

HAVA KAYNAKLI PV/T HİBRİT SİSTEM TASARIMI ve PERFORMANS ÖLÇÜMLERİ

Ersin Karacabey^{1*}, Birol Kayışoğlu²

¹ Dr., Manisa Bağcılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, ersin.karacabey@tarimorman.gov.tr

² Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, bkayisoglu@nku.edu.tr

ÖZET

Fotovoltaik paneller güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve son yıllarda dünyada ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde en önemli sorun, panel veriminin düşük olması ve bu nedenle daha fazla yüzey alanına gereksinim duyulmasıdır. Panel veriminin artırılmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Panel verimini etkileyen en önemli faktörlerden birisi de hücre sıcaklığıdır. Hücre sıcaklığı arttıkça panel verimi düşmektedir. Hücre sıcaklığını düşürmek için genellikle panellerin altına su ceketleri yerleştirilmekte (PV/T sistemler) ve hem panel verimi yükseltilmekte hem de suya ısı enerjisi aktarılmaktadır. Yaygın olmasa da su yerine hava soğutmalı sistemler de kullanılmaktadır. Bu çalışmada hava soğutmalı olarak çalışan ve 2 farklı kanatçık yapısına sahip PV/T sistemi tasarlanarak imal edilmiştir. Panel performans denemelerinde dikdörtgen kesitli kanatçıklara sahip panelde %38,04 ve dairesel kesitli kanatçığa sahip panelde %34,06 ısı verim değerlerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte hibrit panellerde anlık olarak en yüksek %45 ısı verim değeri elde edilmiştir. Panel yüzeyine düşen toplam enerjiye bağlı olarak üretilen toplam elektrik enerjisi miktarı ve elektriksel verim değerleri büyük farklılıklar göstermemekle birlikte kontrol grubunda bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Bu durumda elektriksel çıktılarda önemli bir kayıp yaşamadan sağlanan ısı verim artışlarıyla birlikte toplam verim değerleri yönünden hibrit panellerin herhangi bir soğutma düzeneği olmayan klasik fotovoltaik paneline göre önemli bir avantaj sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, PV/T sistemler, PV performansı, Güneş enerjisi

ABSTRACT

Photovoltaic panels are systems which convert sun energy to electrical energy directly and are widely used in our country and the world in recent years. The most important problem in these systems is low efficiency and due to that needing larger surface area. Researches on increasing panel efficiency are in progress. One of the most important factors affecting solar panel efficiency is cell temperature. Panel efficiency decreases when cell temperature increases. Water jackets are generally placed under panel to decrease cell temperature (PV/T hybrid system) and in this way panel efficiency is both increased and heat energy is transferred to water. Air cooling systems are also used even if not they are common. In this study, a PV/T system with air cooling and 2 different fin structures was designed and manufactured. In panel performance experiments, thermal efficiency values of 38,04% in the rectangular section panel and 34,06% in the circular section panel were reached. However, the highest instantaneous thermal efficiency value of 45% was achieved in hybrid panels. Although the total amount of electrical energy produced and electrical efficiency values depending on the total energy falling on the panel surface did not differ greatly, they were found to be slightly higher in the control group. In this case, it is seen that hybrid panels provide a significant advantage over the classic photovoltaic panel without any cooling mechanism in terms of total efficiency values, along with increases in thermal efficiency achieved without any significant loss in electrical output.

Keywords: Photovoltaic, PV/T systems, PV performance, Sun energy

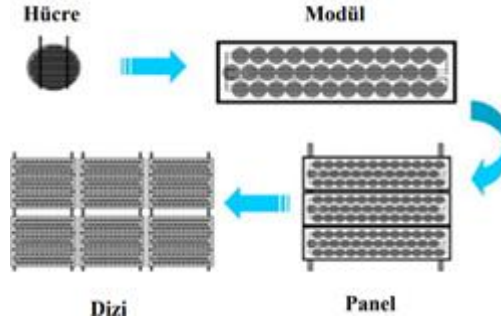
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Ersin Karacabey
(e-posta: ersin.karacabey@tarimorman.gov.tr)

** Bu bildiri Ersin KARACABEY'in doktora tezinin bir kısmını kapsamaktadır.

1. GİRİŞ

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik sistemler günümüzde giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu sistemlerde güneş hücreleri, üzerlerine ışık düşmesiyle birlikte yarı iletken maddenin uçları arasında oluşan gerilim farkı ile elektrik enerjisi üretirler. Üretilen doğru akım uygun cihazlarda doğrudan kullanılabilirdiği gibi invertörler yardımıyla alternatif akıma dönüştürülerek de kullanılabilir. (Kantaroglu, 2010).

Fotovoltaik sistemlerde güneş hücreleri bir araya gelerek modülleri, modüller panelleri ve paneller ise fotovoltaik dizileri oluşturmaktadır. Bir fotovoltaik sistemi oluşturan temel bileşenler Şekil 1.1’de gösterilmektedir (Kantaroglu, 2010).



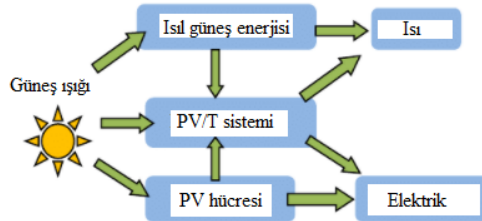
Şekil 1.1. Fotovoltaik sistem bileşenleri (Kantaroglu, 2010)

Fotovoltaik güneş hücrelerinde yarı iletken madde olarak kristal silisyum, galyum arsenit, bakır indiyum diselenit gibi maddeler kullanılmaktadır. Kristal silisyum hücreler en yaygın kullanım alanına sahiptir. Fotovoltaik paneller, yeni nesil araba ve çatıların üzerinde, sokak ışıkları, trafik sinyalleri, hesap makineleri, saatler, doğru akım motorlar ve fanlar, dönüştürücülerde kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda, çok ilgi çeken diğer bir konu da fotovoltaik yapıların binalara (duvar, çatı, pencere gibi bina bölümlerine) entegre edilmesidir (Bedeloğlu vd., 2010).

Fotovoltaik sistemler temel olarak şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olmak üzere 2 temel uygulama şeklinde kullanılabilir. Şebekeden bağımsız sistemler harici bir elektrik enerjisi sistemiyle bağlantısı olmayan ve çoğunlukla güneş ışınımının olmadığı zamanlarda kullanılmak üzere enerjinin depolandığı sistemler iken şebeke bağlantılı sistemler bölgedeki mevcut elektrik enerjisi hattı ile bağlantılı olarak sistemde üretim olmadığında enerjiyi şebekeden almakta ve üretim fazlası elektrik enerjisini mevcut hatta verebilmektedir.

Dünyada PV modül üretimi yaygın olmasına rağmen PV modüllerin artan sıcaklıkla verimlerinin düşmesi ve buna bağlı olarak yatırım geri dönüş süresinin uzaması, güneşten elektrik üretimi yapacak sistemlerin yaygınlaşmamasındaki en büyük nedenlerdendir. PV modül kısmının sıcaklığını dolaşımli bir akışkan yardımıyla düşürmek mümkündür. Bu amaçla son yıllarda PV modüllerin tek başına kullanılmasına bir alternatif olarak aynı anda hem elektrik hem de ısı enerjisi üretebilen, PV modülün soğutma düzeneği ile birlikte kullanıldığı hibrit PV/termal (PV/T) sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Karaca, 2010).

PV-termal hibrit sistemler klasik PV ve ısı üretim biriminden oluşmaktadır. Isı enerjisi üretim birimi PV modülün soğutulması işleminde ısıyı uzaklaştıracak akışkanı dolaştırma özelliğine sahiptir. Geleneksel tekil PV ve ısı enerjisi üretim birimine göre hem elektrik hem de ısı enerjisi üretimi Şekil 1.2’deki gibi şematize edilebilir (Apuko ve Inambao, 2013).



Şekil 1.2. Güneş enerjisi çevrim şekilleri (Apuko ve Inambao, 2013)

PV-termal hibrit sistemler kullandıkları soğutucu akışkana göre hava ile soğutmalı, su ile soğutmalı, ısı pompalı ve ısı borulu olmak üzere 4 ana gruba ayrılabilir (Kırtepe ve Güngör, 2017). Uygulamada ise hava veya su kaynaklı PV-termal hibrit sistemlerin kullanımına rastlanmaktadır.

PV-termal hibrit sistemler yüksek yatırım maliyetleri ve klasik panellere göre komplike yapıları nedeniyle yeterli seviyede yaygınlaşamamış olsa da yüksek verimleri ve alan kazanımı gibi ciddi avantajlara sahiptir. Konutlarda, kapalı alanlarda iklimlendirme ve tarımsal kurutma gibi çok farklı alanlarda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Farklı uygulama örneklerinden biri Arslan (2020) tarafından yapılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada PV panel sıcaklığı düşürülürken elde edilen sıcak havayı nane ve elma kurutmada kullanmıştır. Uygun kanatçık tasarımı ile en yüksek PV/T termal verimini % 41.46 ve maksimum çıkış sıcaklığını 49.46 °C olarak elde etmiştir. Tarımsal kurutmaya yönelik bir diğer çalışmada Karacabey (2024), dikdörtgen ve dairesel kesitli ısı eşanjörüne sahip PV-termal sistem ile %34-38 ısı verim değerleri elde ederek üzüm kurutma işlemini gerçekleştirmiştir. Diğer bir uygulama örneğinde Gözübüyük, Ömeroğlu ve Özakin (2024) tarafından bir güneş kolektörünün güneş ışımasını emme kapasitesini arttırmak için, soğurucunun siyah bir yüzeyle kaplanması ve verimliliğinin artırılması için birincil akışkan olarak nanoakışkanın kullanılmasıyla yeni bir yaklaşım uygulanmıştır. Taguchi metodu ile optimum değerler 900 W m⁻² ısıtım şiddeti, siyah 3.0 kaplamalı düz yüzeyli toplayıcı, 0,5 m/s kurutma hava hızı ve %0,1 nanopartikül kütle oranında elde edilmiştir. Çalışmada optimize edilmiş güneş kolektör sistemi kullanılarak 3 kg elma, 2,55 kg biber, 2,38 kg şeftali ve kayısı, 2,35 kg muz ve 2,23 kg erik kurutulabileceği belirlenmiştir.

PV-termal hibrit sistemlerde kullanılan akışkanın PV panel üzerinde oluşan sıcaklığı üzerine alması ile panel yüzeyinin sıcaklığının düşürülmesi ve elektriksel verimin yükseltilmesi mümkün olmaktadır. Yine bu sistemden elde edilen sıcak akışkanın evsel kullanım gibi ihtiyaçlara dönük olarak kullanılması sistemin diğer bir avantajıdır. Bu sistemlerin kullanımında dikkat edilmesi gereken bir husus olarak sistemin aktif olarak kullanılmadığı koşullarda ısınan soğutucu akışkanın PV sisteme zarar vermemesi ve güvenlik açısından uygun bir tahliye ve güvenlik sistemi bulunmalıdır.

Genel olarak, bir PV modülü tarafından emilen güneş radyasyonunun çoğu, hücre sıcaklığını artıran ve PV verimliliğini azaltan ısıya dönüştürülür. Aslında, hücre sıcaklığındaki her 1 °C'lik artış, PV verimliliğini yaklaşık %0,5 düşürmektedir. PV/T hibrit panellerinde bu sorunun üstesinden gelmek için, PV kolektörü ısıyı absorbe eden ve aynı zamanda güneş pilleri için bir soğutucu görevi gören bir termal modül ile birleştirilir (Rachid ve Abdin, 2022).

