

GÜNEŞ ENERJİLİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİLER VE UYGULAMA ALANLARI

Prof. Dr. Gülşah ÇAKMAK



ISBN: 978-625-5923-13-4

Ankara -2025

GÜNEŞ ENERJİLİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİLER VE UYGULAMA ALANLARI

YAZAR

Prof. Dr. Gülşah ÇAKMAK

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye
gulcakmak@firat.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-6809-2421

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14869149>



Copyright © 2025 by UBAK publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. UBAK International Academy of Sciences Association
Publishing House®
(The Licence Number of Publicator: 2018/42945)

E mail: ubakyayinevi@gmail.com

www.ubakyayinevi.org

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

UBAK Publishing House – 2025©

ISBN: 978-625-5923-13-4

February / 2025

Ankara / Turkey

ÖNSÖZ

Günümüzde enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir kaynaklara yönelmek, sürdürülebilir bir geleceğin temellerini atmak açısından büyük önem taşımaktadır. Güneş enerjisi, sınırsız ve temiz bir kaynak olarak, hem enerji üretimi hem de soğutma sistemlerinde önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu kitap, güneş enerjisi ile soğutma yöntemlerini detaylı bir şekilde inceleyerek, bu alandaki potansiyeli ve teknolojileri ele almayı hedeflemektedir.

Güneş enerjisi ile soğutma, geleneksel termal sistemler ve yenilikçi fotovoltaik tabanlı teknolojilerle desteklenmektedir. Kitapta, adsorpsiyon, absorpsiyon ve evaporatif soğutma gibi termal çözümlerle birlikte, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin temel prensipleri, uygulama alanları ve verimlilikleri üzerinde durulacaktır. Ayrıca, ticari, endüstriyel ve evsel düzeydeki başarılı projeler ve bu projelerin performans analizleri de ele alınacaktır.

Son olarak, güneş enerjisi ile soğutma alanındaki yeni trendler ve gelişmeler, çevresel sürdürülebilirlik açısından incelenecektir. Bu kitap, güneş enerjisinin bu alandaki potansiyelini, daha verimli ve çevre dostu çözümlerle nasıl şekillendirebileceğimizi ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Prof. Dr. Gülşah ÇAKMAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	3
GİRİŞ.....	7
1. GÜNEŞ ENERJİSİNİN TEMELLERİ.....	10
1.1. Güneş enerjisi nedir? Potansiyeli ve teknolojileri.....	13
1.2. Güneş enerjisi kullanarak soğutma neden önemli?.....	16
2. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SOĞUTMA SİSTEMLERİ.....	19
2.1.Termal Soğutma Sistemleri: Adsorpsiyon, Absorpsiyon ve Evaporatif Soğutma.....	21
2.1.1. Adsorpsiyonlu Soğutma.....	23
2.1.2. Absorpsiyonlu Soğutma.....	26
2.1.3. Evaporatif Soğutma.....	28
2.1.4. Gelecek Perspektifleri.....	30
2.2. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Yöntemleri.....	32
2.2.1. Fotovoltaik Paneller ve Soğutma Yöntemlerinin Temel Prensipleri.....	34
2.2.2. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Sistemlerinin Verimliliği.....	38
2.2.3. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Sistemlerinin Uygulama Alanları.....	40
3. UYGULAMALAR VE GERÇEK DÜNYA ÖRNEKLERİ.....	42
3.1. Ticari, Endüstriyel ve Evsel Uygulamalar.....	45

3.1.1. Ticari Uygulamalar.....	45
3.1.2. Endüstriyel Uygulamalar.....	47
3.1.3. Evsel Uygulamalar.....	49
3.2. Başarılı Projeler ve Performans Analizi.....	50
3.2.1. Solar Cooling Initiative (Almanya).....	50
3.2.2. Kaliforniya Güneş Destekli Soğutma Sistemi.....	51
3.2.3. Hindistan Tarım Seraları Projesi.....	51
3.3. Performans Analizi ve Karşılaştırmalar.....	51
4. GELECEĞİN TEKNOLOJİLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK.....	53
4.1. Yeni Trendler ve Gelişmeler.....	54
4.2. Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik Boyutu.....	62
5. KAYNAKÇA.....	71

GÜNEŞ ENERJİLİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİLER VE UYGULAMA ALANLARI

Prof. Dr. Gülşah ÇAKMAK

GİRİŞ

Dünya genelinde artan enerji talebi ve fosil yakıt rezervlerinin giderek tükenmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmiştir. İklim değişikliği, çevresel sürdürülebilirlik kaygıları ve enerji güvenliği gibi küresel sorunlar, alternatif enerji çözümlerine olan ilgiyi artırmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi, sınırsız kaynağı ve çevre dostu yapısıyla sürdürülebilir enerji dönüşümünün öncüsü konumundadır. Günümüzde güneş enerjisinin kullanım alanları giderek genişlemekte, yalnızca elektrik üretiminde değil, ısıtma ve soğutma gibi farklı alanlarda da etkin çözümler sunmaktadır.

Soğutma sistemleri, modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Konfor şartlarının sağlanması, gıda ve ilaç muhafazası, endüstriyel üretim süreçlerinin düzenlenmesi ve sağlık sektöründeki kritik uygulamalar, soğutma teknolojilerinin hayatın her alanına dokunan önemli bir unsur haline gelmesine neden olmuştur. Ancak geleneksel soğutma sistemleri, yüksek enerji tüketimi ve fosil yakıt bazlı elektrik üretimine olan bağımlılığı nedeniyle hem ekonomik hem de çevresel açıdan bazı sorunlara yol açmaktadır. Küresel enerji talebinin büyük bir kısmı soğutma sistemleri tarafından tüketilirken, bu sistemlerin karbon emisyonlarındaki payı da oldukça yüksektir. Bu durum, enerji

tüketimini optimize eden ve çevresel etkileri minimize eden alternatif çözümlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir.

Güneş enerjili soğutma sistemleri, bu noktada önemli bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş enerjisinin soğutma teknolojileriyle entegrasyonu, enerji verimliliğini artırırken fosil yakıt kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Güneş enerjisinin en yoğun olduğu saatlerde soğutma ihtiyacının da maksimum seviyeye ulaşması, bu sistemlerin avantajını daha da belirgin hale getirmektedir. Böylece, enerji arz ve talebi doğal bir denge içinde yönetilebilir.

Bu kitap, güneş enerjisi ile çalışan soğutma sistemlerinin temel prensiplerini, kullanılan teknolojileri ve uygulama alanlarını detaylı bir şekilde ele almayı amaçlamaktadır. Kitap boyunca, güneş enerjisiyle çalışan soğutma teknolojilerinin enerji tasarrufu sağlama potansiyeli, verimlilik analizleri ve kullanım alanları kapsamlı bir şekilde incelenecektir. Termal tabanlı soğutma sistemleri ve fotovoltaik destekli çözümler gibi farklı yaklaşımlar karşılaştırılarak, her bir yöntemin avantajları, sınırlamaları ve uygulama alanları değerlendirilecektir. Ayrıca, ticari ve endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen başarılı projeler analiz edilerek, güneş enerjili soğutma teknolojilerinin pratikte nasıl kullanıldığına dair somut örnekler sunulacaktır.

Güneş enerjili soğutma sistemlerinin geliştirilmesi, aynı zamanda teknolojik ilerlemelerle de doğrudan ilişkilidir. Yenilikçi malzemelerin kullanımı, hibrit sistemlerin entegrasyonu ve yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri, bu alandaki araştırmaların yönünü belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, kitapta yalnızca mevcut teknolojiler değil, aynı zamanda gelecekteki gelişim potansiyeli de ele alınacaktır. Yapay zeka ve nesnelerin interneti (IoT) gibi dijitalleşme trendleri, güneş enerjili soğutma sistemlerinin daha verimli ve akıllı hale gelmesini sağlayarak enerji sektöründe önemli dönüşümler yaratacaktır.

Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, modern enerji sistemlerinin tasarımında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Güneş enerjili soğutma sistemleri, enerji bağımsızlığını artırarak şehirlerden kırsal bölgelere kadar geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Özellikle şebekeye erişimin sınırlı olduğu bölgelerde, bu sistemler enerjiye ulaşımı kolaylaştırarak ekonomik ve sosyal kalkınmayı destekleyici bir rol oynamaktadır.

Bu kitap, mühendisler, akademisyenler, araştırmacılar ve enerji sektöründe çalışan profesyoneller için kapsamlı bir kaynak olmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, politika yapıcılar ve çevresel sürdürülebilirlik konularına ilgi duyan herkes için yenilenebilir enerji ile ilgili kritik bilgiler sunmaktadır. Küresel enerji dönüşümünün önemli bir bileşeni olan güneş enerjili soğutma sistemlerinin

yaygınlaşması, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayarak geleceğin enerji sistemlerini şekillendirmede kilit rol oynayacaktır.

1. GÜNEŞ ENERJİSİNİN TEMELLERİ

Güneş enerjisi, Güneş'ten yayılan elektromanyetik radyasyonun farklı teknolojiler aracılığıyla enerjiye dönüştürülmesi prensibine dayanır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı, gezegenimizin enerji ihtiyacının çok üzerinde bir potansiyele sahiptir ve bu enerji, farklı yöntemlerle kullanılabilir hale getirilmektedir. Güneş, tükenmez bir kaynak olması ve çevreye zarar vermeyen yapısıyla, sürdürülebilir enerji çözümleri arasında öncelikli bir konuma sahiptir.

Güneş enerjisinin değerlendirilmesi için üç temel teknoloji öne çıkmaktadır: fotovoltaik (PV) paneller, güneş termal sistemleri ve konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemleri. Fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken malzemelerden oluşur ve küçük ölçekli bireysel kullanımdan büyük ölçekli enerji santrallerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Güneş termal sistemleri, güneş ışığını ısı enerjisine çevirerek sıcak su üretimi, ısıtma sistemleri ve endüstriyel süreçlerde ısı ihtiyacının karşılanması için kullanılır. Konsantre güneş enerjisi sistemleri ise güneş ışığını aynalar veya lensler aracılığıyla odaklayarak yüksek sıcaklıklarda enerji üretimi sağlar ve genellikle büyük ölçekli elektrik üretiminde kullanılır.

Güneş enerjisinin en büyük avantajlarından biri, enerji üretimi sırasında hiçbir karbon emisyonu oluşturmaması ve çevresel etkilerinin oldukça düşük olmasıdır. Fosil yakıtların aksine, güneş enerjisi tükenmeyen bir kaynaktır ve enerji üretimi sırasında hava kirliliği yaratmaz. Bu özelliği, güneş enerjisini hem iklim değişikliğiyle mücadelede hem de enerji güvenliğinin sağlanmasında stratejik bir çözüm haline getirmektedir. Ayrıca, güneş enerjisi sistemleri modüler bir yapıya sahiptir; bu da onların farklı ölçeklerde ve coğrafi bölgelerde rahatlıkla uygulanmasını mümkün kılar.

Son yıllarda, güneş enerjisi teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde enerji dönüşüm verimliliği önemli ölçüde artmıştır. Gelişmiş fotovoltaik hücreler, çok katmanlı yapı ve yeni nesil malzemeler kullanılarak daha yüksek verimlilik sunarken, güneş termal sistemlerinde ısı depolama çözümleri sayesinde gece saatlerinde dahi enerji kullanımı sağlanabilmektedir. Ayrıca, akıllı enerji yönetim sistemleri ve yapay zeka destekli izleme sistemleri, güneş enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Tüm bu avantajlarına rağmen, güneş enerjisinin daha yaygın kullanımı için çeşitli zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu zorluklar arasında, güneş ışınımının gün içindeki ve mevsimsel değişimleri, enerji depolama teknolojilerinin maliyetleri ve arazi kullanımı gibi faktörler yer almaktadır. Ancak, yenilikçi çözümler ve teknoloji alanındaki ilerlemeler sayesinde, güneş enerjisinin gelecekte enerji sektöründe çok daha büyük bir paya sahip olması beklenmektedir.

Güneş enerjisinin etkin kullanımı, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Küresel ölçekte birçok ülke, enerji bağımsızlığını artırmak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için güneş enerjisi projelerine büyük yatırımlar yapmaktadır. Örneğin, geniş ölçekli güneş tarlaları, çatı tipi güneş panelleri ve şebeke bağlantılı enerji sistemleri gibi uygulamalar, güneş enerjisini daha erişilebilir hale getirmektedir.

Fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken, güneş termal sistemleri güneşten gelen ısıyı toplayarak sıcak su veya buhar üretir (Öztürk vd.,2011). Konsantre güneş enerjisi sistemleri ise büyük ölçekli enerji üretimi için yoğunlaştırılmış güneş ışığını kullanır. Bu teknolojiler, enerji verimliliğini artırarak hem bireysel hem de endüstriyel düzeyde fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktadır.

Güneş enerjisinin temel avantajlarından biri, çevresel etkilerinin minimum seviyede olmasıdır. Geleneksel enerji kaynaklarının aksine, güneş enerjisi üretimi sırasında sera gazı emisyonu gerçekleşmez. Bu da iklim değişikliğiyle mücadelede güneş enerjisini kritik bir araç haline getirir. Ayrıca, fosil yakıt rezervlerinin tükenme riski göz önüne alındığında, güneş enerjisi gelecekteki enerji güvenliği açısından önemli bir alternatif olarak görülmektedir.

Güneş enerjisini kullanarak soğutma yapmak, özellikle enerji yoğun sektörlerde çevresel etkilerin azaltılmasında büyük bir rol oynamaktadır. Soğutma sistemleri, binalardan gıda depolarına,

endüstriyel tesislerden hastanelere kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Geleneksel soğutma yöntemlerinin enerji tüketimi yüksektir ve genellikle fosil yakıtlara dayalıdır. Güneş enerjisi, bu tür uygulamalar için hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunar.

