C. Sidik, "An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 108, pp. 972–987, 2017.
- [17] K. Chen, S. J. Oh, N. J. Kim, Y. J. Lee, and W. G. Chun, "Fabrication and testing of a non-glass vacuum-tube collector for solar energy utilization," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2674–2680, 2010.
- [18] M. Mercan and A. Yurddaş, "Numerical analysis of evacuated tube solar collectors using nanofluids," *Sol. Energy*, vol. 191, pp. 167–179, 2019.
- [19] X. Nie, L. Zhao, S. Deng, and X. Lin, "Experimental study on thermal performance of U-type evacuated glass tubular solar collector with low inlet temperature," *Sol. Energy*, vol. 150, pp. 192–201, 2017.
- [20] T. Bouhal, T. Kousksou, A. Jamil, and A. Benbassou, "Experimental study and CFD thermal assessment of horizontal hot water storage tank integrating Evacuated Tube Collectors with heat pipes," *Sol. Energy*, vol. 170, pp. 234–251, 2018.
- [21] S. M. Tabarhoseini, M. Sheikholeslami, and Z. Said, "Recent advances on the evacuated tube solar collector scrutinizing latest innovations in thermal performance improvement involving economic and environmental analysis," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 241, p. 111733, 2022.
- [22] P. Feliński and R. Sekret, "Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM," *Energy*, vol. 114, pp. 1063–1072, 2016.
- [23] R. Singh, I. J. Lazarus, and M. Souliotis, "Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar

- water heaters: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 270–298, 2016.
- [24] K. Khanafer and K. Vafai, “A review on the applications of nanofluids in solar energy field,” *Renew. energy*, vol. 123, pp. 398–406, 2018.
- [25] M. Zhang et al., “Efficient, low-cost solar thermoelectric cogenerators comprising evacuated tubular solar collectors and thermoelectric modules,” *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 51–59, 2013.
- [26] L. J. Shah and S. Furbo, “Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 822–828, 2007.
- [27] H. Kim, J. Ham, C. Park, and H. Cho, “Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids,” *Energy*, vol. 94, pp. 497–507, 2016.