2. MATERYAL ve METOT

2.1. MATERYAL

PV/T sistem imalatında kullanılan paneller monokristal yapıda olup 320 W nominal güç değerine sahiptir. Panel ölçüleri 1640 mm x 992 mm'dir (Şekil 2.1). Sabit açıyla çalışan PV panel yerleşiminde yıl boyunca ısıtım toplamının en yüksek olduğu değer açık gökyüzü ısıtım hesaplarına göre eğim=enlem olarak ortaya çıksa da açık gökyüzü ısıtımında bulutlanma, yağmur, kar vb. etkiler olmadığından yaz aylarına biraz ağırlık verilmesi, yani enlem-10 < eğim < enlem aralığında seçim yapılması uygun olmaktadır (Boztepe, 2017). Çalışmada panel yerleşimi 26° 43' - 28° 08' doğu boylamları ve 40° 36' - 41° 31' kuzey enlem dereceleri üzerinde bulunan Tekirdağ İli için 35° sabit açıyla yapılmıştır.



Şekil 2.1. Kullanılan monokristal güneş paneli

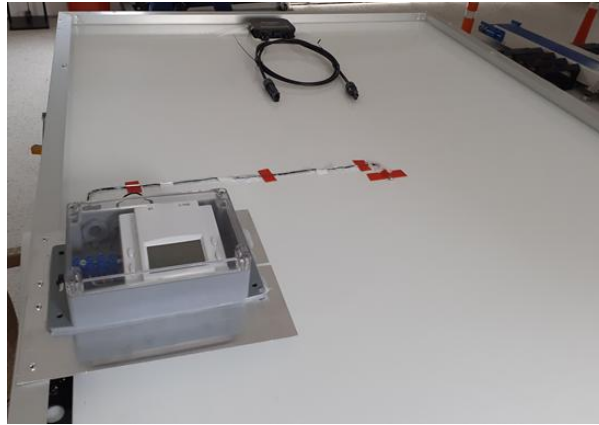
Şekil 2.1’de görülen monokristal güneş panelinin teknik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Güneş panelinin teknik özellikleri

APX 320 M	Fabrika değeri
Optimum Çalışma Voltajı (V_{mp})	33,85 V
Optimum Çalışma Akımı (I_{mp})	9,48 A
Açık Devre Voltajı (V_{oc})	40,89 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	9,99 A
Maksimum Güç (STC) (P_{max})	320 W
Ağırlık	18 kg
Boyutlar	1649 x 992 x 35 mm

PV/T sisteminde panel alt yüzeyinden hava akımının geçirilmesinde $580 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ hava debisi kapasitesinde, 50 W nominal güç değerinde fanlar kullanılmıştır.

PV/T hibrit panellerinin performans değerlerinin belirlenmesi için sistemin giriş çıkış noktalarında sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı değerlerinin ölçümü için veri toplama sistemi oluşturulmuştur. PV alt yüzeylerinde oluşan sıcaklık değerleri termokupllar yardımıyla toplanmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. PV alt yüzeyinde kullanılan termokupl elemanlar

Sistemin giriş-çıkış noktalarında sıcaklık-nem ve hava hızı sensörleri yerleştirilerek veriler 24 saat toplanarak kaydedilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Sıcak hava iletim kanallarına yerleştirilen sıcaklık-nem ve hava hızı sensörleri

Tüm sensörlerden elde edilen veriler HT yazılım kullanılarak Homotech ebox üzerinde 24 saat boyunca kaydedilmiştir (Şekil 2.4).

ID	Channel	Value	Unit	Name	Setpoint	Status
1	1	0.00	0.30	0.00	0.00	
11	Sıcaklık 11	35.86	0.00	23.00	30.00	
12	Sıcaklık 12	36.12	0.00	23.00	30.00	
13	Sıcaklık 13	30.38	0.00	23.00	30.00	
14	Sıcaklık 14	33.43	0.00	23.00	25.00	
15	Sıcaklık 15	35.07	0.00	23.00	30.00	
16	Sıcaklık 16	35.18	0.00	23.00	30.00	
17	Sıcaklık 17	34.94	0.00	23.00	30.00	
21	Sıcaklık Nem 21	32.39	51.98	23.00	45.00	
22	Sıcaklık Nem 22	31.99	53.17	23.00	50.00	
23	Sıcaklık Nem 23	31.91	55.64	23.00	50.00	
24	Sıcaklık Nem 24	31.11	53.75	23.00	50.00	
31	Hava Hız m/s 31	6.39	0.00	0.00	0.00	

Şekil 2.4. Verilerin toplandığı ebox

Panel çıkışındaki hava akımında basınç değerlerinin okunmasında bir dijital manometre kullanılmıştır (Şekil 2.5).

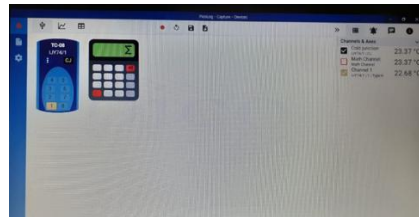


Şekil 2.5. Dijital manometre

Panel giriş noktalarındaki hava giriş sıcaklıkları K-tipi termokupl kullanılarak ölçülmüş ve Pico Datalogger ve yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).



Şekil 2.6. K-tipi termokupl ve datalogger



Şekil 2.7. Kullanılan Pico yazılımı

Kurutma odalarının içerisindeki sıcaklık ve nem değerleri ise Hobo sensörler yardımıyla toplanarak 24 saat kaydedilmiştir. Ölçüm sistemlerinde kullanılan veri dönüştürücü ve cihazlar Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Ölçüm sisteminde kullanılan cihazlar

Cinsi	Adedi
Kanal Tipi Hava Hız Ölçer	1
Sıcaklık Sensörü (Termokupl)	7
Kanal Tipi Sıcaklık ve Nem Sensörü	4
Analog Girişli Kontrol Ünitesi DNK	1
RS485 USB Çevirici + 24Vdc Güç kaynağı + Pano +Sarf Malzeme	1

Ölçüm cihazlarından hava hızı ölçer Dwyer marka olup, doğruluk değeri ($0,2 \text{ m s}^{-1} + \text{okumanın } \% 5'i$) düzeyindedir. Kanal tipi sıcaklık ve nem sensörleri Gentek marka olup doğruluk düzeyi $\pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir. K-tipi termokupl elemanların ölçüm hassasiyeti ise $0,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir.

PV/T hibrit ve PV sistemin elektriksel verimliliklerinin belirlenmesi amacıyla panel yüzey sıcaklığı, güneş ışıyım şiddeti değeri, akım-gerilim ve güç değerlerinin IEC/EN608891 (I-V curve test) standardına göre ölçümü için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği Bölümünden temin edilen HT Italia marka I-V400 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Fotovoltaik panel enerji analizörü

2.2. METOT

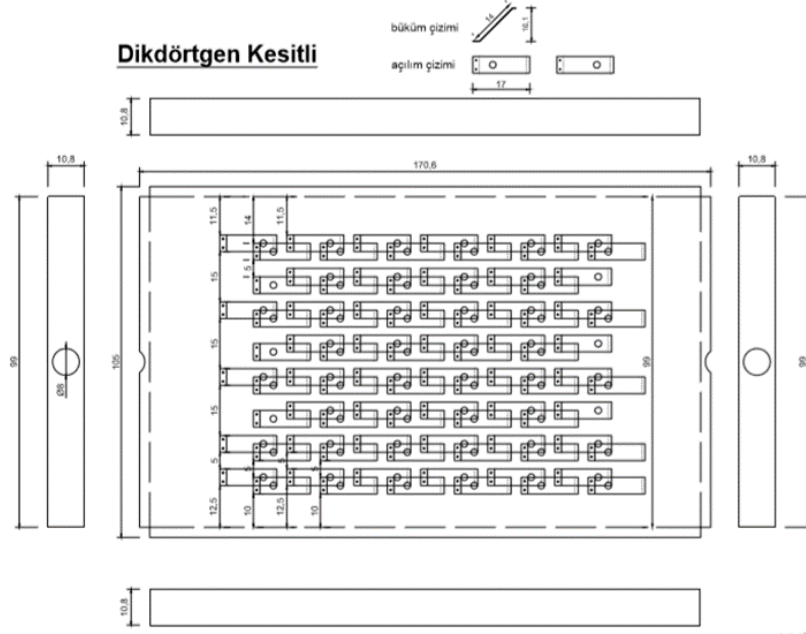
2.2.1. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Analizleri

İhtiyaç duyulan ısı enerji miktarının sağlanmasına yönelik olarak imal edilecek soğutma düzenlerinin çalışma koşullarıyla ilgili olarak HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yöntemi ve Fluent programıyla akış analizleri gerçekleştirilmiştir.

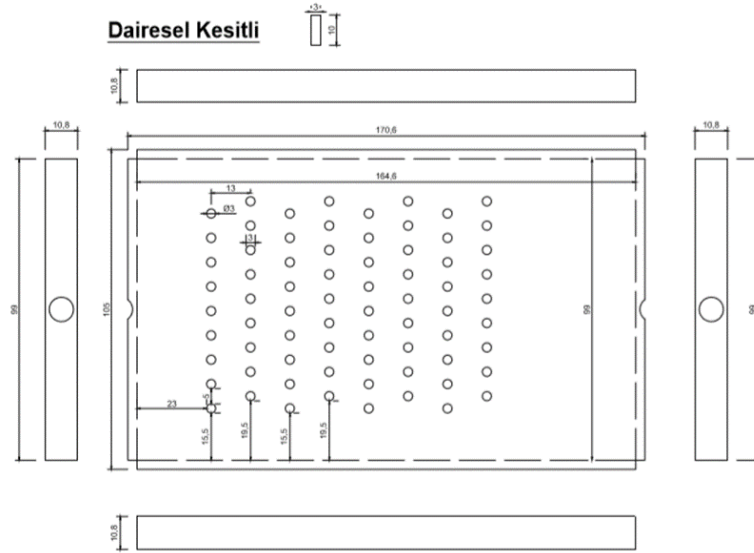
Yapılan akış analizlerinde oluşturulan katı modellere göre eşanjör sistemlerinin içerisindeki basınç kayıpları, yüzey ve çıkış sıcaklıkları belirlenerek sistem tasarımı revize edilmiştir.

2.2.2. PV/T Panellerinin İmalatı

PV panellerin altında oluşturulacak ısı eşanjörlerinin imalatı öncesinde kanatçık dizilim ve teknik özelliklerini içeren çizimler oluşturularak imatları yapılmıştır (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10).



Şekil 2.9. Dikdörtgen kesitli kanatçıklara sahip ısı eşanjörlerinin çizimi



Şekil 2.10. Dairesel kesitli kanatçıklara sahip ısı eşanjörlerinin çizimi

Kanatçık elemanların sabitlenmesinde dairesel kesitte kontrol hacmi alt kapağına kaynakla birleştirme ve dikdörtgen kesitte perçinle birleştirme yapılarak imalat tamamlanmıştır (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12).