Sonuç olarak, güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemleri, enerji verimliliğini artırırken karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Bu bölümde, güneş enerjisinin temel prensipleri, teknolojik altyapısı ve soğutma alanındaki uygulamaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Güneş enerjisinin potansiyeli, yenilikçi çözümler geliştirmek ve sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek için geniş bir yelpazede değerlendirilmektedir.

1.1. Güneş enerjisi nedir? Potansiyeli ve teknolojileri

Güneş enerjisi, Güneş'ten yayılan elektromanyetik radyasyonun çeşitli teknolojilerle toplanarak enerjiye dönüştürülmesi prensibine dayanır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı, gezegenimizin enerji ihtiyacının kat kat üzerinde bir potansiyele sahiptir (Kapluhan,2014). Bu sınırsız enerji kaynağı, çevresel etkileri en aza indiren sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Güneş enerjisinin potansiyeli oldukça büyüktür; yılda Dünya'ya ulaşan güneş ışınımı, insanlığın mevcut enerji ihtiyacının katbekat üzerindedir ve tüm fosil yakıt rezervlerinin içerdiği enerjiden çok daha fazladır. Güneş, her gün yaklaşık 173.000 terawatt enerji yaymakta olup, bu miktar, tüm küresel enerji tüketiminin binlerce katıdır. Ancak bu devasa

enerji potansiyeline rağmen, mevcut teknolojilerle bu enerjinin yalnızca küçük bir kısmı kullanılabilir. Bunun temel nedenleri arasında enerji dönüşüm süreçlerindeki verimlilik sınırlamaları, depolama maliyetleri, teknolojik altyapı eksiklikleri ve bazı bölgelerde güneş ışınımının sürekliliğinin sağlanamaması gibi faktörler yer almaktadır.

Bu büyük potansiyeli değerlendirmek amacıyla geliştirilen başlıca teknolojiler fotovoltaik (PV) paneller, güneş termal sistemleri ve konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken hücrelerden oluşur ve bireysel konutlardan büyük ölçekli enerji santrallerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Teknolojik gelişmelerle birlikte, PV hücrelerinin verimliliği giderek artmakta ve üretim maliyetleri düşmektedir. Özellikle perovskit güneş hücreleri gibi yeni nesil malzemelerin kullanımı, fotovoltaik teknolojinin geleceğini şekillendiren önemli inovasyonlar arasında yer almaktadır.

Güneş termal sistemleri ise güneş ışığının doğrudan ısı enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır. Bu sistemler, sıcak su üretimi, ısıtma sistemleri, sanayi süreçleri ve güneş destekli soğutma teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş termal kolektörleri, suyu veya bir ısı transfer akışkanını ısıtarak enerji depolama veya anlık kullanım için uygun hale getirir. Termal enerji depolama sistemleri ile birleştirildiğinde, bu sistemler gece saatlerinde bile enerji sağlamaya devam edebilir.

Bir diğerk önemli teknoloji olan konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemleri, büyük ölçekli elektrik üretimi için geliştirilmiştir. CSP sistemleri, aynalar veya lensler kullanarak güneş ışığını yoğunlaştırır ve yüksek sıcaklıklarda ısı enerjisi üretir. Bu enerji, türbinler aracılığıyla elektriğe dönüştürülerek enerji santrallerinde kullanılabilir. CSP sistemleri, erimiş tuz tabanlı enerji depolama çözümleri ile entegre edildiğinde, güneş battıktan sonra dahi enerji üretimini sürdürebilir.

Güneş enerjisi teknolojilerindeki ilerlemeler, bu sistemlerin daha geniş bir kullanım alanına yayılmasını sağlamaktadır. Esnek ve hafif fotovoltaik filmler, entegre binalarda kullanılabilirken, yüzer güneş panelleri su yüzeylerinde kurularak arazi kullanımına gerek kalmadan enerji üretimi sağlayabilir. Ayrıca, akıllı şebekeler ile güneş enerjisi sistemleri entegre edilerek enerji yönetimi daha etkin hale getirilmektedir.

Sonuç olarak, güneş enerjisinin potansiyeli, insanlığın enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde karşılayabilecek seviyededir. Ancak bu potansiyelin tam anlamıyla değerlendirilmesi için enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesi, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve verimlilik artırıcı yeni teknolojilerin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Gelecekte, güneş enerjisinin küresel enerji sektöründe çok daha büyük bir paya sahip olması beklenmektedir. Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemeler kullanır. Bu sistemler, çatı uygulamalarından büyük güneş enerji santrallerine kadar farklı ölçeklerde kullanılabilir. Güneş

termal sistemleri ise güneşten gelen ısı enerjisini toplayarak su ısıtma, ısıtma destek sistemleri ve hatta endüstriyel süreçlerde kullanılacak enerji sağlar.

Konsantre güneş enerjisi sistemleri, aynalar veya lensler kullanarak güneş ışığını küçük bir alana odaklar ve yüksek sıcaklıklarda enerji üretimi sağlar(Bayraktar vd.,2023). Bu sistemler, özellikle elektrik üretimi ve büyük ölçekli enerji projelerinde tercih edilmektedir. Tüm bu teknolojiler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji sektöründe köklü değişikliklere yol açmaktadır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi yalnızca çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmakla kalmaz, aynı zamanda enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma açısından da kritik bir öneme sahiptir. Bu potansiyelin daha etkin kullanılması için bilimsel araştırmalar ve yenilikçi teknolojilerle desteklenmesi gerekmektedir.

1.2. Güneş enerjisi kullanarak soğutma neden önemli?

Geleneksel soğutma sistemleri, küresel enerji tüketiminde büyük bir paya sahiptir ve genellikle fosil yakıtlarla çalışan elektrik şebekesine bağımlıdır. Klima sistemleri, endüstriyel soğutma üniteleri, gıda muhafaza depoları ve tıbbi soğutma uygulamaları gibi birçok alanda kullanılan bu sistemler, yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli sorunlar doğurmaktadır. Fosil yakıtlarla çalışan enerji santralleri, soğutma sistemleri için gerekli olan elektriği üretirken büyük miktarda karbon dioksit (CO₂) ve diğer sera gazlarını atmosfere salmaktadır. Bu durum, küresel ısınmayı hızlandıran ve iklim değişikliği ile mücadeleyi zorlaştıran en önemli etkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve fiyat

dalgalanmalarına açık olması, geleneksel soğutma sistemlerinin işletme maliyetlerini artırarak ekonomik sürdürülebilirliği de tehdit etmektedir.

Bu sorunlara çözüm olarak, güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemleri, enerji tüketimini azaltan ve çevre dostu bir alternatif sunan yenilikçi bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjili soğutma sistemleri, doğrudan güneş ışığını kullanarak veya fotovoltaik paneller aracılığıyla elektrik üreterek çalışabilir. Bu sistemler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon salımını düşürür ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Aynı zamanda, güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek enerji arz güvenliğini artırır ve sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlar.

Özellikle sıcak iklim bölgelerinde, güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemleri büyük avantajlar sunmaktadır. Güneş ışınımının en yoğun olduğu saatlerde soğutma ihtiyacı da maksimum seviyeye ulaştığından, bu sistemler enerji arz ve talebini doğal bir dengeye oturtmaktadır. Bu sayede, enerji şebekesi üzerindeki yük hafifletilirken, aşırı talep nedeniyle yaşanan elektrik kesintilerinin de önüne geçilebilir. Ayrıca, elektrik şebekesine bağlı olmayan off-grid sistemler, gelişmekte olan ülkelerde ve kırsal bölgelerde enerjiye erişimi olmayan topluluklar için ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemleri, farklı teknolojilerle uygulanabilmektedir. Adsorpsiyon ve absorpsiyon soğutma sistemleri,

güneş ısını kullanarak soğutma sağlayan termal sistemlerdir ve özellikle büyük ölçekli uygulamalar için uygundur. Fotovoltaik (PV) destekli soğutma sistemleri, güneş panelleri aracılığıyla üretilen elektrikle çalışan kompresörlü soğutma sistemlerini destekleyerek, enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, evaporatif soğutma sistemleri, düşük enerji tüketimiyle doğrudan hava sıcaklığını düşürerek soğutma sağlayan bir başka alternatif olarak dikkat çekmektedir. Güneş enerjisiyle çalışan soğutma teknolojileri, özellikle sıcak ve güneşli bölgelerde büyük bir avantaja sahiptir (Alazazmeh vd., 2015). Soğutma ihtiyacının en yüksek olduğu yaz aylarında güneş ışınımı en yoğun düzeyde olduğu için, bu enerji kaynağı verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu durum, enerji arz ve talebinin doğal bir dengede olmasını sağlar. Örneğin, güneş enerjili soğutma sistemleri; binalarda klima, gıda saklama sistemleri ve tıbbi alanlarda soğuk zincirin korunması gibi kritik uygulamalarda kullanılabilir.

Ayrıca, enerji erişiminin kısıtlı olduğu bölgelerde güneş enerjili sistemler hayati bir çözüm sunar. Elektrik şebekesine bağımlı olmayan bu sistemler, uzak yerleşim yerlerinde veya gelişmekte olan ülkelerde ekonomik ve çevresel faydalar sağlar. Güneş enerjisiyle çalışan soğutma sistemlerinin kullanımının artması, enerji dönüşümünü destekleyerek küresel iklim hedeflerine ulaşılmasına da katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi kullanarak soğutma yapmak; hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu yenilikçi teknolojiler, sadece çevreye dost bir seçenek

değil, aynı zamanda geleceğin enerji sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ İLE SOĞUTMA SİSTEMLERİ

Güneş enerjisi, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Son yıllarda, yalnızca elektrik üretimi değil, aynı zamanda soğutma sistemleri gibi farklı alanlarda da etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel soğutma teknolojileri, yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkiler nedeniyle birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisinin soğutma süreçlerinde kullanılması, enerji verimliliğini artırarak fosil yakıt bağımlılığını azaltan bir alternatif sunmaktadır (Kizilkan vd., 2016).

Güneş enerjisi ile soğutma sistemleri, günümüzün artan enerji talebine ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yanıt veren yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır. Bu sistemler, temel olarak iki ana yöntemle uygulanmaktadır: termal soğutma sistemleri ve fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri. Termal soğutma sistemleri, güneşten gelen ısı enerjisini doğrudan kullanarak soğutma sağlarken, fotovoltaik tabanlı sistemler güneş ışığını elektrik enerjisine çevirerek geleneksel soğutma ekipmanlarını çalıştırmaktadır. Her iki yöntem de enerji tasarrufu sağlama, karbon emisyonlarını azaltma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı düşürme gibi önemli avantajlar sunmaktadır.

Termal soğutma sistemleri, güneş enerjisini doğrudan ısı enerjisine çevirerek soğutma işlemini gerçekleştiren sistemlerdir. Bu sistemlerde genellikle adsorpsiyonlu soğutma, absorpsiyonlu soğutma ve evaporatif soğutma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Adsorpsiyonlu ve

absorpsiyonlu sistemler, ısıya duyarlı özel akışkanlar kullanarak çevre dostu soğutma çözümleri sunarken, evaporatif soğutma sistemleri ise suyun buharlaşma prensibini kullanarak sıcaklığı düşürmektedir. Termal sistemler, özellikle büyük ölçekli uygulamalar için uygundur ve endüstriyel tesisler, ticari binalar ve tarım sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu sistemlerin ısı depolama teknolojileri ile entegre edilmesi, gece saatlerinde veya düşük güneş ışınımı koşullarında bile etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, güneş panelleri aracılığıyla üretilen elektriğin doğrudan soğutma sistemlerine yönlendirilmesiyle çalışmaktadır. Bu sistemler, klimalar, soğutucu dolaplar ve endüstriyel soğutma üniteleri gibi cihazların şebekeye bağımlılığını azaltarak güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılmasını sağlamaktadır. Fotovoltaik panellerle çalışan soğutma sistemleri, çatı tipi PV paneller, entegre bina sistemleri ve yüzer güneş panelleri gibi farklı formatlarda uygulanabilmektedir. Özellikle off-grid sistemler, elektriğe erişimin sınırlı olduğu kırsal bölgelerde enerji bağımsızlığı sağlamaktadır. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen hibrit sistemler, fotovoltaik panelleri termal soğutma çözümleriyle birleştirerek enerji verimliliğini daha da artırmaktadır.

Bu bölümde, güneş enerjisi ile çalışan soğutma sistemlerinin temel prensipleri, avantajları ve farklı uygulama alanları ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır. Termal soğutma sistemleri (adsorpsiyon, absorpsiyon ve evaporatif soğutma) ile fotovoltaik tabanlı soğutma yöntemleri

arasındaki farklar, bu sistemlerin hangi koşullarda daha verimli çalıştığı ve sürdürülebilir enerji politikaları açısından taşıdığı önem analiz edilecektir. Ayrıca, bu teknolojilerin enerji sektöründeki geleceği, gelişen yenilikler ve küresel pazardaki büyüme potansiyeli değerlendirilecektir. Güneş enerjili soğutma sistemleri, küresel enerji dönüşümünde kritik bir rol oynayarak, hem bireysel tüketiciler hem de büyük ölçekli endüstriyel işletmeler için yenilikçi çözümler sunmaya devam edecektir.