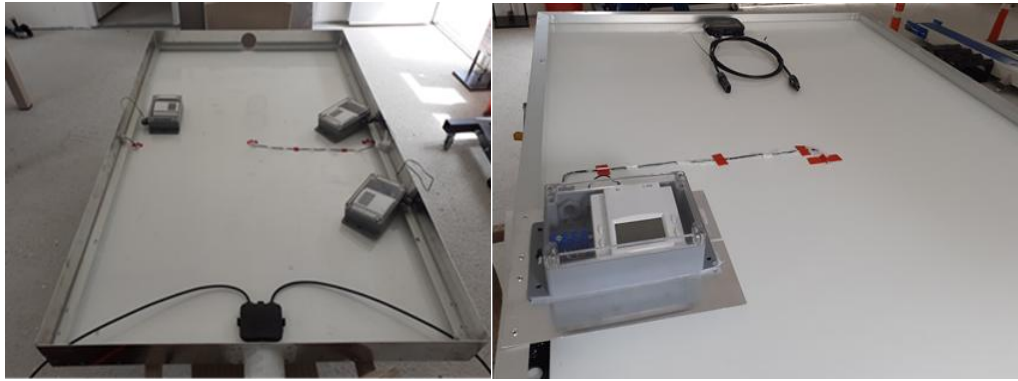


Şekil 2.11. Dairesel kesitli ısı eşanjörü imalatı



Şekil 2.12. Dikdörtgen kesitli ısı eşanjörü imalatı

Kanatçık elemanlar PV panel alt yüzeyine temas halindedir. Alüminyum sacdan alt ve yan kapakların kapatılmasında silikon kullanılarak tam sızdırmazlık sağlanmıştır. Sıcaklık sensörleri ise PV alt yüzeyinde merkez ve kenar bölgelere yapıştırılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Termokuplların PV alt yüzeyine sabitlenmesi

PV alt yüzeyine termokupl elemanlar yerleştirildikten sonra kontrol hacmi tam sızdırmazlık sağlanarak kapatılmış ve değerlerin gösterildiği dijital ekranlar kontrol hacmi dışına sabitlenmiştir (Şekil 2.14).



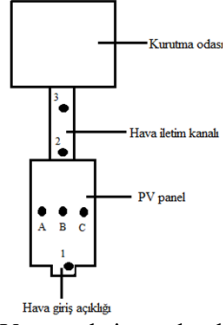
Şekil 2.14. Kontrol hacminin kapatılmış hali

2.2.3. PV ve PV/T Sistemlerinin Performans Ölçümleri

Panellerin performanslarını belirlemek amacıyla Tekirdağ ilinde Haziran ayında 3 bulutsuz günde art arda saat 09:00 ile 18:00 arasında birer saat arayla, kontrol panelinde yalnızca elektriksel güç, diğer panellerde elektriksel gücün yanı sıra ısı güç ölçümleri yapılmıştır. Hesaplamalar 3 gün boyunca elde edilen verilerin ortalamaları alınarak yapılmıştır.

2.2.3.1. Isıl Güç Ölçümleri

PV/T hibrit sistemin ısı etkinliklerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 2.15’de gösterilen 1, 2 ve 3 no’lu noktalarda hava sıcaklığı ve bağıl nemi değerleri ölçülmüştür. Fotovoltaik panellerin A, B ve C ile gösterilen noktalarında ise sırasıyla sol kenar, merkez ve sağ kenar bölümlerinde termokupllar ile sıcaklık değerleri ölçülmüştür.



Şekil 2.15. PV-termal sistemde ölçüm noktaları

Ayrıca, panel çıkışından sonra kurutma odası girişinde havanın hız, basınç, sıcaklık ve bağıl nem değerleri ölçülerek kütleli hava debisi Eşitlik 2.1 ile saptanmıştır (Uher ve Kanta, 2017);

$$\dot{m} = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \times \rho_{\text{hava}} \times v_{\text{hava}} \quad (2.1)$$

Eşitlikte, \dot{m} (kg s^{-1}) kütleli hava debisi, d (m) hava kanalı iç çapı (m), ρ_{hava} (kg m^{-3}) havanın yoğunluğu ve v_{hava} (m s^{-1}) havanın hızıdır.

Hava kanalındaki havanın yoğunluğu sıcaklık, bağıl nem ve basınç değerlerine bağlı olarak psikrometrik diyagramdan bulunmuştur. Kanal içerisindeki basınç değeri dijital manometreden okunan değere göre Eşitlik 2.2 yardımıyla hesaplanmıştır;

$$P_{\text{mutlak}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{gös}} \quad (2.2)$$

Eşitlikte; P_{mutlak} (kPa) mutlak basıncı, P_{atm} (kPa) atmosfer basıncını ve $P_{\text{gös}}$ (kPa) göstere basıncını ifade etmektedir.

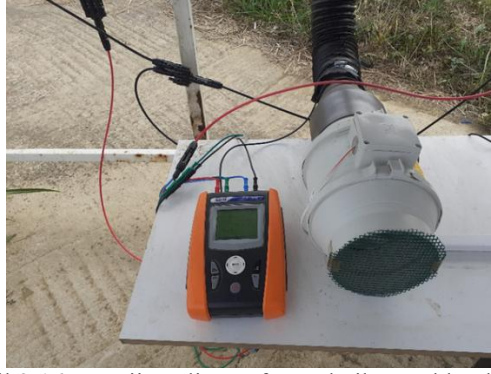
Kütleli hava debisi belirlendikten sonra Eşitlik 2.3 ile panellerin ısı gücü hesaplanmıştır (Radziemska, 2009);

$$Q_p = \dot{m} \times c_p \times (T_c - T_g) \quad (2.3)$$

Burada, Q_p (W) panelin ısı gücü, c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) havanın özgül ısı, T_c ve T_g ($^\circ\text{C}$) sırasıyla panel çıkış ve girişindeki hava sıcaklıklarıdır.

2.2.3.2. Elektriksel Güç Ölçümleri

IEC/EN608891 standardına göre elektriksel çıktıların belirlenmesi amacıyla HT Italia marka I-V400 model cihaz kullanılarak panel yüzey sıcaklığı, güneş ışınım şiddeti değeri, akım-gerilim ve güç değerleri ölçülmüştür (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Enerji analizörü-fotovoltaik panel bağlantısı

Ölçümler öncesinde analizöre güneş paneline ait fabrika değerleri tanımlanmıştır. Fotovoltaik panel hücre sıcaklıkları dijital göstergelerden okunarak cihaza manuel olarak girilmiştir. Topview yazılımı kullanılarak ölçülen değerlerin grafiksel gösterimleri elde edilmiştir.

2.2.4. Elektriksel ve Isıl Verimlerin Hesaplanması

Panellerin elektriksel verimleri Eşitlik 2.4 ile hesaplanmıştır;

$$\eta_{\text{elk}} = \frac{E_{\text{elk}}}{E_p} \times 100 \quad (2.4)$$

Eşitlikte; η_{elk} (%) panelin elektriksel verimi, E_{elk} (Wh) ölçüm süresince panelin ürettiği toplam elektriksel enerji, E_p (Wh) ölçüm süresince panel yüzeyine gelen toplam güneş enerjisidir.

Dairesel ve dikdörtgen kesitli panellerin ısı verimi Eşitlik 2.5 ile hesaplanmıştır (Kim ve Kim, 2012);

$$\eta_{\text{ısıl}} = \frac{E_{\text{ısıl}}}{E_p} \times 100 \quad (2.5)$$

Burada; $\eta_{\text{ısıl}}$ (%) panelin ısı verimi, $E_{\text{ısıl}}$ (Wh) ölçüm süresince panelden havaya verilen toplam ısı enerjisidir.

Kontrol paneli hariç diğer iki panelde toplam verim aşağıdaki Eşitlik 2.6 ile hesaplanmıştır (Dinker, Kumar ve Yadav, 2023);

$$\eta_{\text{top}} = \eta_{\text{elk}} + \eta_{\text{ısıl}} \quad (2.6)$$

3. BULGULAR

3.1. HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ ANALİZ SONUÇLARI

İmal edilen sistem ve tasarıma temel oluşturmak amacıyla PV/T hibrit sisteme ait akım, gerilim, güç çıkışı ve panel sıcaklık değişimi gibi parametrelerin elde edilmesi amacıyla 780 W m^{-2} ısınım şiddeti ve 9 m s^{-1} fan hız değerinde dairese ve dikdörtgen kesitli kanatçıklara sahip soğutma düzenleri ile PV panelde ortaya çıkan yüzey sıcaklık ve çıkış sıcaklık dağılımları hesaplamalı akışkan dinamiği analizleriyle belirlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre hava çıkış sıcaklıkları silindirik kanatçıklı elemanlarda panelin orta giriş kısmında dengeli bir soğutma yapmış ancak panelin kenarlarına hava iletilmediği için soğutma yeterince olmamıştır. Dikdörtgen kesitli kanatçık elemanlarında ise daha dengeli bir soğutma sağlanmıştır. Ancak silindirik elemana kıyasla 50 Pa daha fazla bir basınç farkı oluşmuştur. Bu nedenle ilk sıra elemanlarının diziliminde birer

adet seyreltilmesiyle fandan çıkan havanın kanatçıklara çarpıp geri gelmesini azaltacağı düşünülmüştür. Fan seçimi bu sonuçlara göre optimize edilmiştir.

3.2. PV VE PV/T SİSTEMLERİNDE ELDE EDİLEN ELEKTRİKSEL VE ISIL PERFORMANS DEĞERLERİ

Herhangi bir soğutma ünitesine sahip olmayan kontrol panelinde panel yüzeyine düşen toplam güneş ışınımı gücü I_p (W) ile üretilen elektriksel güç P_{max} (W) çıktıları Tekirdağ ilinde haziran ayında 3 gün boyunca saat 9:00 ile 18:00 arasında birer saat arayla ölçülmüş ve elde edilen ortalama değerler panel alanına gelen toplam miktar olarak Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kontrol panelinde ışınım gücüne bağlı olarak elektriksel güç değerleri

Ölçüm Zamanı (h)	I_p (W)	P_{max} (W)
9:00	729,21	137
10:00	1.008,80	185
11:00	1.273,67	228
12:00	1.430,63	249
13:00	1.489,49	257
14:00	1.438,80	246
15:00	1.265,49	220
16:00	1.026,78	181
17:00	735,75	133
18:00	572,25	95

I_p :Toplam Güneş Işınımı Gücü, P_{max} : Üretilen Elektriksel Güç

Dikdörtgen ve dairesel kesitli soğutma düzeneğine sahip PV/T hibrit sistemlerinde haziran ayında elektriksel ve ısı ölçümlerin zamana bağlı olarak ortalama değerleri sırasıyla Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Dikdörtgen kesitli panelin elektriksel ve ısı ölçüm sonuçları

Ölçüm Zamanı (h)	I_p (W)	P_{max} (W)	T_g (°C)	T_c (°C)	\dot{m} (kg s ⁻¹)	Q (W)
9:00	686,7	127	26,1	29,5	4,94x10 ⁻²	171,0
10:00	995,7	179	25,8	32,5	5,05x10 ⁻²	340,3
11:00	1.247,5	219	26,2	34,5	5,08x10 ⁻²	425,6
12:00	1.422,5	244	27,5	36,6	4,99x10 ⁻²	459,1
13:00	1.486,2	250	26,4	38,6	4,96x10 ⁻²	611,7
14:00	1.433,9	245	26,1	38,5	4,96x10 ⁻²	621,1
15:00	1.213,2	220	26,3	37,2	4,98x10 ⁻²	546,5
16:00	1.072,6	190	25,8	34,6	4,82x10 ⁻²	428,9
17:00	758,6	134	25,5	31,4	4,92x10 ⁻²	290,2
18:00	572,3	70	25,1	28,4	5,11x10 ⁻²	169,2

I_p : Toplam Güneş Işınımı Gücü, P_{max} : Üretilen Elektriksel Güç, T_g : Havanın Panele Giriş Sıcaklığı, T_c : Havanın Panelden Çıkış Sıcaklığı, \dot{m} : Kütlesel Hava Debisi, Q : Isı Enerjisi

Tablo 3.3. Dairesel kesitli panelin elektriksel ve ısı ölçüm sonuçları

Ölçüm Zamanı (h)	I_p (W)	P_{max} (W)	T_g (°C)	T_c (°C)	\dot{m} (kg/s)	Q (W)
9:00	711,2	111	26,1	28,8	$5,03 \times 10^{-2}$	138,6
10:00	1.002,3	166	25,8	31,5	$4,92 \times 10^{-2}$	282,5
11:00	1.260,6	213	26,2	33,6	$4,97 \times 10^{-2}$	371,5
12:00	1.427,4	240	27,5	35,4	$4,95 \times 10^{-2}$	396,3
13:00	1.489,5	247	26,4	37,4	$4,86 \times 10^{-2}$	540,2
14:00	1.432,3	241	26,1	37,0	$4,86 \times 10^{-2}$	535,0
15:00	1.288,4	221	26,3	36,2	$4,80 \times 10^{-2}$	478,7
16:00	1.049,7	184	25,8	35,3	$4,94 \times 10^{-2}$	474,4
17:00	747,2	136	25,5	31,5	$4,72 \times 10^{-2}$	283,0
18:00	559,2	75	25,1	28,7	$4,98 \times 10^{-2}$	179,8

I_p : Toplam Güneş Işınımı Gücü, P_{max} : Üretilen Elektriksel Güç, T_g : Havanın Panele Giriş Sıcaklığı, T_c : Havanın Panelden Çıkış Sıcaklığı, \dot{m} : Kütlesel Hava Debisi, Q : Isı Enerjisi

Gün boyu yapılan güç ölçümler sonucu her üç panelde hesaplanan panel yüzeyine gelen ve üretilen toplam enerji miktarları ile verim değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Panellerin ölçüm aralığında ürettiği enerji ve verim değerleri

Panel Tipi	E_{panel} (Wh)	E_{elk} (Wh)	$E_{ısıl}$ (Wh)	η_{elk} (%)	$\eta_{ısıl}$ (%)	η_{top} (%)
Kontrol	10.422,7	1.830,4	-	17,56	-	17,56
Dikdörtgen K.	10.353,3	1.790,8	3.938,7	17,30	38,04	55,34
Dairesel K.	10.436,4	1.753,9	3.554,4	16,81	34,06	50,86

E_{panel} : Panel yüzeyine gelen toplam güneş enerjisi, E_{elk} : Elektriksel enerji, $E_{ısıl}$: Ölçüm süresince panelden havaya verilen toplam ısı enerjisi, η_{elk} : Elektriksel verim, $\eta_{ısıl}$: Isıl verim, η_{top} : Toplam verim

Isıl çıktılar incelendiğinde tüm ölçüm noktalarında dikdörtgen kesitli soğutma düzeneğine sahip PV/T sisteminin dairesele kesitli düzeneğe sahip sisteme oranla daha yüksek verim değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu panel tipinde anlık olarak %45’e varan verim değerleri ortaya çıkmakla birlikte toplam ısı verim %38,04 seviyesindedir. Bu da sağlanan türbülans ve şaşırtmalı dizilim ile iyi bir ısı absorpsiyonunun gerçekleştiğini göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak bu sistem dairesele kesitli soğutma düzeneğine göre daha yüksek çıkış sıcaklığı ve hava debisi üretmektedir.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

PV panellerin alt yüzeylerinde oluşturulan soğutma düzenlerinin etkinliği incelendiğinde dairesele kesitli geometride merkez bölgede daha etkin soğuma gerçekleşmiştir. Dikdörtgen kesitli düzenekte soğutmanın kenar kısımlarda daha etkili olması büyük oranda şaşırtmalı dizilimle oluşturulan türbülans etkisine bağlanmaktadır. PV panellerin altındaki kanal derinliğinin 10 cm değerinin üzerinde olmaması bir diğer etkili faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dikdörtgen kesitli soğutma düzeneğinde tüm deneme boyunca daha yüksek debi, sıcaklık ve ısı verim değerlerine ulaşılmıştır. Tek geçişli hava soğutma sistemlerde literatür verilerine göre 30-40 °C aralığında çıkış

sıcaklıkları alınabilmekte olup bu çalışmada panel performans denemelerinin yapıldığı haziran ayında en yüksek 38,6 °C ve kurutma denemelerinin yapıldığı Ağustos ayında 45 °C sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.

Tek geçişli hava sistemlerinde elde edilebilen ısı verim değerleri daha önce yapılan çalışmalarda çoğunlukla %30-50 aralığında değişim göstermekle birlikte denemeler boyunca değişkenlik olsa da dikdörtgen kesitli panelde %38,04 ve dairesel kesitli panelde %34,06 ısı verim değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler elde edilirken anlık olarak hibrit panellerde en yüksek %45 ısı verim değerlerine çıkmıştır.

Panel yüzeyine düşen toplam enerjiye bağlı olarak üretilen toplam elektrik enerjisi miktarı ve elektriksel verim değerleri büyük farklılıklar göstermemekle birlikte kontrol grubunda bir miktar daha yüksek bulunmuştur. Bu durumda elektriksel çıktılarda önemli bir kayıp yaşamadan sağlanan ısı verim artışlarıyla birlikte toplam verim değerleri yönünden dikdörtgen kesitli soğutma ünitesine sahip panel tipinin önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir.

Fotovoltaik panel üzerine düşen toplam güneş enerjisi elde edilen elektrik enerjisi ile ısı enerjisinin toplamından oluşmaktadır. PV/T sistemlerinde elde edilen ısı verimle birlikte ortaya çıkan toplam verim değerlerinde herhangi bir soğutma düzeni olmayan kontrol paneline göre önemli avantajlar olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmayı TAGEM/TSKAD/B/20/A9/P8/1810 nolu proje ile destekleyen TAGEM'e ve hesaplamalı akışkan dinamiği analizlerinde katkı ve desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Gökhan ÖMEROĞLU'na teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Apuko, A; Inambao, F, 2013, Water Based Hybrid Photovoltaic and Thermal (PV/T) Flat Plate Solar Collectors: Status and Opportunities, Proceedings of the 13th BIE Biennial Conference, 85-98.
2. Arslan, E; 2020, Yeni Nesil Güneş Enerjili Fotovoltaik-Termal Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı ve Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 107 s.
3. Bedeloğlu, A; Demir, A; Bozkurt, Y; 2010, Fotovoltaik Teknolojisi: Türkiye ve Dünyadaki Durumu, Genel Uygulama Alanları ve Fotovoltaik Tekstiller, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4 (2): 43-58.
4. Boztepe, M, 2017, Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler-1. EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni, 13-17.
5. Dinker, S; Kumar, A; Yadav, A; 2023, Investigation of techniques for enhancement of efficiency of a hybrid photovoltaic and solar thermal system: literature review on applications and its advancement, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 11(VI), 1789-1802.
6. Gözübüyük, S; Ömeroğlu, G; Özakin, A, N; 2024, Optimization With Taguchi Method For Increasing The Heat Transfer And Drying Efficiency In A Novel Solar Collector, Heat Transfer Research, 55(3), 61-74.
7. Kantaroğlu, F, 2010, Fotovoltaik Sistemler, Türk Tesisat Mühendisleri Dergisi, 28-34.
8. Karaca, İ, H; 2010, Verimi Artırılmış Fotovoltaik Paneller: Hibrid Panel (Pv/T) Teknolojisi ile Elektrik ve Isı Enerjisi Üretimi, Solar Future 2010 Bildiriler Kitabı, 108-111.
9. Karacabey; 2024, Tarımsal Kurutma Uygulamaları İçin Fotovoltaik Termal Hibrit Sistem (Pv/T) Tasarımı, Doktora Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96 s.
10. Kırtepe, E; Güngör, A; 2017, Binalarda Bütünleşik Güneş Enerjisi Uygulama Örnekleri, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 303-328.
11. Kim, H; Kim, J; 2012, The Experimental Performance Of An Unglazed Pvt Collector With Two Different Absorber Types, International Journal of Photoenergy, 6 p.
12. Rachid, A; Abdin, Z, U; 2022; Solar Hybrid Pv/T Panels For Drying, International Drying Symposium, Jun 2022, Worcester, United States.
13. Radziemska, E, 2009, Performance Analysis of a Photovoltaic-Thermal Integrated System. International Journal of Photoenergy, Vol: 2009, Pp: 6.
14. Uher, J; Kanta, L; 2017, Calibration of nozzle for air mass flow measurement. AIP Conf. Proc. 25 September 2017, 1889 (1), 020045, <https://doi.org/10.1063/1.5004379>.

KOCAELİ İLİ DERİNCE İLÇESİ SOLAR RADYASYON VE ENERJİ POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

İnan Günay, Elektrik Mühendisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, gunayi@itu.edu.tr

ÖZET

Derince İlçesi, Yenikent Mahallesi'nin koordinatları, 29,81 Doğu Meridyeni ve 40,77 Kuzey Paralelidir. Güneş enerjisi ile elektrik üretim potansiyelinin incelenmesi için, 16 Haziran ve 23 Aralık günleri için solar radyasyon geometrisi hesaplanacaktır. Akabinde solar radyasyon geometrisi ile elektrik üretim potansiyeli hesaplanacaktır. Yerleşim bölgesi olarak Derince'nin güneye bakan az eğimli yamaçlara yayılmış olması ve yoğun konut alanları içermesi, güneş enerjisi ile elektrik üretimi için 147.518 nüfusa sahip Derince'yi cazip kılmaktadır. Birim metrekare alana düşen solar radyasyon miktarı ve akabinde elektrik enerjisi üretimi tablosu ile konut çatılarına yönelik pratik ve gerçek bir yaklaşım sunulmak istenmiştir. Derince ilçesinde çatı tipi güneş enerjisi ile elektrik üretimi potansiyeli konut alanları için 105.555.185 kWh'dir. Bu miktar 72.652.024 kWh olan toplam hanehalkı elektrik enerjisi ihtiyacının üzerindedir. Piyasada kullanılan ürünler göz önünde bulundurularak ortalama panel verimi için %21,7 ve ortalama inverter verimi için %98,4 değerleri tespit edilmiş ve bu değerler ile solar radyasyon geometrisi kullanılarak birim alandaki enerji potansiyeli bulunmuştur. Bir binanın elektrik tüketim miktarları üzerinden değerlendirme yapılarak yatırımın geri ödeme süresi yaklaşık 6 yıl olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: solar radyasyon, güneş enerjisi, elektrik üretimi, dağıtılmış elektrik üretimi

1.GİRİŞ

Güneş enerjisi hayatın başlangıcı ve devamlılığı için temel gereksinimlerden birisi olduğu gibi elektrik enerjisinin üretimi için bugüne olduğu gibi geleceğin de vazgeçilmez enerji kaynağı olacaktır. Elektrik enerjisi üretimi için güneş enerjisini alternatifsiz kılan çok fazla etmen mevcuttur. Dünyamızın hidrokarbon temelli enerji üretiminden kurtulmasının en temiz, en yaygın ve en hızlı yolu güneş enerjisinden faydalanmaktır. Gelişen panel teknolojisi ile daha verimli çözümler sağlanması mümkün hale gelecektir. Güneş enerjisinin muhtelif ölçeklerde uygulama esnekliği, sürdürülebilir şehirlerin inşasında çok önemli bir yer tutacaktır. Elektrikli araç teknolojilerinden elde edilecek fayda ancak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik oranının yükseltilmesi ile mümkündür. Zira termik santral teknolojisi ile üretilen elektrik ile kullanılan elektrikli araçların çevre temizliğine nitelikli bir katkısı olmayacaktır.