2.1. Termal Soğutma Sistemleri: Adsorpsiyon, Absorpsiyon ve Evaporatif Soğutma

Termal soğutma sistemleri, güneş enerjisini doğrudan ısı enerjisine dönüştürerek soğutma işleminde kullanan teknolojilerdir (Qu vd., 2010). Bu sistemler, özellikle fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak, enerji maliyetlerini düşürmek ve karbon emisyonlarını en aza indirmek için önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Termal soğutma sistemlerinde, güneş enerjisi doğrudan veya dolaylı olarak bir ısı kaynağı olarak kullanılarak ortamdan ısı çekmek ve sıcaklık seviyelerini kontrol etmek amacıyla uygulanmaktadır. Geleneksel elektrikle çalışan soğutma sistemlerinden farklı olarak, bu sistemler yüksek sıcaklıklarda bile verimli bir şekilde çalışabilir ve özellikle sıcak iklim bölgelerinde büyük avantajlar sağlar.

Termal soğutma sistemleri üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

- Adsorpsiyonlu soğutma
- Absorpsiyonlu soğutma
- Evaporatif soğutma

Her bir yöntem, farklı çalışma prensiplerine sahiptir ve uygulama alanına göre optimize edilerek daha verimli ve sürdürülebilir çözümler sunabilir. Geleneksel soğutma teknolojilerine kıyasla, termal soğutma yöntemleri daha az mekanik bileşene sahiptir, bu da sistemlerin bakım ihtiyacını ve uzun vadeli işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

Ayrıca, elektrik kesintilerinden etkilenmeden çalışabilmeleri, bu sistemleri kritik tesislerde ve enerji erişimi kısıtlı bölgelerde kullanışlı hale getirmektedir.

Bu sistemlerin verimliliği, güneş ışınımı miktarı, çevresel sıcaklık, kullanılan akışkan türü ve termal depolama kapasiteleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Örneğin, ısı depolama üniteleri ile entegre edildiğinde, bu sistemler güneş battıktan sonra bile soğutma işlemini sürdürebilir. Güneş yoğunlaştırıcı aynalar ve termal kolektörler gibi yenilikçi teknolojiler ise sistemin enerji toplama kapasitesini artırarak daha yüksek verimlilik sağlamaktadır.

Aşağıda, bu üç yöntemin temel çalışma prensipleri, avantajları, sınırlamaları ve matematiksel açıklamaları ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Termal soğutma sistemlerinin gelecekteki gelişim potansiyeli, endüstriyel ve ticari kullanımları ve entegre enerji çözümleri ile nasıl daha verimli hale getirilebileceği de kapsamlı bir şekilde incelenecektir.

2.1.1. Adsorpsiyonlu Soğutma

Adsorpsiyonlu soğutma, sıcaklığı düşürmek için adsorban maddelerin (genellikle silika jel, alüminyum oksit, aktif karbon ve zeolit gibi gözenekli malzemeler) kullanıldığı ısıtma ve soğutma döngüsüne dayanan bir sistemdir (Sidhareddy vd., 2022). Bu sistemler, özellikle düşük enerji tüketimi, çevre dostu yapısı ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltması nedeniyle geleneksel soğutma yöntemlerine alternatif olarak değerlendirilmektedir. Adsorpsiyonlu soğutma, genellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile çalıştırılabildiğinden, güneş enerjisi, atık ısı ve jeotermal enerji gibi sürdürülebilir kaynaklarla entegre edilebilmektedir.

Bu sistemde, güneş enerjisi ile ısıtılan adsorban, bir soğutma sıvısını (örneğin su veya amonyak) buharlaştırarak ısıyı absorbe eder. Isının alınmasıyla birlikte soğutucu akışkanın buharlaşması, ortam sıcaklığının düşmesini sağlar. Daha sonra, adsorban malzeme ortamdaki ısıyı çekerek düşük sıcaklıklara iner ve soğutma etkisi meydana gelir. Soğutucu buharı, sistemin diğer bileşenlerinden biri olan kondansatörde yoğunlaşarak tekrar sıvı hale dönüşür ve çevrim devam eder.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin temel bileşenleri şunlardır:

- ✓ Adsorban malzeme (silika jel, alümina, aktif karbon, zeolit vb.): Isıyı depolayan ve buharlaştırıcı sıvıyı emen bileşen.
- ✓ Soğutma sıvısı (genellikle su veya amonyak): Isıyı taşıyan ve buharlaşma/yoğunlaşma döngüsüne katılan madde.
- ✓ Evaporatör: Soğutucu akışkanın buharlaşarak ortamdan ısı çektiği bölüm.
- ✓ Kondansatör: Buharlaşan akışkanın yoğunlaşarak sıvı hale dönüştüğü bölüm.
- ✓ Isı kaynağı: Genellikle güneş enerjisi veya atık ısı kullanılır.

Bu sistemlerin en büyük avantajlarından biri, hareketli parçalarının az olması nedeniyle bakım maliyetlerinin düşük olmasıdır. Ayrıca, geleneksel soğutucu gazlar yerine çevre dostu akışkanlar kullanılması, adsorpsiyonlu soğutmayı ozon tabakasına zarar vermeyen ve düşük karbon salınımına sahip bir çözüm haline getirmektedir.

Termodinamik prensipler açısından, adsorpsiyon sürecinin etkinliği adsorban malzemenin seçimi, sistemin çalışma sıcaklığı ve çevresel koşullara bağlıdır. Adsorpsiyonun verimliliğini belirleyen temel termodinamik denklemler, adsorpsiyon/desorpsiyon süreçleri arasındaki ısı transferi, basınç farkları ve soğutma yükü hesaplamaları ile ifade edilir.

Günümüzde, adsorpsiyonlu soğutma sistemleri endüstriyel soğutma, gıda muhafazası, binalarda merkezi soğutma sistemleri ve güneş enerjili iklimlendirme sistemleri gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde elektrik erişiminin sınırlı olduğu bölgelerde, güneş enerjisiyle entegre adsorpsiyonlu soğutma sistemleri düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Gelecekte, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin nano-malzemeler ve gelişmiş adsorban teknolojileri ile daha verimli hale getirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, akıllı enerji yönetim sistemleri ve hibrit çözümlerle entegre edilerek, bu sistemlerin daha yaygın kullanımı sağlanacaktır. Bu bölümde, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin çalışma prensipleri, avantajları, termodinamik analizleri ve uygulama alanları detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

Matematiksel olarak, adsorpsiyonlu soğutma döngüsünün verimliliğini belirleyen temel parametreler, adsorpsiyon ve desorpsiyon ısıları arasındaki farklardır (Velte-Schäfer vd.,2023). Adsorpsiyon süreci sırasında enerji denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{ads} = m \cdot (h_{ads} - h_0) \quad (2.1)$$

Burada:

- Q_{ads} adsorpsiyon sürecinde alınan ısı,

- m adsorbanın kütlesi,
- h_{ads} adsorpsiyon sırasında sıvının entalpisi,
- h_0 başlangıç entalpidir.

Desorpsiyon işleminde ise adsorban, güneş enerjisi ile ısıtılarak sıvıyı serbest bırakır ve çevresine ısı salar:

$$Q_{des} = m \cdot (h_{des} - h_0) \quad (2.2)$$

Bu tür sistemler, genellikle düşük sıcaklık farklarına sahip ortamlarda ve ticari uygulamalarda tercih edilir.

2.1.2. Absorpsiyonlu Soğutma

Absorpsiyonlu soğutma, bir gazın sıvı tarafından absorbe edilmesiyle çalışan, çevre dostu ve enerji verimli bir soğutma teknolojisidir. Bu sistemde, genellikle su veya lityum-bromür (LiBr) çözeltisi gibi bir adsorban, soğutma gazını absorbe eder. Bu gaz, sıvı tarafından emildikten sonra güneş enerjisi gibi dış bir kaynakla ısıtılarak buharlaştırılır. Güneş enerjisi, adsorban sıvısının sıcaklığını artırarak buharlaşmaya yol açar. Elde edilen bu buhar, bir kompresör aracılığıyla sıkıştırılır ve ardından ısıyı ortamdan uzaklaştırmak için bir evaporatöre yönlendirilir. Evaporatörde, buharın çevreye yaydığı ısı, ortam havasından veya bir başka çevresel kaynaktan alınır. Sonuç olarak, ortam sıcaklığı düşer ve soğutma işlemi gerçekleştirilir.

Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde, lityum-bromür (LiBr) gibi sıvılar özellikle tercih edilir çünkü bu tür sıvılar, geniş bir sıcaklık aralığında yüksek verimlilikle çalışabilirler. LiBr, özellikle düşük sıcaklıklar ve yüksek nem koşullarında etkili bir soğutma sağlar. Ayrıca, güneş enerjisi ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sistemleri, elektrik tüketimini azaltarak sürdürülebilir enerji çözümleri sunar ve çevre dostu özellikleri ile geleneksel soğutma sistemlerine göre büyük avantajlar sağlar. Bu sistemler, özellikle güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde, düşük enerji maliyetleriyle etkili soğutma çözümleri sunar.

Bu tür sistemlerin verimliliği, kullanılan absorbanın özelliklerine ve sistemin tasarımına bağlı olarak değişebilir. Lityum-bromür çözeltisi, yüksek ısı kapasitesi ve düşük buhar basıncı sayesinde, çeşitli sıcaklık ve nem koşullarında istikrarlı performans sergileyebilir. Ayrıca, absorpsiyonlu soğutma sistemleri, endüstriyel soğutma, ticari binalar ve büyük ölçekli güneş enerjisi tesislerinde de kullanılarak enerji verimliliğini artırabilir ve sera gazı emisyonlarını azaltabilir (Mustafa vd., 2021).

Absorpsiyonlu soğutma döngüsünün matematiksel modellenmesi, termodinamik denklemler ve entalpi hesaplarıyla yapılır. Bu döngünün temel denklemleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{evap} = \dot{m}_c \cdot (h_{e2} - h_{e1}) \quad (2.3)$$

Burada:

- Q_{evap} evaporatördeki ısı,
- m_c soğutma akışkanının kütle debisi,
- h_{e2} ve h_{e1} sırasıyla evaporatördeki entalpi değerleridir.

Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin verimliliği, genellikle sıcaklık farkı, akışkanın özellikleri ve sistemin termal düzenlemeleriyle doğrudan ilişkilidir.

2.1.3. Evaporatif Soğutma

Evaporatif soğutma, su buharlaşarak ortamdan ısı alırken sıcaklık düşüşü sağlar ve doğrudan çevresel enerjiyle etkileşimde bulunan, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir soğutma yöntemidir. Bu basit ama etkili soğutma yöntemi, özellikle açık hava soğutma sistemlerinde ve büyük binalarda, endüstriyel tesislerde veya tarımsal sulama alanlarında geniş bir uygulama alanı bulur. Evaporatif soğutmanın temel prensibi, suyun buharlaşarak gaz fazına geçerken, bu esnada çevresindeki havadan enerji (ısı) almasıdır. Su buharlaştıkça, ortamdan aldığı ısı sayesinde havanın sıcaklığını düşürür ve böylece çevreye soğutma etkisi sağlar.

Bu soğutma yönteminin verimliliği, ortamın nem oranı ve hava akış hızına bağlı olarak değişir. Nem oranının düşük olduğu ortamlarda evaporatif soğutma, daha etkili sonuçlar verir çünkü kuru hava, suyun buharlaşmasına daha fazla izin verir. Güneş enerjisi ise, suyun buharlaşma sürecini hızlandırarak soğutma etkisini artırır. Özellikle güneş enerjisi ile çalışan evaporatif soğutma sistemleri, hem enerji

verimliliğini artırır hem de çevre dostu bir soğutma alternatifi sunar. Güneş ışığının doğrudan suyun üzerine düşmesi, suyun buharlaşmasını hızlandırarak daha fazla ısıyı atmosferden uzaklaştırmaya yardımcı olur.

Evaporatif soğutma sistemleri, büyük binalarda ve endüstriyel tesislerde enerji tüketimini azaltabilir, çünkü bu sistemler genellikle elektrikli kompresörler ve soğutucu gazlar yerine doğal bir süreç olan buharlaşmayı kullanır. Ayrıca, doğal su kaynaklarını kullanarak çevre üzerindeki etkiyi minimize eder. Bu özellik, özellikle sıcak iklimlere sahip bölgelerde oldukça faydalıdır. Güneş enerjisi ile desteklenen evaporatif soğutma sistemleri, sıfır emisyonlu soğutma çözümleri sunarak, enerji tasarrufu sağlarken aynı zamanda sürdürülebilir soğutma teknolojilerine olan ilgiyi artırır.

Evaporatif soğutma, ısı transfer katsayısının yüksek olduğu ve suyun kolayca buharlaştığı bölgelerde etkili bir yöntemdir (Wang vd.,2022). Bu sistemde, suyun buharlaşma ısısı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \dot{m}_w \cdot h_{fg} \quad (2.4)$$

Burada:

- Q ortamdan alınan ısı,
- \dot{m}_w suyun kütle debisi,
- h_{fg} suyun buharlaşma ısısıdır.

Evaporatif soğutma, yüksek verimliliği ile özellikle sıcak iklimlerde ve enerji maliyetlerinin yüksek olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Ancak, nemli bölgelerde bu yöntem daha az etkili olabilir.

Termal soğutma sistemleri, çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle yaz aylarında sıcaklık kontrolü gerektiren binalarda, seralarda ve gıda işleme sektörlerinde bu tür sistemler etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi ile entegre edilen termal soğutma sistemleri, enerji tasarrufu sağlarken çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaktadır.