Elektrik tüketimi gelişen teknoloji ile birlikte artmaktadır ve artmaya devam edecektir. Bu artış sadece sanayi alanında değil yaşam alanlarında da gelişen teknoloji ile birlikte artmaktadır. Özellikle elektrikli araçların kullanım oranlarının artması ile birlikte ciddi bir tüketim artışı yaşanacaktır. Bu artış elektrik altyapısı ve elektrik üretim ihtiyacı için alışılmışın üstünde bir ihtiyaç doğuracaktır. Bu ihtiyacın giderilmesi için elektrik enerjisinin tüketim noktasında üretilmesi özellikle iletim ve dağıtım altyapısı açısından yatırım gereksinimlerini azaltacaktır. Güneş enerjisi santralleri konut bölgelerinde kurulmaya uygun olması sebebiyle bu gereksinimi gidermek için en önemli alternatiftir.

2.SOLAR RADYASYON GEOMETRİSİNİN İNCELENMESİ

2.1. Eğim Açısı

Dünya ekvatorunu içeren yüzey, ekvatorial yüzey olarak anılır. Eğim açısı (δ), güneş ve dünya merkezlerini birleştiren ekvatorial çizginin yüzey ile yaptığı açıdır. [4]

$$\delta = 23,45 \times \sin[(360 \times (284 + n))/365] \quad (1)$$

16 Haziran için $n=167$ olmak üzere δ değeri 23,1;

23 Aralık için $n=357$ olmak üzere δ değeri -23,43 olarak bulunur.

2.2. Saat Açısı

Saat açısı ω , güneş saatinin bir çeşit açısal ölçümüdür ve her saat için 15° 'ye denk gelir. Açı sabahları negatif, öğleden sonra pozitifdir. [4]

$$\omega = 15 \times (12 - t_s) \quad (2)$$

2.3. Güneş Açıları

$$\cos\theta = \sin\delta \times \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \times \cos(\phi - \beta) \times \cos\omega \quad (3)$$

Optimum eğim açısı, kuzey yarım kürede kışın, enlem $+15^\circ$, yaz mevsiminde ise enlem -15° olarak alınır. Panellerin yaz ve kış mevsimleri için, açısı ayarlanabilir bir şekilde yerleştirilmeleri gerekir. Bununla birlikte eğimi değişken bir panel konstrüksiyonu üretimi pratik ve yaygın olmadığı için panel eğimi ayarlanabilir değil sabit açılı $\beta=15^\circ$ kabul edilecektir. Azimut açısı ise panellerin tam güneşe bakacak şekilde yerleştirilecekleri kabul edilerek $\gamma=0^\circ$ olacaktır. [4]

2.4. Gündoğumu ve Günbatımı

Gündoğumu açısı ve Günbatımı açısı,

$$\omega_{sr} = \cos^{-1} (-\tan\phi \times \tan\delta) \quad (4)$$

Gün ışığı saatleri,

$$S = (2/15) \times \cos^{-1} (-\tan\phi \times \tan\delta) \quad (5)$$

Gündoğumu saati,

$$t_{sr} = 12 - [(\cos^{-1} (-\tan\phi \times \tan\delta))/15] \quad (6)$$

Günbatımı saati,

$$t_{ss} = [(\cos^{-1} (-\tan\phi \times \tan\delta))/15] - 12 \quad (7)$$

16 Haziran için gündoğumu saati denklem 6 ile 04:43 olarak,günbatımı saati denklem 7 ile 19.17 olarak, günüşığı saatleri denklem 6 ile 14,6 saat olarak hesaplanır. Gün doğumu açısı ise denklem 4 ile 109,5° olarak bulunur.

23 Aralık için gündoğumu saati denklem 6 ile 07:32 olarak,günbatımı saati denklem 7 ile 16:35 olarak, günüşığı saatleri denklem 5 ile 9,05 saat olarak hesaplanır. Gün doğumu açısı ise denklem 4 ile 67,9° olarak bulunur. [4]

2.5. Yatay Eksende Dünya Dışı Radyasyon

Dünya atmosferinin dışındaki yatay bir yüzeye düşen olası radyasyon miktarını teorik olarak hesaplamak önemlidir. $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ 'dir. [4]

$$I_0 = I_{sc} \times [1 + 0,033 \times \cos((360 \times n) / 365)] \times (\cos\phi \times \cos\delta \times \cos\omega + \sin\phi \times \sin\delta) \quad (8)$$

16 Haziran tarihi için, 05:00-19:00 saatleri arası saat başı olmak üzere radyasyon miktarı denklem 6.8'den hesaplanacaktır. Hesaplamalar Tablo 1'dedir.

23 Aralık tarihi için, 08:00-16:00 saatleri arası saat başı olmak üzere radyasyon miktarı denklem 8'den hesaplanacaktır. Hesaplamalar Tablo 2'dedir.

Tablo 1: 16 Haziran Solar Radyasyon Miktarları

Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m2)
06:00	339,8
07:00	578,2
08:00	800
09:00	990,6
10:00	1136,9
11:00	1228,9
12:00	1260,3
13:00	1228,9
14:00	1136,9
15:00	990,6
16:00	800
17:00	578,2
18:00	339,8

Tablo 2: 23 Aralık Solar Radyasyon Miktarları

Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m2)
08:00	121,3
09:00	323,8
10:00	479,3
11:00	577,13
12:00	610,4
13:00	577,13
14:00	479,3
15:00	323,8
16:00	121,3

2.6. Eğimli Bir Yüzeyde Solar Radyasyon

Eğimli bir yüzeyde solar radyasyonun hesaplanması için öncelikle Dünya dışı yatay eksen solar radyasyon hesaplarını kullanarak global yatay eksen solar radyasyon hesaplamaları yapılmalıdır. Akabinde eğimli yüzeydeki solar radyasyon hesabı yapılabilir.

Güneş enerjisi uygulamalarında aylık ortalama ve günlük global solar radyasyonun hesaplanması önemlidir. Solar radyasyon kullanılarak saatlik eğimli yüzey solar sistem hesapları yapılabilir. Aylık ortalama açık gün süresi, gün uzunluğu, Angstrom denklemleri, ve regresyon sabitleri ile hava açıklık katsayısı K_T hesaplanabilir. Denklem 9'da görüleceği üzere K_T sabiti aynı zamanda Global yatay eksen solar radyasyon değeri ve Dünya dışı yatay eksen solar radyasyon değerinin oranına eşittir. Denklem 10'da ise Akınoğlu ve Ecevit'in önerdiği model görülecektir. [2]

$$K_T = I_G/I_0 = a_0 + a_1 \times (S_0/S) + a_2 \times (S_0/S)^2 \quad (9)$$

$$K_T = I_G/I_0 = 0,145 + 0,845 \times (S_0/S) - 0,280 \times (S_0/S)^2 \quad (10)$$

Haziran ve Aralık tarihleri için Kocaeli ilinin aylık ortalama açık gün süresi 8,54 ve 2,27 saat olarak alınacaktır. [39] S gün uzunluğu süresi 16 Haziran ve 23 Aralık tarihleri için 14,6 ve 9,05 saat bulunmuştur. Denklem 10'dan K_T , 16 Haziran için 0,54 23 Aralık için 0,34 olarak bulunur. Dağılmış solar radyasyon için denklem 11'den yararlanılacaktır. [1]

$$I_D = I_G \times (1 - 1,13 \times K_T) \quad (11)$$

Eğimli bir yüzeyde solar radyasyonun hesaplanması için, ışıınım radyasyonu, çevreden yansıyan radyasyon ve gökyüzünde yayılan radyasyonun toplamının denklem 12'deki gibi hesaplanması gerekir. [4]

$$I_E = I_{EI} + I_{EY} + I_{ED} \quad (12)$$

İşınım radyasyonu I_{EI} , İşınım radyasyonun R_I işınım katsayısı ile çarpımıyla denklem 15'deki gibi bulunur. İşınım radyasyonu denklem 13'deki gibi bulunur. Dünya dışı yatay radyasyonun denklem 14'deki R_I işınım katsayısı eğimli yüzeye gelen radyasyonun, yatay eksenindeki radyasyona oranı ile bulunur. [1] Eğim açısı 15° kabul edilecektir.

$$I_I = I_G - I_D \quad (13)$$

$$R_I = [\cos\theta / \cos\theta_z] = [(\sin\delta \times \sin(\phi - \beta) + \cos\delta \times \cos(\phi - \beta)) / (\sin\delta \times \sin\phi + \cos\delta \times \cos\phi \times \cos\omega)] \quad (14)$$

$$I_{EI} = R_I \times I_I \quad (15)$$

Eğimli yüzeyde solar radyasyon değerini elde etmek için yansıyan radyasyon için denklem 16'daki işlemler yapılır. [4] Yüzey yansıtma katsayısı kırmızı kiremit için kabul edilen değer olan $\rho=0,33$ kabul edilecektir. [1]

$$I_{ED} = I_D \times (1 + \cos\beta) / 2 \quad (16)$$

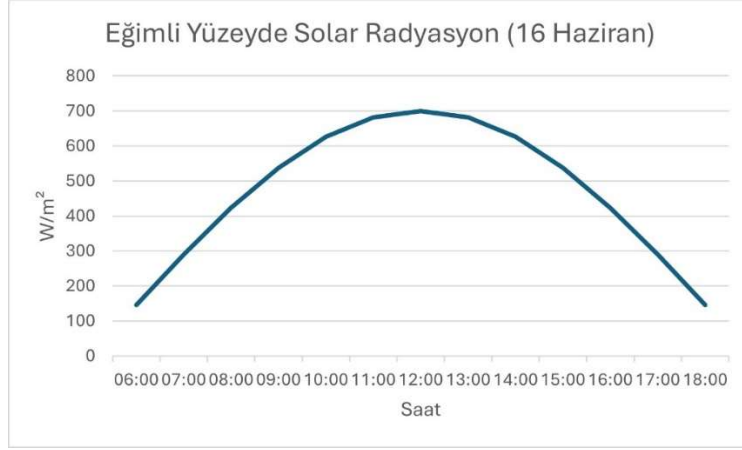
Eğimli yüzeyde havaya dağılmış solar radyasyonun hesaplanması için Liu ve Jordan modeli kullanılacaktır. Buna göre havaya dağılmış solar radyasyon denklem 17'deki gibi bulunur. [5]

$$I_{EY} = I_G \times \rho \times (1 - \cos\beta) / 2 \quad (17)$$

15° eğimli yüzeyde solar radyasyon 16 Haziran ve 23 Aralık tarihleri için tablo 3 ve tablo 4'deki gibi bulunur.