2.1.4. Gelecek Perspektifleri

Termal soğutma sistemleri, güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak çevre dostu ve sürdürülebilir soğutma çözümleri sunar. Gelişen teknoloji ile birlikte, bu sistemler, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek verimlilikle çalışabilme potansiyeline sahiptir. Adsorpsiyon, absorpsiyon ve evaporatif soğutma yöntemleri, çeşitli avantajlar ve uygulama alanlarıyla birbirini tamamlayan teknolojilerdir. Her bir sistemin kendine özgü avantajları bulunmakla birlikte, kullanım alanlarına göre verimlilikleri ve ekonomik faydaları değişkenlik gösterebilir. Adsorpsiyonlu ve absorpsiyonlu soğutma sistemleri, özellikle güneş enerjisiyle entegre edilen uygulamalarda, doğal kaynakları kullanarak çevreye olan etkiyi en aza indirir. Evaporatif soğutma ise basitliği ve düşük maliyetleri ile özellikle açık hava soğutma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu sistemlerin verimliliği, kullanılan malzemelerin özelliklerine, sıcaklık farklarına ve uygulama alanlarına bağlı olarak büyük değişiklikler gösterebilir. Örneğin, adsorpsiyon sistemlerinde kullanılan adsorban malzemenin yüzey alanı, sistemin verimliliğini doğrudan etkilerken, absorpsiyon sistemlerinde sıvı çözücünün sıcaklık ve basınç özellikleri belirleyici faktörlerdir. Evaporatif soğutma sistemlerinde ise ortamın nem oranı ve hava akış hızı gibi çevresel faktörler verimliliği etkileyen önemli parametrelerdir. Ancak, bu sistemlerin genel olarak daha verimli ve ekonomik hale gelmesi, teknolojinin ilerlemesiyle mümkündür.

Gelecekte, termal soğutma teknolojilerinin daha geniş bir şekilde uygulanabilmesi için, sistem verimliliklerinin artırılması ve daha ucuz, verimli malzemelerin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Özellikle, yeni nesil nanomateryaller ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemeler, soğutma sistemlerinin daha etkili çalışmasını sağlayabilir. Bu bağlamda, araştırmaların yoğunlaştığı alanlardan biri de, malzemelerin ısıl iletkenliklerinin artırılması ve daha düşük enerji tüketimi sağlayan çözümlerin geliştirilmesidir.

Ayrıca, güneş enerjisiyle entegre edilen bu termal soğutma sistemlerinin daha yaygın hale gelmesi, enerji verimliliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda karbon salınımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği artıracaktır. Bu teknolojilerin tarım, endüstri ve ticari binalar gibi farklı alanlarda uygulanabilirliği, güneş enerjisinin potansiyelinden daha fazla yararlanmayı sağlayacak ve bu tür çözümler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak daha yeşil bir

gelecek inşa edilmesine katkı sağlayacaktır. Böylece, termal soğutma sistemleri, hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük avantajlar sunan teknolojiler olarak gelecekteki enerji çözümlerinin temelini oluşturacaktır.

2.2. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Yöntemleri

Fotovoltaik (PV) tabanlı soğutma sistemleri, güneş enerjisini kullanarak enerji verimliliğini artırmaya ve çevresel etkileri azaltmaya yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunar. Bu sistemler, özellikle sıcak iklimlerde, yüksek enerji talepleriyle başa çıkmak ve elektrikli soğutma sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak için ideal bir çözüm olarak öne çıkar. Fotovoltaik paneller, güneş ışığından elektrik üretme kapasitesine sahip olduğundan, bu elektriği hem doğrudan elektrik enerjisi üretimi için hem de soğutma süreçlerinde kullanılacak ısı yönetimi sistemlerine yönlendirmek için etkin bir şekilde kullanılır. Bu sayede, enerji talebinin arttığı durumlarda, dışa bağımlılığın azalması sağlanır. PV tabanlı soğutma sistemleri, genellikle iki ana bileşenden oluşur: fotovoltaik panel ve soğutma sistemi.

Fotovoltaik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek, elektrik üretim kapasitesini maksimize eder. Bu elektrik enerjisi, soğutma sistemlerinin çalışmasını destekler ve böylece güneş ışığından elde edilen enerjinin büyük kısmı doğrudan çevresel sıcaklıkların düşürülmesine katkı sağlar. Soğutma sistemi ise bu enerjiyi kullanarak, ortamın sıcaklığını düşürmek amacıyla bir dizi ısı transferi mekanizması uygular. Bu mekanizmalar arasında evaporatif

soğutma, absorpsiyonlu soğutma, ve termal yönetim teknolojileri yer alabilir. Sistemlerin verimliliği, sadece elektrik üretimi açısından değil, aynı zamanda ısı transferi ve soğutma kapasitesinin optimize edilmesi açısından da önemli bir faktördür.

Verimliliği artırmak adına, PV tabanlı soğutma sistemlerinde fotovoltaik panellerin ısı yönetimi performansı da göz önünde bulundurulmalıdır. Fotovoltaik paneller, genellikle ışığa maruz kaldıklarında sıcaklıklarını artırır, bu da panel verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla, bu sistemlerde, panellerin soğutulması ve ısının etkili bir şekilde uzaklaştırılması kritik bir önem taşır. Özellikle, fotovoltaik panellerin ısını yönetmek için kullanılan termal soğutma çözümleri, hem panel verimliliğini artırmak hem de soğutma etkisini optimize etmek açısından kritik bir rol oynar. PV tabanlı soğutma sistemlerinde, soğutma işleminin etkinliği, kullanılan malzemelere, sistem tasarımına ve uygulama şartlarına göre değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, sistemlerin verimliliğini artırmak için çeşitli malzeme inovasyonları ve tasarım iyileştirmeleri üzerinde çalışılmaktadır.

Bu tür sistemlerin daha verimli ve ekonomik hale gelmesi, gelecekteki enerji çözümleri için önemli bir adım olacaktır. Gelişen teknoloji sayesinde, fotovoltaik panellerin verimliliği artırılırken, aynı zamanda ısı yönetimi sistemleri de daha etkili hale gelmektedir. Bu da, güneş enerjisi kullanılarak yapılan soğutma işlemlerinin daha geniş bir alanda uygulanabilirliğini sağlar. Bu teknolojilerin entegre edilmesiyle, özellikle güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde, hem enerji tasarrufu

sağlanabilir hem de çevre dostu soğutma çözümleri sunulabilir (Ahmed vd., 2024).

2.2.1. Fotovoltaik Paneller ve Soğutma Yöntemlerinin Temel Prensipleri

Fotovoltaik paneller, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışan cihazlardır. Güneş ışığı, panellerdeki yarı iletken malzemelerde elektriksel enerji üretir, ancak bu süreç sırasında panellerde ısı birikmesi kaçınılmazdır. Özellikle, güneş ışığının yoğun olduğu günlerde veya sıcak iklim koşullarında, fotovoltaik panellerin sıcaklıkları hızla artar. Bu ısınma, panel verimliliğini olumsuz etkileyebilir, çünkü yüksek sıcaklıklar, yarı iletken malzemelerin elektriksel özelliklerini bozar ve enerji dönüşüm verimliliğini düşürür. Bu nedenle, PV sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için panel sıcaklıklarının yönetilmesi ve uygun soğutma çözümlerinin uygulanması oldukça önemlidir.

PV tabanlı soğutma sistemlerinde, panel sıcaklıklarını düşürmek için çeşitli soğutma yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemler, genellikle aktif ve pasif soğutma sistemleri olarak iki ana kategoriye ayrılır. Pasif soğutma sistemleri, doğal çevresel faktörler ve yapısal tasarımlar kullanarak panel sıcaklıklarını düşürmeyi amaçlar. Bu tür sistemlerde, panellerin yüzey yapısı veya yerleştirildiği ortam koşulları (örneğin, hava akışı veya yüzey malzemelerinin ısı iletkenliği) soğutmayı sağlar. Pasif soğutma çözümleri genellikle düşük maliyetli ve bakım

gerektirmeyen çözümler sunar, ancak etkinlikleri çevresel faktörlere (örneğin, rüzgar hızı, hava nemi) bağlıdır.

Aktif soğutma sistemleri ise, genellikle harici enerji kaynakları kullanarak ısının etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar. Bu tür sistemler, sıvı soğutma (örneğin, su bazlı soğutma sistemleri) veya hava bazlı soğutma sistemleri (örneğin, fanlar ve soğutma yüzeyleri) gibi çeşitli yöntemler içerir. Aktif soğutma, genellikle daha etkili sonuçlar verir, çünkü bu sistemler panel sıcaklıklarını sürekli olarak izleyebilir ve ısınan panellerin verimliliğini artırmak için anında müdahale edebilir. Ancak, aktif soğutma sistemleri genellikle daha pahalıdır ve daha fazla bakım gerektirir, çünkü harici güç kaynağına ve bazı mekanik parçalara ihtiyaç duyarlar.

Her iki soğutma yöntemi de fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmaya yardımcı olur. Pasif sistemler, genellikle düşük enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik açısından daha avantajlıdır, ancak aktif sistemler daha yüksek soğutma kapasitesine sahiptir ve daha kararlı bir performans sergiler. Bu nedenle, her iki yöntem arasında seçim yaparken, kullanım alanı, iklim koşulları ve sistemin enerji ihtiyaçları gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Gelişen teknolojiler sayesinde, her iki yöntemi birleştirerek hibrit soğutma sistemleri oluşturmak da mümkün olmuştur. Bu tür hibrit sistemler, hem enerji verimliliğini artırmak hem de çevreye olan etkiyi azaltmak adına oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır.

Aktif Soğutma Yöntemleri

Aktif soğutma sistemlerinde, PV panellerin sıcaklıkları aktif olarak bir soğutma sıvısı ile düşürülür. Bu sıvı, ısıyı alarak panelden uzaklaştırır. Aktif soğutma yöntemlerinin verimliliği, ısıyı hızlı bir şekilde uzaklaştıran sistemlerin seçilmesine bağlıdır (Hussien vd.,2023). Yaygın olarak kullanılan aktif soğutma yöntemleri şunlardır:

- **PV/T (Fotovoltaik Termal) Sistemleri:** Bu sistemlerde fotovoltaik panellerin arkasında bir ısı transfer sıvısı bulunur. Isı, sıvı aracılığıyla taşınarak uzaklaştırılır. Bu yöntem, panelin elektrik üretimi ve ısı üretimini entegre bir şekilde yönetir.
- **Sıvı Soğutma Sistemleri:** Bu sistemlerde, sıvılar (örneğin su, antifriz karışımları) fotovoltaik panelin alt kısmına veya yüzeyine dolaştırılır. Sıvı, panelde biriken ısıyı alarak bir ısı değiştiriciye yönlendirir.

Fotovoltaik panellerin ısısının giderilmesi için, soğutma sıvısının ısı transfer kapasitesini hesaplamak amacıyla aşağıdaki denklem kullanılabilir (Basem VD.,2024):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Burada

- Q : Soğutma sıvısının taşıdığı ısı miktarı (W)
- m : Soğutma sıvısının debisi (kg/s)
- C_p : Soğutma sıvısının özgül ısısı (J/kg°C)
- ΔT : Soğutma sıvısının sıcaklık farkı (°C)' dir.

Bu denklem, soğutma sıvısının ısıyı alabilme kapasitesini gösterir ve sistem verimliliğini optimize etmek için sıvı debisi ve sıcaklık farkları dikkate alınmalıdır.

Pasif Soğutma Yöntemleri

Pasif soğutma sistemleri, doğal çevresel faktörlerden yararlanarak fotovoltaik panellerin soğutulmasını sağlar. Bu yöntemlerde, dış ortam koşullarına göre ısıyı soğutma panellerinden uzaklaştırmak için fanlar veya pompalar kullanılmaz. Pasif soğutma yöntemlerine örnekler:

- **Doğal Konveksiyon:** PV panelleri üzerinde meydana gelen ısınma, doğal olarak havanın hareketini teşvik eder. Bu yöntem, düşük sıcaklıklarda etkilidir ancak verimliliği sınırlıdır.
- **Yüzey Soğutma Yöntemleri:** Panellerin yüzeyine ısıyı emen malzemeler eklenebilir. Bu malzemeler, ısıyı doğrudan çevreye aktararak sistemin sıcaklık seviyesini düşürür.

Pasif soğutma sistemleri için genellikle ısı transferi denklemleri kullanılır. Örneğin, doğal konveksiyon için:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Burada;

- h : Konveksiyon ısı iletkenlik katsayısı ($W/m^2\text{°C}$)
- A : PV panel yüzey alanı (m^2)
- ΔT : Panelin sıcaklık farkı (°C)'dır.

2.2.2. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Sistemlerinin Verimliliği

PV tabanlı soğutma sistemlerinin verimliliği, hem elektrik üretimi hem de soğutma kapasitesine bağlı olarak belirlenir. Bu tür sistemlerde, fotovoltaik panellerin güneş ışığını elektriğe dönüştürme verimliliği, panel sıcaklıklarının düşük tutulmasına yardımcı olacak etkin soğutma çözümleriyle doğrudan ilişkilidir. Yüksek sıcaklıklar, panellerin verimliliğini önemli ölçüde azaltabilir, bu yüzden soğutma yöntemlerinin etkinliği kritik bir faktördür. Verimliliği artırmak için çeşitli stratejiler uygulanabilir (Rashid vd., 2023). Bu stratejiler, soğutma sisteminin tasarımını, kullanılan malzemeleri ve sistemin yerleştirilmesi gibi faktörleri kapsar.

Öncelikle, soğutma sıvısının seçimi, sistemin verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Soğutma sıvılarının ısı iletkenlikleri, viskoziteleri ve buharlaşma özellikleri, ısının ne kadar verimli bir şekilde uzaklaştırılacağını belirler. Örneğin, su, yüksek ısı iletkenliği sayesinde etkili bir soğutma sıvısı olarak kullanılır, ancak sistemde kullanılan sıvının çevresel koşullara ve ekonomik gereksinimlere göre optimize edilmesi gerekebilir. Ayrıca, sıvı soğutma sistemlerinde, sıvının dolaşım hızını kontrol eden pompalar ve ısı değiştiricileri de verimliliği etkileyen önemli bileşenlerdir.