Tablo 3: 16 Haziran 15° Eğimli Yüzeyde Solar Radyasyon Miktarları

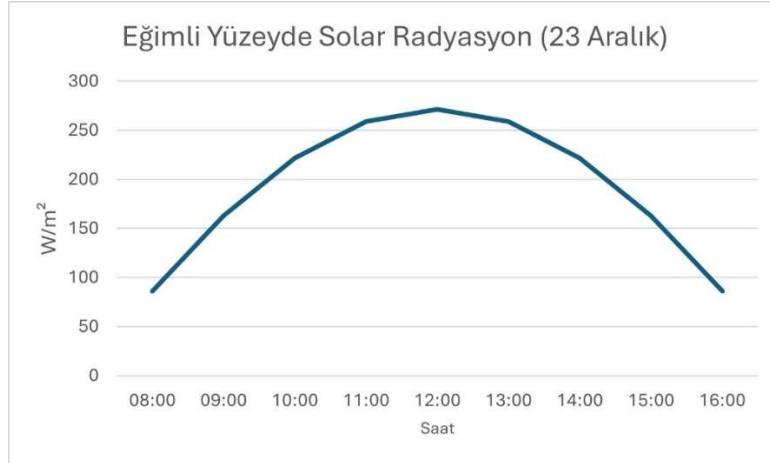
Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m ²)
06:00	145,9
07:00	289,4
08:00	423,1
09:00	537,8
10:00	625,9
11:00	681,3
12:00	700,2
13:00	681,3
14:00	625,9
15:00	537,8
16:00	423,1
17:00	289,4
18:00	145,9



Şekil 1: Derince İlçesi 15° Derece Eğimli Yüzeyde Solar Radyasyon (16 Haziran)

Tablo 4: 23 Aralık 15° Eğimli Yüzeyde Solar Radyasyon Miktarları

Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m2)
08:00	86
09:00	162,8
10:00	221,8
11:00	258,9
12:00	271,5
13:00	258,9
14:00	221,8
15:00	162,8
16:00	86



Şekil 2: Derince İlçesi 15° Derece Eğimli Yüzeyde Solar Radyasyon (23 Aralık)

3. PANEL SEÇİMİ VE SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ

Güneş enerji panellerinden elde edilecek enerjinin hesaplanması için panele ulaşan solar radyasyon değerine ek olarak, panel ve inverter verimi değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Güneş enerjisi paneli verimi için üç farklı

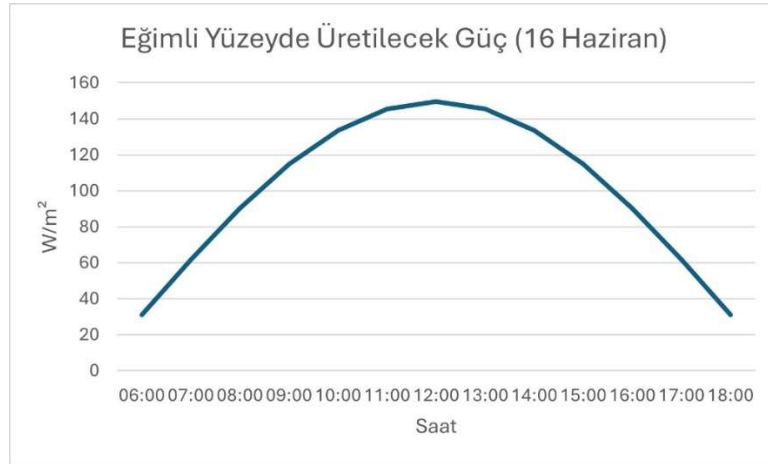
marka ürünün verimliliklerinin aritmetik ortalaması kullanılacaktır. Alfasolar markası için A16S144T, Sunpower markası için SP-550 ve LG markası için LG365Q1C-A5 modelleri değerlendirilecektir. Panel verimlilikleri sırası ile, %22,71, %21,28, %21,1'dir. [6] [7] [8] Ortalama verim ise %21,7 olarak bulunur.

Solar inverter için Huawei markası için SUN2000-150K-MG0, Growatt markası için Growatt MAX 100 KTL3 LV modelleri değerlendirilecektir. Her iki modelin verimliliği de %98,4'tür. [9] [10]

Tablo 3 ve 4'de hesaplanan eğimli yüzeydeki solar radyasyon değerleri ve panel-inverter verimlilik değerleri kullanılarak m²'de güneş panelinden alınacak verim 16 Haziran ve 23 Aralık tarihleri için tablo 4 ve 6'daki hesaplanır ve tablo 3 ve tablo 4'deki grafikler elde edilir.

Tablo 5: 16 Haziran 15° Eğimli Yüzeyde Üretilmesi Hesaplanan Solar Güç

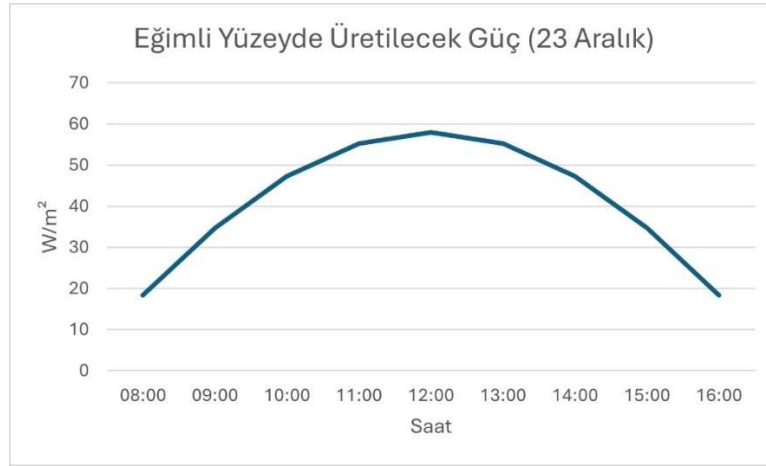
Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m ²)
06:00	31,1
07:00	61,8
08:00	90,3
09:00	114,8
10:00	133,6
11:00	145,5
12:00	149,5
13:00	145,5
14:00	133,6
15:00	114,8
16:00	90,3
17:00	61,8
18:00	31,1



Şekil 3: Derince İlçesi 15° Derece Eğimli Yüzeyde Üretilmesi Hesaplanan Güç (16 Haziran)

Tablo 6: 23 Aralık 15° Eğimli Yüzeyde Üretilmesi Hesaplanan Solar Güç

Saat Dilimi	Radyasyon Miktarı (W/m ²)
08:00	18,4
09:00	34,8
10:00	47,4
11:00	55,3
12:00	58
13:00	55,3
14:00	47,4
15:00	34,8
16:00	18,4



Şekil 4: Derince İlçesi 15° Derece Eğimli Yüzeyde Üretilmesi Hesaplanan Güç (23 Aralık)

4.SONUÇLAR

Birim yüzeye düşene solar radyasyon miktarı ve üretilecek güç miktarı yılın en uzun ve en kısa günü çevresinde hesaplanmıştır. Aynı hesaplar yılın diğer ayları için de yapılarak daha hassas bir öngörde bulunulabilir. Derince ilçesinde bir gün içinde güneş panelinden elde edilecek enerji potansiyelinin en yüksek olduğu ve en düşük olduğu günler arasından seçilerek ilçenin güneş enerjisi potansiyeli sunulmuştur. Derince ilçesi Kocaeli Yarımadasının güneyinde konumlanmış olan Çenedağ'ın güney yamaçlarında dağ eteğinin bitimine kurulmuş olup konut alanları deniz seviyesine dek eğimli şekilde yayılmıştır. Derince ilçesi merkezinde bulunan bir konum özelinde yapılmış hesaplar, İzmit Körfezi'nin kuzeyinde konumlanmış olan, coğrafi ve topoğrafya açısından birbirinin devamı ve benzeri olan Derince'nin doğusunda bulunan İzmit ve batısında bulunan Körfez ilçelerinin şehir merkezleri için de anlamlı olduğu ortadadır. Kocaeli ilinin Türkiye ekonomisindeki ağırlığı ve Derince ilçesine yakın yoğunlaşmış sanayi ve ticari tesislerin yoğunluğu düşünüldüğünde çatı üstü yenilenebilir enerji yatırımlarının faydalı olacağı görülecektir. 16 Haziran tarihinde günlük 1304 Wh/m² enerji üretimi, 23 Aralık tarihinde ise 369 Wh/m² enerji üretimi gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Üretilcek enerji potansiyeli yıllık 305,3 kWh/m² olarak bulunacaktır. TÜİK verilerine göre Kocaeli ili nüfusu 2.130.006'dır. Derince'nin nüfusu ise 147.518'dir.[11] Yine TÜİK verilerine göre Kocaeli ilinin ortalama hane halkı sayısı 3.2'dir.[12] Derince'de bulunan hane sayısını 46.099

olarak bulabiliriz. Ortalama brüt daire alanını 100 m² ve ortalama bina yüksekliğini 4 kat olarak kabul edecek olursak hane başına düşen çatı alanını 25 m² kabul edebiliriz. Bu çatı alanının da sadece %30'unun verimli solar panel uygulaması için değerlendirebileceğimizi kabul ederek Derince'de toplam konut çatı alanı miktarını 345.742,5 m² ve toplam enerji üretim miktarını da 105.555.185 kWh olarak buluruz. Mesken başına elektrik tüketimi 1.576 kWh olmak üzere Derince ilçesini meskenler için beklenen yıllık elektrik tüketimi 72.652.024 kWh olarak bulunur.[13] Bu miktar konut tüketiminin %45'inden daha fazlasının üretilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. 12 dairelik bir site için 36 adet Alfa Solar 550 W panel ve Growatt MID 20KTL3-X (20 kW, on-grid) ile bir bina için kurulacak küçük solar elektrik üretim tesisinin maliyeti 2025 Ekim ayı itibarı ile 400.000 TL'dir. 36 adet 550 W panelin alanı 93,6 m²'dir. Bu alanda üreteceğimiz enerji miktarı 28.576,08 kWh'dir. Elektriğin birim fiyatı mesken için 2,33 TL'dir.[14] Yıllık enerji üretimi bedeli 66582,27 TL olup, geri ödeme süresi 6 yıldır. Tüketim alanına dağıtılmış enerji üretimi ile enerji bedeli açısından tasarruf yapılmakla birlikte, altyapı yatırımı gereksinimleri de azalacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Adel A.E. ve Salah I.H.A.** (2016). "Optimum Photovoltaic Solar Cells Area Estimation for Feeding Micro-Grid", International Journal of Engineering Research and Technology". ISSN 0974-3154, Cilt 12, Sayı 11 ,1978-1985
- [2] **Akınoğlu B.G. ve Ecevit A.** (1990). "A further comparison and discussion of sunshine based models to estimate global solar radiation". Energy, Cilt 15, Sayı 10, 865-872
- [3] **Arslanoğlu N.** (2016). "Kocaeli için mevcut global güneş ışıınımı tahmin modellerinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 21, Sayı 1, 217-226
- [4] **İbrahim D.** (2006). *Güneş Enerjisi Uygulamaları*. Bileşim Yayınları.
- [5] **Shukla K.N., Saroj R. Ve Sudhakar K.** (2015). "Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India", Energy Reports 1,96–103
- [6] **Url-1** < <https://www.alfasolarenerji.com/urunler/a16s144t-144-hucureli-topcon-paneller/> >, erişim tarihi 17.10.2025.
- [7] **Url-2** < <https://www.sunpowerturkey.com/sunpower-rijit-gunes-panelleri/> >, erişim tarihi 17.10.2025.
- [8] **Url-3** < <https://www.lg.com/us/business/solar-panels/lg-LG365Q1C-A52> >, erişim tarihi 17.10.2025.
- [9] **Url-4** < <https://solar.huawei.com/tr/professionals/all-products/SUN2000-150K-MG0/specs> >, erişim tarihi 17.10.2025.