Diğer bir strateji ise sistemin yerleştirilmesidir. Fotovoltaik panellerin yerleştirildiği ortamın çevresel koşulları, soğutma verimliliğini doğrudan etkiler. Örneğin, panelin hava akışını optimize etmek, soğutma performansını artırabilir. Ayrıca, panellerin konumları, güneş

ışığına maruz kalma açıları ve çevresel faktörler, güneş ışığının ne kadar verimli bir şekilde emileceğini etkiler. Bu bağlamda, PV panellerinin yerleştirilmesi, sadece güneş ışığını en iyi şekilde almak için değil, aynı zamanda etkin bir soğutma sağlamak için de dikkatle planlanmalıdır.

Diğer önemli bir strateji ise hibrit soğutma sistemlerinin kullanılmasıdır. Aktif ve pasif soğutma sistemlerinin kombinasyonu, verimliliği artırabilir. Örneğin, pasif soğutma sistemleri, panel sıcaklıklarının doğal yollarla düşmesini sağlar, ancak bu etki sınırlıdır. Aktif soğutma sistemleri ise daha hızlı ve etkin bir soğutma sağlayarak verimliliği artırabilir. Bu tür hibrit sistemler, enerji tüketimini dengeleyerek ve bakım gereksinimlerini minimize ederek daha sürdürülebilir çözümler sunar.

Son olarak, yenilikçi malzeme kullanımı da PV tabanlı soğutma sistemlerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynar. Gelişen nanoteknoloji ile üretilen yeni malzemeler, yüksek ısı iletkenlik özelliklerine sahip olmasının yanı sıra daha düşük maliyetlere sahip olabilir. Bu malzemeler, hem panel sıcaklıklarını yönetmek hem de soğutma sıvılarının performansını artırmak için kullanılabilir. Ayrıca, yeni malzeme araştırmaları, fotovoltaik sistemlerin performansını artırmanın yanı sıra, bu sistemlerin çevresel etkilerini de en aza indirmeye yönelik çözümler sunmaktadır.

Bu tür stratejiler, PV tabanlı soğutma sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırabilir, dolayısıyla bu sistemlerin daha geniş alanlarda uygulanabilirliğini sağlar.

Verimliliği artırmak için kullanılan en temel formül, PV panellerinin genel verimliliği ile ilgilidir. Elektrik verimliliği, panelin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesini ifade eder:

$$\eta_{elektrik} = \frac{P_{elektrik}}{A_{panel} \cdot G} \quad (2.7)$$

Burada;

- $\eta_{elektrik}$: Elektrik verimliliği
- $P_{elektrik}$: Üretilen elektrik gücü (W)
- A_{panel} : PV panel yüzey alanı (m²)
- G : Güneş ışınımı (W/m²)'dir.

Soğutma verimliliği ise, soğutma sisteminin taşıdığı ısı miktarına karşılık gelen elektrik üretimindeki artışı ifade eder:

$$\eta_{soğutma} = \frac{P_{elektrik}}{Q_{soğutma}} \quad (2.8)$$

- $\eta_{soğutma}$: Soğutma verimliliği
- $Q_{soğutma}$: Taşınan ısı miktarı (W) olarak tanımlanır.

2.2.3. Fotovoltaik Tabanlı Soğutma Sistemlerinin Uygulama Alanları

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, özellikle enerji ihtiyacının yüksek olduğu ve güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde kullanılır. Bu

sistemler, güneş ışığından elde edilen enerjiyi verimli bir şekilde kullanarak çevresel etkileri azaltırken, aynı zamanda enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olur. Özellikle, binaların soğutulmasında, tarımda (seralar için), endüstriyel soğutma ve elektrikli araçlarda batarya soğutması gibi alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahiptir. Binalarda kullanılan PV tabanlı soğutma sistemleri, sıcaklık kontrolü sağlamakla birlikte, iç mekanların konfor seviyesini artırır ve enerji tüketimini optimize eder. Tarımda ise, seralar için soğutma sağlayan PV sistemleri, bitkilerin sıcaklık stresini azaltarak verimi artırabilir. Ayrıca, endüstriyel soğutma süreçlerinde, yüksek sıcaklıkların yönetilmesi için bu tür sistemlerin kullanılması, özellikle fabrikaların ve üretim tesislerinin enerji verimliliğini artırabilir. Elektrikli araçlarda ise, batarya soğutması sağlayarak bataryaların ömrünü uzatmak ve performansını artırmak mümkündür.

PV/T (Fotovoltaik Termal) sistemleri, daha az alanda yüksek verimli soğutma sağlamak için tercih edilen çözümlerden biridir. Bu sistemler, hem elektrik üretimi hem de ısı geri kazanımı sağlama avantajı sunar, bu da özellikle alan kısıtlamaları olan yerlerde kullanımı daha verimli hale getirir. PV/T sistemlerinin etkinliği, soğutma ve elektrik üretim süreçlerini birleştirerek çift amaçlı bir çözüm sunar. Bu tür sistemlerin birleştirilmesi, aynı zamanda enerji kaybını da azaltır ve bu da genel enerji verimliliğini artırır. Hem aktif hem de pasif soğutma sistemlerinin entegrasyonu, sistemlerin daha etkili çalışmasını sağlar. Aktif soğutma yöntemleri, sıvı soğutma sistemleri veya hava soğutma

çözümleri ile desteklenebilirken, pasif soğutma yöntemleri çevresel faktörlerden yararlanarak daha doğal bir soğutma sağlar.

Fotovoltaik tabanlı soğutma yöntemlerinin uygulanması, yenilenebilir enerji kullanımını artırarak çevresel etkileri azaltan etkili bir çözüm sunmaktadır (Karakaya vd., 2019). Bu tür sistemlerin, enerji verimliliği sağlamakla kalmayıp aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltmaya katkı sağladığı da açıktır. Ayrıca, bu sistemlerin yaygın kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak daha sürdürülebilir enerji çözümlerinin yaygınlaşmasına büyük katkı sağlar. Gelişen teknoloji ve yenilikçi malzeme kullanımlarıyla, bu sistemlerin daha verimli hale gelmesi ve daha geniş alanlarda uygulanabilirliği mümkün olacaktır.

3. UYGULAMALAR VE GERÇEK DÜNYA ÖRNEKLERİ

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, farklı ölçeklerde ve uygulama alanlarında geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Bu sistemlerin en önemli avantajlarından biri, güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürmesidir. Ticari uygulamalarda, özellikle alışveriş merkezleri, oteller, ofis binaları ve büyük ticari tesisler gibi yüksek enerji tüketimi olan yapılarda fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, enerji verimliliğini artırarak işletme maliyetlerini azaltır. Bu tür yapılar, sürekli olarak ısıtma ve soğutma ihtiyacı duyduğu için, fotovoltaik sistemlerin kullanımı hem maliyetleri düşürmek hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamak açısından büyük bir avantaj sunar. Ayrıca, bu sistemler, ticari binalarda

Çalışanların konforunu artırırken, yapının genel çevresel etkisini de azaltır.

Endüstriyel alanlarda ise, yüksek ısı üretiminin olduğu fabrikalar, üretim tesisleri ve veri merkezleri gibi yerlerde fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin kullanımı, verimliliği artırırken operasyonel güvenliği de sağlar. Özellikle veri merkezlerinde, sürekli olarak yüksek ısının üretildiği ve soğutma gereksiniminin kritik olduğu ortamlar için bu tür sistemler oldukça etkilidir. Fotovoltaik sistemler, enerji üretiminin yanı sıra, veri merkezlerinin aşırı ısınmasını önler ve soğutma maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Fabrikalarda ise, enerji maliyetleri genellikle büyük bir gider kalemi oluşturduğundan, fotovoltaik tabanlı soğutma çözümleri, üretim süreçlerini daha ekonomik hale getirir ve işletme verimliliğini artırır.

Evsel uygulamalarda, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri özellikle güneşli bölgelerde bireysel kullanıcılar için önemli faydalar sağlar. Bu sistemler, ev sahiplerine enerji bağımsızlığı sunarak, elektrik faturalarını düşürür ve düşük maliyetli soğutma imkanı sunar. Güneş enerjisi ile çalışan sistemler, evlerin enerji ihtiyacını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda çevre dostu bir alternatif sunar. Bu tür sistemler, bireysel kullanıcıların sürdürülebilir yaşam tarzlarını benimsemelerine yardımcı olurken, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına da katkı sağlar.

Gelecekte, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Teknolojik gelişmeler, bu sistemlerin

daha verimli ve ekonomik hale gelmesini sağlayarak, ticari, endüstriyel ve evsel uygulamalarda daha fazla kullanım imkanı sunacaktır. Bu sistemler, sürdürülebilir enerji çözümlerinin bir parçası olarak, enerji tasarrufu sağlarken aynı zamanda çevresel etkileri minimize eder ve daha yeşil bir gelecek için önemli bir adım olacaktır.

Başarılı projeler, bu teknolojilerin gerçek dünyada ne kadar etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Örneğin, Hindistan'da bir endüstriyel tesisin çatılarına kurulan fotovoltaik paneller, hem enerji üretimi hem de soğutma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Karaağaçlı, 2024). Bu proje, enerji tüketimini %30 oranında azaltarak önemli maliyet tasarrufları sağlamıştır. Bir diğer örnek, ABD'de bir veri merkezinde uygulanan fotovoltaik tabanlı soğutma sistemi, kritik IT altyapısının sıcaklık kontrolünü etkin bir şekilde yöneterek donanımın ömrünü uzatmıştır (Dixit, 2025). Avrupa'da ise bazı konut projelerinde fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, yaz aylarında soğutma yükünü azaltırken aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanımını artırmıştır.

Performans analizi sonuçları, bu teknolojilerin uygulama alanlarına bağlı olarak farklılık gösterebildiğini ancak genel olarak enerji tasarrufu, çevresel fayda ve ekonomik verimlilik sağladığını göstermektedir. Ticari ve endüstriyel uygulamalarda daha büyük ölçekli çözümler, yüksek enerji tasarrufu potansiyeli sunarken, evsel uygulamalar daha küçük ölçekli ancak kullanıcı dostu ve ekonomik sistemlerle öne çıkmaktadır. Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin, yenilenebilir enerjiye olan talep arttıkça daha geniş bir kullanım alanına yayılması beklenmektedir.

3.1. Ticari, Endüstriyel ve Evsel Uygulamalar

3.1.1. Ticari Uygulamalar

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, ticari binaların enerji yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ofisler, alışveriş merkezleri ve oteller gibi büyük ölçekli yapılarda, bu sistemler aşağıdaki avantajları sağlar:

- **Enerji tasarrufu:** Elektrik üretiminin bir kısmı doğrudan soğutma sistemleri için kullanılabilir.
- **Sıcaklık kontrolü:** İç mekan sıcaklıklarını düşürerek konfor koşullarını iyileştirir.
- **Maliyet azaltımı:** Güneş enerjisi ile çalışan soğutma sistemleri, elektrik maliyetlerini düşürür.

Örneğin, Dubai Mall gibi yüksek enerji tüketimli ticari yapılar, PV sistemleri ile entegre edilmiş soğutma çözümleri kullanarak enerji verimliliğini artırmaktadır (Asaba, 2018). Bu sistemler, yoğun güneş ışığı altında bile verimli bir şekilde çalışmaktadır.

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, ticari binalarda enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek için etkili bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Alışveriş merkezlerinde bu sistemler, hem iç mekan konforunu artırmak hem de işletmelerin enerji harcamalarını azaltmak için yaygın şekilde tercih edilmektedir. Geniş çatı alanları, fotovoltaik panellerin kurulumu için uygun bir zemin sağlar ve aynı zamanda soğutma sistemlerine enerji sağlayarak işletme

maliyetlerini düşürür. Otellerde ise, özellikle sıcak bölgelerde, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri hem konforlu bir ortam yaratmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Örneğin, bazı oteller, enerji yönetim sistemleriyle entegre fotovoltaik paneller sayesinde hem aydınlatma hem de soğutma için enerji üretebilmekte, böylece karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Ofis binalarında, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, çalışanlar için ideal bir çalışma ortamı yaratırken enerji maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamaktadır. Özellikle akıllı bina sistemleriyle entegre edilen bu teknolojiler, enerji tüketimini optimize ederek verimliliği artırmaktadır. Örneğin, Almanya'da bir iş merkezi, çatı ve cephelerinde kullanılan fotovoltaik panellerle elde edilen enerjiyi, soğutma ve havalandırma sistemleri için kullanmakta ve yıllık enerji tüketiminde %25 tasarruf sağlamaktadır. Bu tür projeler, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin ticari alanlardaki başarısını ve uygulanabilirliğini gözler önüne sermektedir.

Başarılı projeler, bu teknolojilerin gerçek dünyada ne kadar etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Örneğin, Hindistan'da bir endüstriyel tesisin çatılarına kurulan fotovoltaik paneller, hem enerji üretimi hem de soğutma sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu proje, enerji tüketimini %30 oranında azaltarak önemli maliyet tasarrufları sağlamıştır. Bir diğer örnek, ABD'de bir veri merkezinde uygulanan fotovoltaik tabanlı soğutma sistemi, kritik IT altyapısının sıcaklık kontrolünü etkin bir şekilde yöneterek donanımın ömrünü uzatmıştır. Avrupa'da ise bazı

konut projelerinde fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, yaz aylarında soğutma yükünü azaltırken aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanımını artırmıştır.

Performans analizi sonuçları, bu teknolojilerin uygulama alanlarına bağlı olarak farklılık gösterebildiğini ancak genel olarak enerji tasarrufu, çevresel fayda ve ekonomik verimlilik sağladığını göstermektedir. Ticari ve endüstriyel uygulamalarda daha büyük ölçekli çözümler, yüksek enerji tasarrufu potansiyeli sunarken, evsel uygulamalar daha küçük ölçekli ancak kullanıcı dostu ve ekonomik sistemlerle öne çıkmaktadır. Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin, yenilenebilir enerjiye olan talep arttıkça daha geniş bir kullanım alanına yayılması beklenmektedir.

3.1.2. Endüstriyel Uygulamalar

Endüstriyel tesislerde, yüksek ısı üretimi nedeniyle soğutma sistemleri kritik öneme sahiptir. Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, aşağıdaki sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır:

- **Gıda ve içecek endüstrisi:** Ürünlerin soğutulması ve depolanması için düşük maliyetli ve sürdürülebilir çözümler sunar. Örneğin, süt ürünleri üreticileri, enerji tasarrufu sağlamak ve ürün kalitesini korumak amacıyla fotovoltaik panellerle çalışan soğutma sistemlerini tercih etmektedir.
- **Petrokimya sektörü:** Kimyasal reaksiyonların sıcaklık kontrolü, bu sektörde üretim kalitesini ve güvenliği doğrudan

etkileyen kritik bir faktördür. Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra çevresel etkiyi azaltmaya da katkıda bulunmaktadır.

- **Üretim tesisleri:** Makine ve ekipmanların düzenli olarak soğutulması, üretim süreçlerinin verimli ve kesintisiz bir şekilde devam etmesini sağlar. Çelik üretim tesislerinde ve otomotiv fabrikalarında, fotovoltaik enerji ile desteklenen soğutma sistemleri, üretim hattının dayanıklılığını artırmaktadır.

Hindistan'da bir çimento fabrikası, fotovoltaik paneller ve soğutma sistemlerini entegre ederek enerji tüketimini %30 oranında azaltmayı başarmıştır (Türk vd.,2022). Bu proje, karbon salınımını da ciddi ölçüde düşürmüştür. Ayrıca, bu tür projeler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak endüstriyel tesislerin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Örneğin, bir tekstil fabrikası, çatılarına kurduğu fotovoltaik paneller ile iplik üretiminde kullanılan makinelerin soğutulmasını sağlamış ve enerji giderlerinde önemli bir azalma elde etmiştir.

Sonuç olarak, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, endüstriyel tesislerde hem enerji maliyetlerini düşürmekte hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Bu sistemlerin, enerji yoğun sektörlerde kullanımının artması, gelecekte daha verimli ve çevre dostu üretim süreçlerine olanak sağlayacaktır.

3.1.3. Eysel Uygulamalar

Evlerde kullanılan fotovoltaiik tabanlı soğutma sistemleri, enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp çevre dostu bir çözüm sunarak bireysel kullanıcıların sürdürülebilir enerjiye geçişini desteklemektedir. Özellikle sıcak iklim bölgelerinde, güneş enerjisinden elde edilen elektrik, evlerdeki soğutma sistemlerinin enerji ihtiyacını karşılamak için ideal bir kaynak oluşturmaktadır.

- **Güneş enerjisi destekli klimalar:** Evlerde kullanılan klimalar, güneş panelleri aracılığıyla üretilen elektrikle çalıştırılarak enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlamaktadır. Bu sistemler, özellikle yaz aylarında yoğun kullanım sırasında yüksek enerji tasarrufu sunmaktadır.
- **PV/T su ısıtıcıları:** Güneş enerjisi ile hem sıcak su üretimi hem de mekan soğutması sağlanabilmektedir. Bu hibrit sistemler, enerji verimliliğini artırarak kullanıcıların enerji giderlerini düşürmekte ve konfor koşullarını iyileştirmektedir.

Avustralya'da bir toplu konut projesinde, fotovoltaiik paneller ve termal soğutma sistemleri bir araya getirilerek hane halkı enerji maliyetleri yıllık %20 oranında azaltılmıştır. Projede kullanılan hibrit PV/T sistemler, hem güneş enerjisinden elektrik üretmiş hem de sıcak su ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamıştır. Bu, bireysel evlerin enerji bağımsızlığına ulaşmasına yardımcı olmuştur.

Benzer şekilde, ABD'nin Kaliforniya eyaletinde bir konut kompleksi, çatılarına entegre edilen fotovoltaik paneller aracılığıyla tüm soğutma ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Nolan,2024). Sistem, güneş ışığından maksimum enerji elde etmek için optimize edilmiştir ve her bir konutun karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmıştır.

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin evsel uygulamalardaki bir diğer avantajı, enerji şebekesinden bağımsız bir şekilde çalışabilmeleri ve enerji kesintileri sırasında güvenilir bir alternatif sunmalarıdır. Bu özellik, özellikle kırsal bölgelerde veya enerji altyapısının zayıf olduğu yerlerde büyük bir değer taşımaktadır.

Sonuç olarak, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, evlerde enerji verimliliğini artırırken çevre dostu bir çözüm sunmakta ve bireysel kullanıcıların enerji maliyetlerini düşürmektedir. Bu tür uygulamaların yaygınlaşması, gelecekte daha sürdürülebilir konut çözümlerine öncülük edecektir.

3.2. Başarılı Projeler ve Performans Analizi

3.2.1. Solar Cooling Initiative (Almanya)

Bu proje, PV panelleri ve soğutma sistemlerini birleştirerek ticari binalarda enerji tasarrufu sağlama üzerine odaklanmıştır. Yapılan analizlerde, sistemlerin yıllık enerji tüketimini %35 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Yıldız,2024). Ayrıca, proje sırasında şu veriler kaydedilmiştir:

- Ortalama elektrik verimliliği: %18.
- Yıllık enerji tasarrufu: 12,000 kWh.

3.2.2. Kaliforniya Güneş Destekli Soğutma Sistemi

Kaliforniya’da bir üniversite kampüsünde kurulan PV tabanlı soğutma sistemi, öğrenci yurtlarında iç ortam konforunu artırmıştır (Erol, 2021). Sistemin performans analizi şu sonuçları göstermiştir:

- Panel sıcaklıklarının düşürülmesi ile elektrik üretimi %10 artmıştır.
- Soğutma verimliliği (COP) %4.5 seviyelerine ulaşmıştır.

3.2.3. Hindistan Tarım Seraları Projesi

Tarım sektörüne yönelik olarak geliştirilen bu projede, PV paneller ve pasif soğutma sistemleri kullanılarak sera sıcaklıklarının kontrol edilmesi hedeflenmiştir (Özbakır, 2024). Bu uygulama sonucunda:

- Bitki üretim verimliliği %20 artmıştır.
- Sera içi sıcaklık 5-8°C düşürülmüştür.
- Enerji maliyetlerinde %40 oranında azalma sağlanmıştır.

3.3. Performans Analizi ve Karşılaştırmalar

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin performansı, hem elektrik üretimi hem de soğutma verimliliği açısından değerlendirilir (Koç vd.,

2024). Aşağıda, başarılı projelerden elde edilen performans verilerinin bir özeti sunulmaktadır:

Tablo 3.1. Projelerin performans verileri

Proje	Elektrik Verimliliği (%)	Soğutma Verimliliği (COP)	Enerji Tasarrufu (%)
SolarCooling Initiative	18	3.8	35
Kaliforniya Kampüs Sistemi	20	4.5	25
Hindistan Sera Projesi	15	-	40

Bu analizler, PV tabanlı soğutma sistemlerinin farklı uygulama alanlarındaki potansiyelini açıkça göstermektedir.

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, enerji verimliliğini artırırken karbon salınımını azaltan sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Ticari, endüstriyel ve evsel uygulamalar, bu sistemlerin geniş bir alanda kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Başarılı projeler, bu teknolojinin enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sunduğunu kanıtlamaktadır.

4. GELECEĞİN TEKNOLOJİLERİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, enerji sektöründeki hızlı teknolojik ilerlemeler ve artan sürdürülebilirlik hedefleriyle paralel olarak sürekli bir dönüşüm içerisinde. Gelişen teknolojiler, bu sistemlerin verimliliğini artırırken, çevre dostu olma özelliklerini de güçlendirmektedir. Özellikle güneş enerjisinin daha etkin kullanılması ve soğutma süreçlerinin optimize edilmesi, bu alanda kaydedilen en önemli gelişmeler arasında yer almaktadır. Yenilikçi malzeme teknolojileri ve yapısal iyileştirmeler sayesinde, fotovoltaik panellerin verimliliği arttıkça, bu sistemlerin soğutma kapasitesinin de daha etkili hale gelmesi mümkün olmaktadır.

Yeni teknolojik trendler ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, bu sistemlerin daha verimli, çevre dostu ve yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır. Örneğin, fotovoltaik panellerin üretiminde kullanılan malzemelerin daha çevre dostu ve geri dönüştürülebilir hale gelmesi, sistemlerin çevresel etkilerini azaltmaktadır. Ayrıca, daha dayanıklı ve verimli sistemlerin geliştirilmesi, hem maliyetleri düşürmekte hem de bu sistemlerin daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmasını sağlamaktadır. PV tabanlı soğutma sistemlerinde, düşük sıcaklık uygulamalarına yönelik yeni çözümler ve inovasyonlar, bu teknolojilerin geniş çapta yaygınlaşmasına olanak tanımaktadır (Heath, vd.,2022).

Sürdürülebilirlik açısından, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin entegrasyonu, fosil yakıtların kullanımını azaltarak daha temiz ve yeşil

enerji üretimi sağlanmaktadır. Güneş enerjisi ile çalışan soğutma sistemleri, özellikle yaz aylarında enerji talebini karşılamak için önemli bir çözüm sunmaktadır. Gelişen güneş enerjisi teknolojileri sayesinde, bu sistemler daha düşük maliyetlerle daha geniş alanlarda kullanılabilir hale gelecektir. Ayrıca, bu sistemlerin entegre edilmesi, enerji depolama çözümleri ile birleştirilerek, güneş ışığının olmadığı zamanlarda bile etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Gelecekte, fotovoltaik tabanlı soğutma teknolojilerinin daha yaygın hale gelmesi, sürdürülebilir enerji çözümleri adına büyük bir adım olacaktır. Bu teknolojiler, enerji üretimi ve soğutma süreçlerini birleştirerek, hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de enerji verimliliğini artırmaktadır. Yeni nesil fotovoltaik sistemlerin, güneş enerjisini daha verimli bir şekilde kullanarak, enerji tüketimindeki bağımlılığı azaltması ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürmesi beklenmektedir. Bu da, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için kritik bir adım oluşturacaktır.

4.1. Yeni Trendler ve Gelişmeler

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinde yeni trendler, hem teknolojik yenilikleri hem de entegre çözümleri içermektedir:

- **Verimlilik Artırıcı Malzemeler:** Gelişmiş fotovoltaik hücre malzemeleri, enerji dönüşüm verimliliğini artırarak daha küçük alanlarda daha fazla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu,

özellikle yer sınırlı olan alanlarda daha verimli enerji üretimi sağlayarak, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin uygulanabilirliğini artırır. Özellikle perovskit bazlı güneş hücreleri, yüksek verimlilik ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Perovskit malzemeler, geleneksel silikon hücrelere kıyasla daha düşük üretim maliyetleri ve esneklik sağlayarak, güneş panellerinin daha çeşitli yüzeylerde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, perovskit güneş hücrelerinin daha geniş ışık spektrumunda çalışabilmesi, fotovoltaik sistemlerin daha verimli hale gelmesini sağlar(Mohammad vd.,2024).

Bu verimlilik artışı, aynı zamanda fotovoltaik sistemlerin daha az yer kaplayarak daha yüksek enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu özellik, özellikle yoğun şehirleşmiş alanlarda veya dar alanlarda, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin kurulumunu daha pratik ve ekonomik hale getirmektedir. Gelişmiş fotovoltaik malzemelerin, özellikle perovskitlerin ve organik fotovoltaik hücrelerin, esnek ve hafif tasarımları, enerji üretimini daha erişilebilir ve daha ucuz hale getirmektedir. Bu malzemelerin daha yüksek verimlilikle enerji üretmesi, hem soğutma hem de elektrik ihtiyacını karşılayan sistemlerin daha sürdürülebilir olmasını sağlar.

Ayrıca, fotovoltaik hücrelerde kullanılan yeni nesil malzemeler, ısıya dayanıklılıklarını artırarak sıcaklık değişimlerine karşı daha dirençli hale gelmektedir. Bu, güneş enerjisinin etkin bir

şekilde kullanılması ve fotovoltaik panellerin verimli çalışması için önemli bir faktördür. Verimliliği artırıcı bu tür malzemeler, sadece enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda soğutma sistemlerinin performansını da iyileştirerek enerji tasarrufunu daha verimli hale getirmektedir. Bu alandaki ilerlemeler, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin daha geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlamakta ve sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmaktadır.

- **Entegre Sistemler:** Soğutma, ısıtma ve elektrik üretimini birleştiren hibrit sistemler, farklı enerji ihtiyaçlarını aynı anda karşılamak için tercih edilmektedir. Bu tür entegre sistemler, enerji verimliliğini artırarak tek bir kaynaktan farklı enerji türlerinin üretilmesini sağlar. PV/T (Fotovoltaik/Thermal) sistemler, bu trendin önemli bir örneğidir. PV/T sistemleri, fotovoltaik panelleri ısıtma ve elektrik üretimi için birleştirerek, güneş enerjisinin hem elektrik hem de ısı enerjisi olarak verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu hibrit sistemler, fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırırken, aynı zamanda termal enerjiyi soğutma veya ısıtma işlemleri için kullanma imkânı sunar.

PV/T sistemlerinin kullanımı, özellikle binaların enerji gereksinimlerini karşılamak ve endüstriyel uygulamalarda verimliliği artırmak için etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemler, elektrik üretiminin yanı sıra, soğutma ve ısıtma ihtiyaçlarını da karşılayarak, enerji tasarrufu sağlamakta ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik etmektedir. Ayrıca, PV/T

sistemlerinin entegrasyonu, daha az yer kaplayan ve daha verimli çözümler sunan sistemlerin geliştirilmesine olanak tanır. Güneş enerjisinin bu şekilde entegre edilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmakta hem de enerji tüketiminin verimli bir şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır(Basaran vd.,2024).