- [10] **Url-5** < <https://growatt.tech/product/growatt-max-100ktl3-x-lv-3-phase-industrial-inverter/> >, erişim tarihi 17.10.2025.
- [11] **Url-6**<<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2024-53783>>, erişim tarihi 17.10.2025.
- [12] **Url-7** < <http://kw.kocaeli.bel.tr:8080/knowledge/public/servlet/Adapter>>, erişim tarihi 17.10.2025.
- [13] **Url-8** < <https://www.enerjiatlas.com/elektrik-tuketimi/#>>, erişim tarihi 17.10.2025.
- [14] **Url-9** <<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>>, erişim tarihi 17.10.2025.

ESNEK ENERJİ DEPOLAMA VE DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Flexible Energy Storage and Conversion Systems

Muammer Akgün¹
Dr. Barbaros Batur²
Dr. M. Cem Çelik³

ÖZET

Esnek enerji depolama, enerji arz ve talebi arasındaki dengesizlikleri düzeltmek ve enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için kullanılan bir enerji depolama yöntemidir. Esnek enerji depolama sistemi, fazla enerjiyi depolayarak ihtiyaç olan dönemlerde enerji tüketimini karşılamaya yardımcı olmaktadır. Enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda enerji depolama sisteminde birikmiş enerji serbest bırakılarak açığın karşılanması mümkün olur. Esnek enerji depolama sistemleri, enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması durumunda dalgalanma ve enerji talebinin değişkenliği gibi durumlarda büyük önem taşımaktadır.

Esnek enerji depolama sistemleri farklı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Aküler ve bataryalarla enerji depolamak için sıkça kullanılan yöntemlerdir. Bunun yanı sıra, hidroelektrik pompalı depolama, hidrojen depolama, süperkapasitörler, termal enerji depolama gibi diğer depolama teknolojileri de kullanılmaktadır.

Esnek enerji depolama sistemi, enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanılmasını sağlarken enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengesizlikleri dengeler, böylece enerji kesintilerini azaltır ve enerji güvenliğini artırır. Bu da, yenilenebilir enerji kaynaklarının depolama sistemlerine entegrasyonunu sağlar ve enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur.

Bu çalışmada, yeni batarya teknolojileri, yenilikçi depolama yöntemleri, enerji depolama verimliliğinin artırılması, akıllı şebekelerle entegrasyon ve bu süreçte maliyet düşürme çalışmaları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Esnek Enerji Depolama Sistemleri, Enerji Depolama Teknolojileri, Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ABSTRACT

Flexible energy storage is an energy storage method used to correct imbalances between energy supply and demand and to ensure efficient use of energy resources. Flexible energy storage system helps to meet energy consumption in periods of need by storing excess energy. When the energy demand is high, it is possible to meet the deficit by releasing the energy accumulated in the energy storage system. Flexible energy storage systems are of great importance in cases such as fluctuations and variability of energy demand in case the energy need is met from renewable energy sources.

Flexible energy storage systems can be realised using different technologies. Batteries and batteries are frequently used methods for storing energy. In addition, other storage technologies such as hydroelectric pumped storage, hydrogen storage, supercapacitors, thermal energy storage are also used.

The flexible energy storage system enables more effective and efficient utilization of energy resources and balances the imbalances between energy production and consumption, thus reducing energy interruptions and increasing energy security. This enables the integration of renewable energy sources into storage systems and contributes to the sustainability of energy systems.

In this study, new battery technologies, innovative storage methods, increasing energy storage efficiency, integration with smart grids and cost reduction studies in this process are examined.

Keywords: Flexible Energy Storage Systems, Energy Storage Technologies, Renewable Energy Resources

1. GİRİŞ

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı, enerjiye bağımlılığımızı artırırken, enerjinin depolanmasının gerekliliğini de daha belirgin hale getirmiştir. Günümüzde enerji depolama ihtiyacı büyük ölçüde elektrik enerjisine odaklanmaktadır. Elektrik enerjisi, genellikle en düşük maliyetle kolayca erişilebilen ve uzun süredir ortak tüketim malı olarak kabul edilen bir ticari üründür. Elektrik üretildiği anda tüketilmektedir ve bilgi çağında, elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç her zamankinden daha fazladır. Bu nedenle, üretim arz-talep dengesi dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Arz-talep dengesindeki büyük farkın depolama teknolojisiyle kapatılması amaçlanmaktadır. Enerji depolama sistemleri, arz-talep dengesizliği nedeniyle giderek daha zorunlu hale gelmiştir. Ancak, enerji depolamak zor ve maliyetli ekipmanlar gerektirir. Depolanan enerji tamamen tükenmeden önce yeniden yerine konmalıdır. Bu tükenmenin önüne geçmek için olasılıklar dikkatlice hesaplanmalı ve kesinti süreleri, talepteki ani artış ve azalışlar göz önünde bulundurularak uygun sistemler tasarlanmalıdır. Böylece, kesinti yaşanmadan faaliyetlere devam edilebilir. Ayrıca, enerji depolama sistemlerinin artması, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesini daha fazla desteklemesine olanak tanır. [1,2].

Elektrik enerjisi, kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekanik ve termal sistemler gibi çeşitli yöntemlerle depolanabilir. Bu yöntemler arasında özellikle mekanik pompalı ve hidro depolama sistemleri ile termal enerji depolama sistemleri öne çıkmakta ve yoğun araştırmalar sonucu kolayca uygulanabileceği düşünülmektedir [3]. Bu çalışma, temel enerji depolama sistemlerinin araştırılmasını ve gelişen teknolojiye bağlı olarak bu sistemlerdeki yenilikçi yaklaşımların incelenmesini amaçlamaktadır. Özellikle sistemler arasında karşılaştırmalı analizler yapılarak, avantaj ve dezavantajların belirlenmesi ve bu alanda yapılacak çalışmalara öncülük edilmesi hedeflenmiştir.

Enerji depolama konusundaki bu kapsamlı açıklama, enerjinin keşfinden günümüze kadar olan gelişmeleri, enerji depolama sistemlerinin önemini ve gelecekteki kritik rolünü detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bu alandaki yenilikçi yaklaşımların incelenmesi ve avantaj/dezavantajların karşılaştırmalı analizlerle ortaya konulması, gelecekteki çalışmalar için sağlam bir temel oluşturur. Enerji depolama teknolojileri, yalnızca enerji arzını dengelemekle kalmayıp, aynı zamanda enerji üretimindeki dalgalanmaları dengeleyebilme potansiyeline sahiptir. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle güneş ve rüzgar enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar. Değişken enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmesi, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır. Ancak, enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması sürecinde maliyet, verimlilik, çevresel etkiler ve teknik uygunluk gibi zorluklarla karşılaşılabilir. Bu alanlardaki araştırmalar ve teknolojik ilerlemeler, enerji depolama sistemlerinin daha etkili ve sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlayacaktır [4].

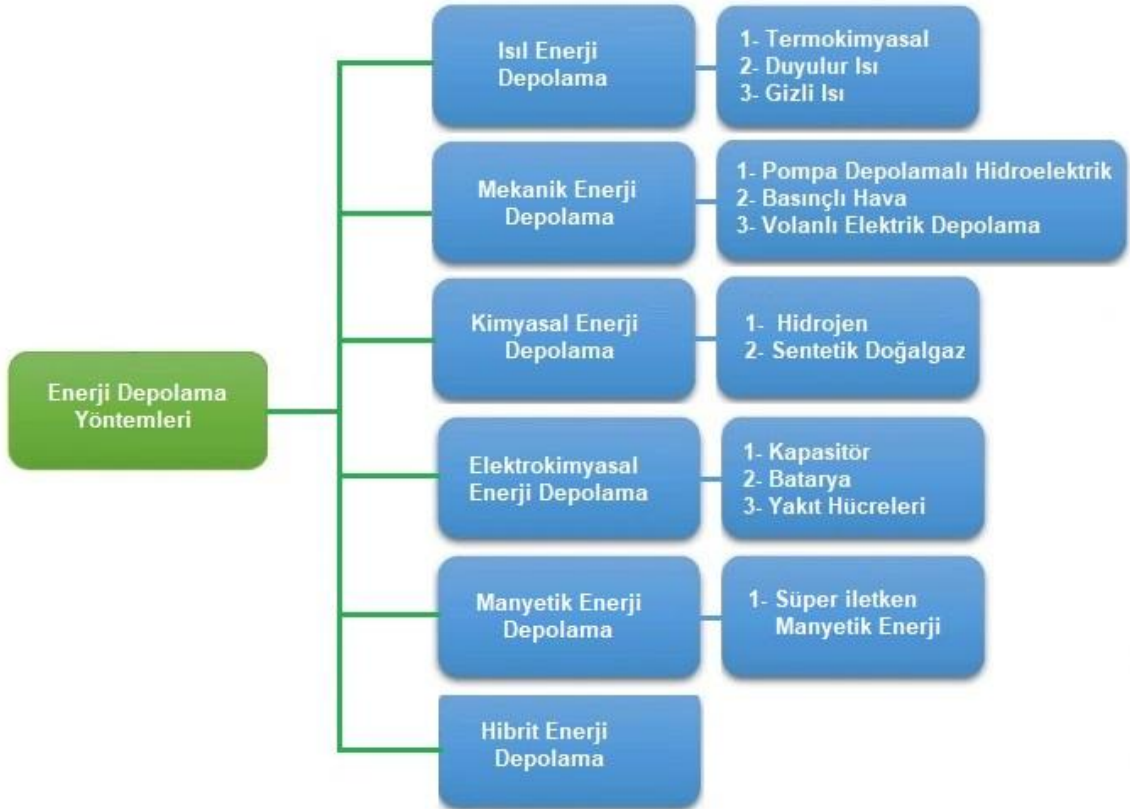
Sonuç olarak, enerji depolama sistemleri gelecekte enerji sektörünün önemli bir bileşeni olacak ve enerji yönetiminde büyük etkiler yaratacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını

sağlayarak enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini artıracak ve çevresel etkileri azaltacaktır. Bu alandaki araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, enerji depolama sistemlerinin daha da geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasıyla, enerji sektörünün geleceğini şekillendirecektir.