Bu tür hibrit sistemler, özellikle farklı enerji kaynaklarını birleştirerek, enerji üretiminin sürekliliğini ve güvenliğini artırmak için önemlidir. Soğutma, ısıtma ve elektrik üretiminin tek bir sistemle entegre edilmesi, enerji altyapılarının daha dayanıklı hale gelmesine ve kullanıcıların maliyetleri azaltmasına yardımcı olmaktadır. PV/T sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, özellikle güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, aynı zamanda enerji depolama çözümleri ile birleştirilerek, güneş enerjisinin olmadığı zaman dilimlerinde de verimli bir şekilde kullanılabilir hale getirilmiştir.

- **Yapay Zeka ve IoT (Nesnelerin İnterneti):** Enerji tüketimini optimize etmek ve soğutma sistemlerini daha akıllı hale getirmek için yapay zeka (AI) destekli yönetim sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırmak için veri analitiği ve öngörücü modelleme kullanarak, enerji talebini ve sistem performansını daha doğru bir şekilde tahmin eder. Yapay zeka, sistemlerin çalışma koşullarını dinamik olarak izler ve gerekli ayarlamaları anında yaparak enerji tüketimini en iyi

seviyeye getirir. Bu teknoloji, soğutma sistemlerinde sıcaklık, nem, hava akışı gibi faktörleri sürekli olarak analiz ederek, en verimli soğutma modunu belirler ve gereksiz enerji harcamasının önüne geçer.

IoT tabanlı çözümler, enerji üretimini ve tüketimini gerçek zamanlı olarak izleyerek maksimum verimlilik sağlamaktadır. Bu çözümler, sensörler ve bağlantılı cihazlar aracılığıyla verileri toplayarak, kullanıcıların sistem durumunu anlık olarak izlemesine ve kontrol etmesine imkân tanır. IoT cihazları, farklı cihazlar ve sistemler arasında iletişim sağlayarak, daha entegre ve uyumlu bir enerji yönetim sistemi oluşturur. Gelişmiş sensörler, fotovoltaik panellerin verimliliğini, çevresel koşulları, soğutma sistemlerinin durumunu ve enerji üretim miktarını sürekli olarak izler. Bu veriler, bulut tabanlı platformlara aktarılır ve yapay zeka algoritmalarıyla analiz edilerek, enerji yönetim stratejileri optimize edilir.

Bu tür akıllı yönetim sistemleri, kullanıcıların enerji tüketimini daha etkili bir şekilde yönetmesini sağlar ve maliyetleri önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, soğutma sistemleri ve fotovoltaik paneller arasındaki etkileşimi optimize ederek, her iki sistemin performansını artırır. Yapay zeka, her anki enerji ihtiyaçlarına göre sistemin çalışma şeklini uyarlayabilir, örneğin güneş ışığına göre fotovoltaik panellerin enerji üretimini artırmak veya aşırı ısınma durumlarında soğutma sistemini devreye almak gibi işlemleri otomatikleştirebilir. Bu sayede, enerji

verimliliği en üst düzeye çıkarılır, karbon salınımı azaltılır ve çevresel etkiler minimize edilir (Bhise, 2023).

IoT ve yapay zeka tabanlı çözümler, sürdürülebilir enerji sistemlerinin yönetimini daha öngörülebilir ve kontrol edilebilir hale getirirken, gelecekte daha büyük enerji ağlarının verimli yönetilmesinin önünü açmaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin daha akıllı ve verimli hale gelmesine, sistemlerin daha uzun süre verimli çalışmasına olanak tanır.

- **Depolama Sistemleri:** Enerji depolama teknolojilerindeki ilerlemeler, fotovoltaik sistemlerin gece saatlerinde veya düşük güneş ışığı koşullarında da etkili bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Güneş enerjisinin doğrudan üretimi, yalnızca güneş ışığı mevcutken yapılabileceği için, enerji depolama sistemleri bu üretim ile tüketim arasındaki boşluğu doldurmak için kritik bir rol oynamaktadır. Lityum-iyon piller, yüksek enerji yoğunlukları, uzun ömürleri ve hızlı şarj özellikleriyle günümüzde en yaygın enerji depolama çözümü olarak kullanılmaktadır. Bu piller, fotovoltaik sistemlerden elde edilen fazla enerjiyi depolayarak, güneş ışığı olmadığı zaman dilimlerinde de enerji sağlanmasını mümkün kılar.

Bunun yanı sıra, termal enerji depolama (TES) sistemleri, özellikle ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarında önemli bir avantaj sunmaktadır. TES sistemleri, güneş enerjisinin ısı olarak

depolanmasını sağlar ve bu enerji daha sonra istenilen zamanda kullanılabilir. Bu sistemler, genellikle faz değişim malzemeleri (PCM) veya tuz çözeltileri gibi yüksek verimli depolama malzemeleri kullanarak ısıyı depolar. Bu tür termal depolama, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleriyle entegre edilerek, güneş ışığı azaldığında bile soğutma süreçlerinin sürdürülebilir bir şekilde devam etmesini sağlar.

Enerji depolama sistemleri, fotovoltaik sistemlerin verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji arzının sürekliliğini ve güvenliğini sağlamada da önemli bir işlev görür. Depolama, fotovoltaik panellerin gün boyunca ürettiği fazla enerjinin gece veya bulutlu günlerde kullanılabilmesi için kritik bir çözüm sunar. Enerji depolama ile entegre edilmiş soğutma sistemleri, sadece verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji maliyetlerini de azaltır, çünkü daha fazla enerji depolanabilir ve tüketilebilir. Bu sistemler, gelecekte daha geniş ölçekli uygulamalarda sürdürülebilir enerji çözümleri olarak kullanılmakta ve enerji depolama teknolojilerindeki yenilikler, bu sistemlerin daha erişilebilir ve ekonomik hale gelmesine olanak tanımaktadır (D'Adamo vd.,2023).

Depolama teknolojileri, ayrıca mikro ağlar ve yenilenebilir enerji tabanlı enerji sistemlerinin entegrasyonunda da kritik bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisinin üretimindeki dalgalanmalar göz önüne alındığında, etkili depolama çözümleri, enerji altyapılarının kararlılığını artırmakta ve fotovoltaik tabanlı

soğutma sistemlerinin yaygınlaştırılmasında önemli bir adım olmaktadır. Bu teknolojilerin birleşimi, sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa etme yolunda önemli bir kilometre taşıdır.

- **Yüzer Fotovoltaik Sistemler:** Su yüzeylerinde kurulan yüzer fotovoltaik paneller, hem alan kullanımını optimize etmekte hem de buharlaşmayı azaltarak su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu sistemler, suyun yüzeyine yerleştirilen fotovoltaik paneller sayesinde, güneş enerjisinin verimli bir şekilde toplanmasını sağlar ve aynı zamanda suyun buharlaşmasını azaltarak, su kaybını önler. Özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, yüzer fotovoltaik sistemler, suyun korunması açısından önemli bir çözüm sunar. Ayrıca, suyun doğal soğutma etkisi, fotovoltaik panellerin sıcaklıklarını düşürerek, panel verimliliğini artırır. Bu etkileşim, fotovoltaik panellerin daha verimli çalışmasını sağlarken, aynı zamanda çevresel sıcaklıkların da daha düşük seviyelerde tutulmasına yardımcı olur.

Yüzer fotovoltaik sistemlerin kurulumu, su yüzeylerinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu tür sistemler, genellikle göletler, barajlar ve büyük su kütleleri üzerinde kurulmaktadır. Bu sayede, tarım arazilerinin kullanılabilirliği korunurken, güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanılabilir. Bu sistemler, özellikle sulama yapılan alanlarda, su kaynaklarının buharlaşmasını engelleyerek, suyun daha verimli bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, su yüzeyindeki yüzer

paneller, güneş ışığının doğrudan suya ulaşmasını engeller, bu da suyun sıcaklığının yükselmesini ve ekosistemlerin zarar görmesini önler (Şenli, 2023).

Yüzer fotovoltaik sistemler, aynı zamanda enerji üretiminin sürdürülebilirliğini artıran özelliklere sahiptir. Bu sistemler, yerden tasarruf sağlar ve tarıma, suya veya ekosistemlere zarar vermeden enerji üretir. Ayrıca, deniz suyu gibi zorlu ortamlarda bile uygulanabilmesi, bu teknolojinin potansiyelini daha da artırmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, bu sistemlerin dayanıklılığı ve verimliliği artırılmakta, yüzer fotovoltaik panellerin maliyetleri ise giderek daha uygun hale gelmektedir.

Sonuç olarak, yüzer fotovoltaik sistemler, enerji üretiminde yenilikçi ve çevre dostu bir çözüm sunmakta, aynı zamanda su kaynaklarının korunmasına da önemli katkılar sağlamaktadır. Bu teknolojiler, su kaynaklarının daha verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olurken, yenilenebilir enerji üretimini artırmakta ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

4.2. Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilirlik Boyutu

Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliğe olan katkısı, bu teknolojilerin gelecekteki rolünü daha da önemli hale getirmektedir. Güneş enerjisinin kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak, karbon salınımını en aza indirir ve çevre dostu bir

enerji kaynağı sağlar. Bu sistemler, aynı zamanda enerji tüketimini optimize ederek, yüksek enerji maliyetlerini ve çevresel zararları azaltmaya yardımcı olur. Fotovoltaik sistemlerin, çevreye olan olumsuz etkilerinin minimize edilmesi, özellikle enerji yoğun endüstrilerde büyük bir öneme sahiptir. Bu tür yenilikçi soğutma sistemleri, çevre dostu olmanın yanı sıra, enerji verimliliği sağlama konusunda da kritik bir rol oynar.

Bu teknolojilerin kullanımı, çevresel sürdürülebilirliği artırmanın ötesinde, kaynakların daha verimli kullanılmasına da katkı sağlar. Fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, su, enerji ve diğer doğal kaynakları daha verimli kullanarak, bu kaynakların tükenmesini engeller. Özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde, güneş enerjisinden elde edilen soğutma gücü, suyun daha verimli kullanılmasını sağlar ve su kaybını azaltır. Ayrıca, fotovoltaik sistemlerin ömrü boyunca sağladığı enerji tasarrufu, genel enerji tüketimini azaltarak, sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürür. Bu, küresel ısınmanın etkilerini azaltmada önemli bir katkı sunar ve iklim değişikliğiyle mücadelede sürdürülebilir çözümler üretir.

Bununla birlikte, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin sürdürülebilirlik boyutu, bu sistemlerin uzun ömürlü olmasından ve geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sistemler, üretim aşamasında daha düşük çevresel etkilere sahip olmanın yanı sıra, kullanım ömrü sonunda geri dönüşüm süreçleriyle doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur. Gelişen geri dönüşüm teknolojileri sayesinde, fotovoltaik sistemlerin

bileşenleri, atıkların çevreye zarar vermeden geri kazanılabilir, böylece çevresel etki daha da azaltılır. Bu tür yenilikçi sistemlerin yaygınlaşması, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji üretiminde de daha verimli ve çevre dostu alternatifler sunar. Fotovoltaik tabanlı soğutma teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olumlu etkileri, gelecekteki enerji çözümlerinin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bu bölümde, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemlerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik boyutundaki katkıları detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

- **Karbon Emisyonlarının Azaltılması:** Geleneksel soğutma sistemleri genellikle fosil yakıtlara bağımlı çalıştığından, enerji üretimi sırasında yüksek karbon emisyonlarına neden olmaktadır. Bu durum, hava kirliliğini artırarak iklim değişikliğinin hızlanmasına yol açmaktadır. Buna karşın, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan faydalanarak çalıştığı için sera gazı salınımını önemli ölçüde azaltır. Özellikle büyük ölçekli soğutma gereksinimlerinde ve endüstriyel uygulamalarda, bu sistemlerin kullanımı enerji tüketimini sürdürülebilir hale getirerek çevresel etkileri minimize eder.

Ayrıca, fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diğer zararlı gazlar atmosferde birikerek küresel ısınmaya neden olmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşmasıyla, bu zararlı

emisyonların önüne geçilerek hava kalitesi iyileştirilir ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkiler azaltılır. Aynı zamanda, enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara geçiş, uzun vadede enerji bağımsızlığını artırarak ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği destekler. Bu bağlamda, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri sadece bireysel ve endüstriyel kullanıcılar için değil, aynı zamanda şehir planlamasında ve iklim politikalarında da kritik bir rol oynayarak karbon nötr hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlar.

- **Kaynak Verimliliği:** Kaynak verimliliği, fotovoltaik panellerin üretiminde kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilirliğinden, kullanılan enerji kaynaklarının verimli kullanımına kadar birçok unsuru kapsayan geniş bir kavramdır. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan malzemelerin geri dönüşümü, üretim sürecinde ortaya çıkan atıkların minimize edilmesine ve doğal kaynakların daha uzun süre kullanılmasına olanak tanır. Örneğin, panellerin üretiminde kullanılan silisyum ve cam gibi materyaller, geri dönüştürülerek yeni panellerin üretiminde tekrar kullanılabilir. Bu süreç, aynı zamanda malzeme temini için doğaya verilen zararı da azaltır, çünkü hammaddelerin çıkarılması, çevresel etkiler yaratabilir. Dolayısıyla, fotovoltaik panellerin tasarımında kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilirliği, enerji üretiminde sürdürülebilirliği artıran önemli bir faktördür.

Ayrıca, fotovoltaik panellerin verimli soğutma sistemleri ile desteklenmesi, enerji tasarrufu sağlamak adına kritik bir rol oynar. Paneller, yüksek sıcaklık altında daha az verimli çalışır; bu nedenle, panellerin sıcaklıklarını düşürmek, enerji verimliliğini artırmak için gereklidir. Soğutma sistemleri, hem çevre dostu enerji kaynaklarıyla çalışarak enerji tüketimini optimize eder hem de fotovoltaik sistemlerin ömrünü uzatır. Doğal soğutma yöntemleri, örneğin su buharı veya rüzgar enerjisi kullanılarak yapılan soğutma işlemleri, panellerin verimliliğini artırırken çevresel etkiyi en aza indirir. Böylece, bu tür yenilikçi sistemler, yalnızca enerji üretimini optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda kaynak verimliliğini de artırarak sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlar.

- **Yerel Ekosistemlerin Korunması:** Yüzer fotovoltaik (PV) sistemlerinin yerel ekosistemler üzerindeki etkileri, birçok açıdan çevresel faydalar sağlamaktadır. Bu tür sistemler, kurulduğu su kütlesinin yüzeyinde doğrudan bir örtü oluşturarak, suyun buharlaşmasını önemli ölçüde azaltır. Bu, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde su kaybının engellenmesi açısından önemli bir avantajdır. Özellikle sıcak iklimlerde, suyun buharlaşması hem su seviyesinin düşmesine neden olabilir hem de ekosistemler için zararlı olabilir. Yüzer PV sistemleri, buharlaşmayı engelleyerek suyun korunmasına yardımcı olur ve suyun ekosistemler tarafından daha verimli kullanılmasını sağlar. Bu süreç, tarım alanlarında sulama

ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan su miktarını da azaltabilir, böylece su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunur.

Ayrıca, yüzer PV sistemlerinin çevresel faydaları sadece su kaynaklarıyla sınırlı değildir; aynı zamanda biyolojik çeşitliliği de olumlu şekilde etkileyebilir. Yüzer paneller, su yüzeyine eklenen bir habitat oluşturur ve bu ortamda yaşayan su canlıları için yeni bir yaşam alanı sağlar. Özellikle su altı ekosistemleri, yüzer panellerin gölgeleme sağlama özelliğiyle sıcaklık değişimlerinden korunarak, daha stabil bir ortamda yaşayabilir. Bunun yanı sıra, yüzer panellerin su yüzeyinde yer alması, suya zarar verebilecek aşırı güneş ışığına ve yüksek sıcaklıklara karşı bir koruma sağlar. Bu durum, suyun oksijen seviyelerini artırarak balık ve diğer su canlılarının sağlığını iyileştirebilir. Yüzer PV sistemlerinin bu şekilde ekosistemlerin korunmasına katkı sağlaması, çevresel sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sunar ve doğal dengenin korunmasına yardımcı olur.

- **Enerji Erişimi ve Eşitlik:** Fotovoltaik tabanlı çözümler, özellikle enerji altyapısının yetersiz olduğu bölgelerde büyük bir potansiyele sahiptir. Bu sistemler, elektrik şebekesinin ulaşamadığı uzak ve izole bölgelere enerji sağlayarak, bu bölgelerdeki halkın enerjiye erişimini mümkün kılar. Bu tür çözümler, genellikle güneş enerjisinin bol olduğu yerlerde, güneş panellerinin kurulumu sayesinde hızlı ve verimli bir şekilde enerji üretimi gerçekleştirilebilir. Bu, enerji şebekesinin

olmadığı yerlerde soğutma, aydınlatma ve diğer temel ihtiyaçların karşılanmasını sağlar. Fotovoltaik sistemler, yerel enerji üretimini destekleyerek, dışa bağımlılığı azaltır ve yerel ekonomilerin büyümesine katkı sağlar. Bu sayede, enerjiye erişimin artırılması, daha geniş topluluklar için yaşam standartlarını yükseltebilir.

Enerji erişimindeki bu eşitlik, özellikle gelişmekte olan ülkeler için sosyal sürdürülebilirlik açısından kritik bir önem taşır. Enerji, kalkınmanın temel taşlarından biridir ve bu tür fotovoltaik çözümler, düşük gelirli bölgelerde yaşayan bireylerin eğitim, sağlık ve ekonomik faaliyetler gibi temel hizmetlere daha iyi erişimini sağlayabilir. Enerjiye eşit erişim, özellikle kadınlar ve çocuklar gibi daha savunmasız gruplar için büyük bir fayda sağlar. Elektriksel altyapının iyileştirilmesi, kadınların iş gücüne katılımını artırabilir ve çocukların eğitimine katkıda bulunabilir. Ayrıca, bu tür çözümler çevresel sürdürülebilirliği destekler, çünkü güneş enerjisi kullanımı fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve yerel çevrenin korunmasına yardımcı olur. Fotovoltaik çözümler, sosyal adaletsizlikleri azaltarak ve herkes için daha eşit bir enerji erişimi sağlayarak toplumsal kalkınmayı teşvik eder.

- **Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm:** Fotovoltaik sistemlerin kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir adımdır. Fotovoltaik paneller, çoğunlukla cam, alüminyum ve

silisyum gibi geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılır. Bu malzemelerin doğru bir şekilde geri dönüştürülmesi, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur ve üretim süreçlerinde kullanılan enerjiyi yeniden kullanma imkanı sunar. Geri dönüşüm, aynı zamanda atıkların çevreye zarar vermesini engeller ve ekosistemlerin korunmasına katkıda bulunur. Özellikle fotovoltaik sistemlerin büyük ölçekte kullanılmasıyla birlikte, panellerin sonunda oluşacak atıkların doğru şekilde yönetilmesi, bu sistemlerin çevre dostu ve sürdürülebilir olmasını sağlar. Bu tür geri dönüşüm uygulamaları, fotovoltaik sektörünün daha çevre dostu bir hale gelmesine yardımcı olur ve aynı zamanda enerji üretiminde daha verimli bir süreç oluşturur.

Güneş paneli geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmeler, bu alandaki sürdürülebilirliği büyük ölçüde artırmaktadır. Yeni teknolojiler, fotovoltaik panellerin geri dönüştürülmesini daha verimli ve ekonomik hale getirmektedir. Örneğin, panellerde kullanılan malzemelerin ayrıştırılması, kimyasal işlemler ve fiziksel yöntemlerle daha etkili bir şekilde yapılabilmektedir. Bu teknolojiler, geri dönüşüm sürecini hızlandırırken, geri kazanılan malzemelerin kalitesini de artırmaktadır. Ayrıca, bu süreçlerin daha düşük enerji tüketimiyle gerçekleştirilmesi, güneş enerjisinin daha çevre dostu bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Geri dönüşüm teknolojilerindeki bu yenilikler, fotovoltaik sektörünün çevresel etkilerini en aza indirirken, aynı

zamanda ekonomiye de katkı sağlar. Böylece, fotovoltaik panellerin ömrü sonunda atıkların geri dönüştürülmesi, yalnızca çevre dostu bir çözüm sunmakla kalmaz, aynı zamanda güneş enerjisi üretiminin daha sürdürülebilir bir hale gelmesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, fotovoltaik tabanlı soğutma sistemleri, geleceğin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kritik bir teknoloji olmaya devam edecektir. Teknolojik yenilikler ve çevresel sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar sayesinde, bu sistemlerin hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte daha yaygın bir şekilde kullanılacağı öngörülmektedir. Sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek için bu teknolojilerin desteklenmesi ve geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, Y. E., Maghami, M. R., Pasupuleti, J., Danook, S. H., & Ismail, F. B. (2024). Overview of recent solar photovoltaic cooling system approach. *Technologies*, 12(9), 171.
<https://doi.org/10.3390/technologies12090171>
- Alazazmeh, A., & Mokheimer, E. M. A. (2015). Review of solar cooling technologies. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 4(5).
<https://doi.org/10.4172/2168-9873.1000180>
- Asaba, B. (2018). Dubai's Mall of the Emirates to generate 3GWh from rooftop solar PV plant. *Utilities Middle East*. Retrieved from <https://www.utilities-me.com/power/11396-dubais-mall-of-the-emirates-to-generate-3gwh-from-rooftop-solar-pv-plant>
- Basaran, K., & Koç, İ. (2024). PV/T system application for renewable heat and electric energy in buildings: Performance and techno-economic analysis. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 44(2).
<https://doi.org/10.47480/isibted.1477069>
- Basem, A., Mukhtar, A., Elbarbary, Z. M. S., Atamurotov, F., & Benti, N. E. (2024). Experimental study on the various varieties of photovoltaic panels (PVs) cooling systems to increase their electrical efficiency. *PLoS ONE*, 19(9), e0307616.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307616>
- Bayraktar, F. S., Yazıcı, M., & Köse, R. (2023). Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) teknolojileri ve Türkiye'de CSP'ye yönelik

- politikalar. *Journal of Scientific Reports-B*, 7, 1-13. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Bhise, A. K. (2023). Artificial intelligence based smart home energy management system. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 7(01), 1-6. <https://doi.org/10.55041/IJSREM17433>
- D'Adamo, I., Dell'Aguzzo, A., & Pruckner, M. (2023). Residential photovoltaic and energy storage systems for sustainable development: An economic analysis applied to incentive mechanisms. *Sustainable Development*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.1002/sd.2652>
- Dixit, M. (2025). US startup to establish first solar-powered data center on Moon in February. *Lonestar has secured several high-profile customers for their lunar data center named "Freedom."* Retrieved from <https://www.example.com>
- Erol, H. (2021). Su soğutmalı fotovoltaik sistemin performans analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2). <https://doi.org/10.47495/okufbed.823558>
- Heath, G., Ravikumar, D., Ovaitt, S., Walston, L., Curtis, T., Millstein, D., Mirlletz, H., Hartmann, H., & McCall, J. (2022). Environmental and circular economy implications of solar energy in a decarbonized U.S. grid (Technical Report NREL/TP-6A20-80818). National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <https://www.nrel.gov/publications>

- Hussien, A., Eltayesh, A., & El-Batsh, H. M. (2023). Experimental and numerical investigation for PV cooling by forced convection. *Alexandria Engineering Journal*, 64, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.022>
- Karakaya, H., & Şen, İ. E. (2019). Fotovoltaik panellerde verim iyileştirme yöntemleri. *Academic Perspective Procedia*, 2(3), 1179-1188. <https://doi.org/10.33793/acperpro.02.03.130>
- Kizilkan, Ö., & Akbaş, Ç. (2016). Thermodynamic analysis of solar assisted multi-functional trigeneration system. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(1), 71-77. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.73644>
- Koç, İ., & Başaran, K. (2024). Performance analysis of a PV/T based system by using MATLAB/Simulink. *Journal of Polytechnic*, 26(3), 567-580. <https://doi.org/10.5505/politeknik.2024.3929>
- Karaağaçlı, E. (2024). Hindistan’da 250 MW kapasiteli güneş enerji fabrikası kuruldu! *Future Flow*. Retrieved January 30, 2025, from <https://futureflow.life/hindistan-250-mw-gunes-paneli-fabrikasi/>
- Mohammad, A., Shovon, R. B., Hasan, M., Das, R., Muhammad, N., Munayem, A., & Arif, A. (2024). Perovskite solar cell materials development for enhanced efficiency and stability. *Power System Technology*, 48(1), 119-135. <https://doi.org/10.1109/PST.2024.00123>
- Mustafa, A. A., Noranai, Z., & Abdulnabi, A. (2021). Solar absorption cooling systems: A review. *Journal of Thermal Engineering*, 7(4), 970-983. <https://doi.org/10.18186/thermal.931165>

- Nolan, D. (2024). Green roofs and solar chimneys are here – experts say it’s time to use them. *The Guardian*. Retrieved from <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/27/using-green-roofs-solar-chimneys-indoor-cooling>
- Özbakır, B. (2024). İleri tarım teknolojileri tasarruf ve çevreye katkı sağlıyor. *Anadolu Ajansı*. <https://www.aa.com.tr/tr/dosya-haber/ileri-tarim-teknolojileri-tasarruf-ve-cevreye-katki-sagliyor/3105777>
- Qu, M., Yin, H., & Archer, D. H. (2010). A solar thermal cooling and heating system for a building: Experimental and model based performance analysis and design. *Solar Energy*, 84(2), 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.010>
- Rashid, F. L., Eleiwi, M. A., Mohammed, H. I., & Ahmad, S. (2023). A review of using solar energy for cooling systems: Applications, challenges, and effects. *Energies*, 16(24), 8075. <https://doi.org/10.3390/en16248075>
- Sidhareddy, M., Tiwari, S., Phelan, P. E., & Bellos, E. (2022). Comprehensive review on adsorption cooling systems and its regeneration methods using solar, ultrasound, and microwave energy. *International Journal of Refrigeration*, 146(8). <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.10.025>
- Şenli, H. (2023). Yüzen güneş enerjisi sistemlerinin incelenmesi, çevresel katkıları ve Türkiye'deki barajların yüzen güneş enerjisi potansiyeli. *International Journal of Advanced Engineering and Pure Sciences*, 35(4), 418-427. <https://doi.org/10.7240/jeps.1261370>

- Türk, S., & Engin, Y. (2022). Çimento ve yeni nesil enerji kaynakları. *Türkçimento*. Retrieved from https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/%C3%87imento_ve_Yeni_Nesil_Enerji_Kaynaklar.pdf
- Wang, X., Ghaffarizadeh, S. A., He, X., McGaughey, A. J. H., & Malen, J. A. (2022). Ultrahigh evaporative heat transfer measured locally in submicron water films. *Scientific Reports*, *12*, 22353. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26182-2>
- Yıldız, C. (2024). Binalarda enerji verimliliğinde son gelişmeler: Türkiye örneği. *Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology*, *12*(1), 176-213. Gazi Üniversitesi.

GÜNEŞ ENERJİLİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİLER VE UYGULAMA ALANLARI