2. YÖNTEM

Enerji depolama teknikleri, çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilecek çok yönlü sistemlerdir ve dönüştürülen enerjinin biçimine göre geniş bir sınıflandırmaya tabi tutulur. Enerji depolama teknikleri, Şekil 1'de gösterildiği gibi kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekanik ve ısı depolama olarak farklı kategorilere ayrılabilir. Kimyasal depolama, enerjiyi kimyasal bileşenler aracılığıyla depolar. Elektrokimyasal depolama, kimyasal reaksiyonların elektrik enerjisine dönüştürülmesini içerir. Elektriksel depolama, enerjiyi elektrik alanları veya kapasitörler aracılığıyla depolar. Mekanik depolama, enerjiyi mekanik sistemlerde depolar ve genellikle kinetik enerjiyi potansiyel enerjiye dönüştürür. Isıl depolama ise enerjiyi sıcaklık farklılıkları aracılığıyla depolar

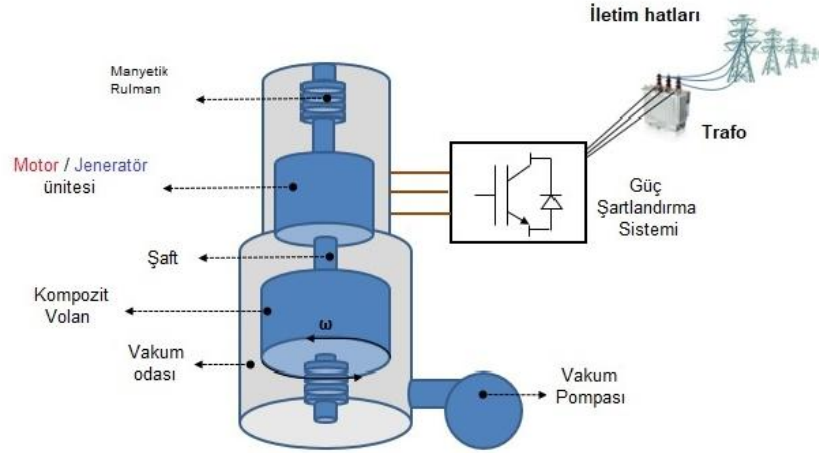
Her bir enerji depolama tekniği, belirli uygulama alanlarında avantajlara sahiptir. Örneğin, kimyasal depolama genellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve uzun süreli depolama için uygundur. Elektrokimyasal depolama, hızlı şarj-deşarj özellikleriyle dikkat çeker ve taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılır. Elektriksel depolama, yüksek verimlilikle çalışabilir ve güçlü enerji yönetimi sağlar. Mekanik depolama, fiziksel dayanıklılığa sahiptir ve çevresel etkilere karşı dirençlidir. Isıl depolama ise genellikle sıcaklık kontrolü gereken uygulamalarda tercih edilir. Bu beş ana enerji depolama tekniği, farklı enerji ihtiyaçları için çeşitli avantajlar sunar[5]. Bu nedenle, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak doğru depolama tekniğinin seçimi büyük önem taşır. Bu tekniklerin sürekli olarak geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, enerji depolama alanında daha verimli ve sürdürülebilir çözümler sağlayacaktır.



Şekil 1. Enerji depolama yöntemleri [2]

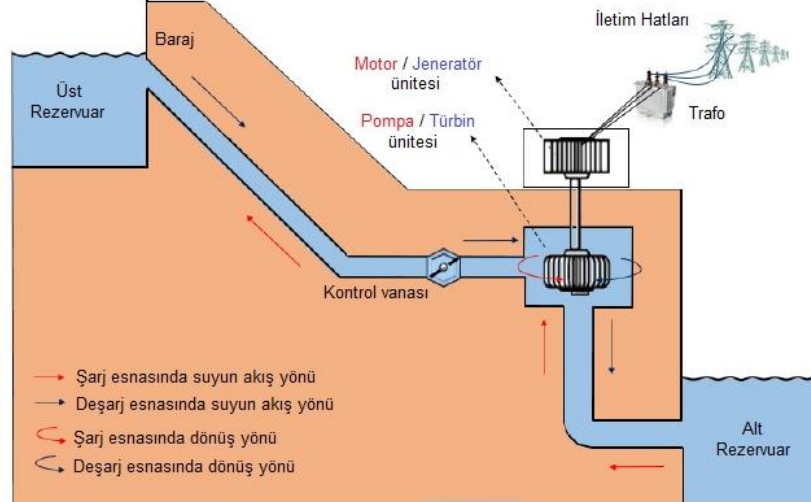
Şekil 2. Basınçlı Hava Enerjisi Depolama Sistemi Şematik Diyagramı[6]

- **Kinetik Enerji Depolama (Flywheel Energy Storage):** Enerji, bir döner kütle (genellikle bir volan) tarafından depolanır. Düşük talep dönemlerinde hızlanan kütle enerjiyi depolar ve yüksek talep dönemlerinde yavaşlayarak bu enerjiyi geri verir.



Şekil 3. Kinetik Enerji Depolama Sistemi Şematik Diyagramı[6]

- **Yerçekimi Enerji Depolama (Gravity Energy Storage):** Potansiyel enerjiyi kullanarak çalışır. Enerji, yüksek bir yere kaldırılan ağırlıklar veya suyun yükseltilmesiyle depolanır ve ihtiyaç duyulduğunda aşağı bırakılarak enerjiye dönüştürülür.
- **Basınçlı Sıvı Enerji Depolama (Hydraulic Accumulator):** Enerji, bir sıvının bir kap içinde sıkıştırılması veya genişletilmesi yoluyla depolanır. Bu sistemler hidroelektrik santrallerde enerji dengelemesi için kullanılabilir.



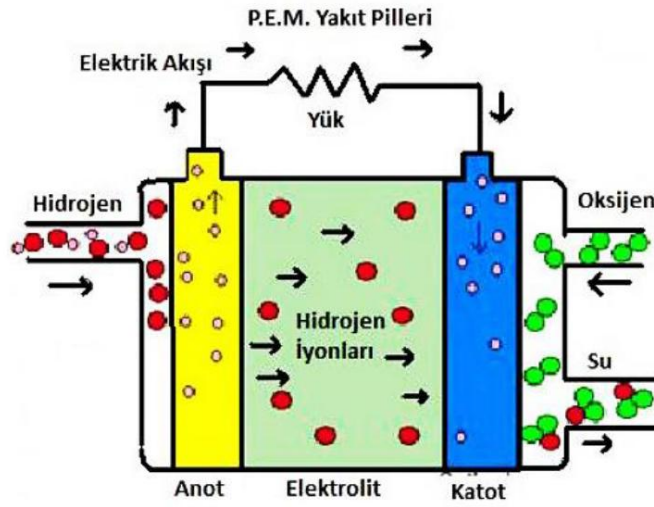
Şekil 4. Basınçlı Sıvı Enerji Depolama Şematik Diyagramı[6]

Bu mekanik enerji depolama teknikleri, belirli uygulama alanları için avantajlara sahip olabilirler [13]. Örneğin, CAES genellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde tercih edilirken, kinetik enerji depolama küçük ölçekli ve hızlı yanıt veren uygulamalarda kullanılabilir.

2.3. Kimyasal Enerji Depolama Teknolojileri

Kimyasal enerji depolama teknolojileri, enerjinin kimyasal reaksiyonlar yoluyla depolanıp istendiğinde serbest bırakılmasını sağlayan önemli bir enerji depolama yöntemlerinden biridir. Bu teknolojiler, temiz enerji üretiminden enerji ihtiyacının karşılanmasına kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [7]. Kimyasal enerji depolama, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı doğasını dengelemek ve enerji talebinin sürekli karşılanmasını sağlamak için kritik bir rol oynar. Bu teknolojiler, çeşitli kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla enerjiyi depolayarak gelecekteki enerji ihtiyaçları için güvenilir ve verimli bir çözüm sunar[8].

- **Hidrojen Depolama ve Yakıt Hücreleri (Hydrogen Storage and Fuel Cells):** Hidrojen, genellikle su elektrolizi ile üretilir ve depolanır. Ardından yakıt hücrelerinde oksijen ile reaksiyona girerek elektrik enerjisi üretilir [9]. Bu teknoloji temiz enerji üretiminde potansiyel olarak önemlidir çünkü yan ürün olarak sadece su üretilir.



Şekil 5- Hidrojen pil yapısı [6]

- **Lityum İyon Piller (Lithium-ion Batteries):** Lityum iyon piller, enerjiyi kimyasal olarak depolar ve serbest bırakır. Bu piller, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır. Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, taşınabilirlikleri ve hızlı şarj/deşarj kapasiteleri ile dikkat çeker.
- **Sodyum-Sülfür Piller (Sodium-Sulfur Batteries):** Sodyum-sülfür piller, yüksek sıcaklıklarda çalışan bir tür kimyasal depolama sistemidir. Bu piller, enerjiyi sodyum ve sülfür arasındaki kimyasal reaksiyonlarla depolar ve serbest bırakır. Bu teknoloji genellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde kullanılır.
- **Redoks Akümülatörler (Redox Flow Batteries):** Redoks akümülatörler, kimyasal reaksiyonların elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan bir tür akümülatördür. Bu sistemde, elektrotlar üzerinde redoks reaksiyonları gerçekleşir. Bu teknoloji, enerji depolama kapasitesini artırmak için farklı elektrot malzemeleri kullanarak geliştirilebilir.
- **Yenilenebilir Hidrokarbon Yakıtlar (Renewable Hydrocarbon Fuels):** Bu teknolojide, güneş veya rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak karbon dioksit ve su gibi hammaddeler kullanılarak hidrokarbon yakıtları üretilir. Bu yakıtlar daha sonra enerji ihtiyacının olduğu yerde yakılarak enerji üretimini sağlar.

Kimyasal enerji depolama teknolojileri, enerjiyi depolamanın ve taşımının etkili bir yolunu temsil eder. Bu sistemler, enerjiyi dönüştürerek, depolayarak ve serbest bırakarak gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir rol oynayabilir[9,10].

2.3.1. Hidrojen Depolama Teknikleri

Hidrojen depolama teknikleri, hidrojenin enerji depolama amacıyla farklı fiziksel ve kimyasal yöntemlerle muhafaza edilmesini sağlar. Bu teknikler, hidrojenin gaz, sıvı veya katı formda depolanmasını içerir. İşte bazı temel hidrojen depolama teknikleri:

- **Basınçlı Tüpler (Cylinder Storage):** Hidrojen gazı, yüksek basınçlı çelik veya kompozit tüplerde sıkıştırılarak depolanabilir. Bu yöntem, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Ancak, enerji yoğunluğu düşüktür ve büyük miktarlarda depolama için çok fazla alan gerektirir.
- **Sıvılaştırılmış Hidrojen (Liquid Hydrogen Storage):** Hidrojen, düşük sıcaklıklarda (-253°C) sıvı hale getirilerek depolanabilir. Bu şekilde depolama, hacim açısından daha verimlidir, ancak sıvılaştırma işlemi enerji yoğunluğu yüksek olduğundan enerji kaybına neden olabilir.
- **Hidrojen Emilim ve Emisyon (Hydrogen Absorption and Desorption):** Metal ve alaşım malzemeler hidrojeni emerek (absorbe ederek) depolayabilir ve istendiğinde geri verebilir (desorbe ederek). Bu malzemeler hidrojeni kristal yapılarına alarak depolar. Ancak, bu teknikler genellikle yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalışırlar.
- **Kimyasal Taşıyıcılar (Chemical Carriers):** Bu sistemde, hidrojen kimyasal bir taşıyıcı ile reaksiyona girer ve taşıyıcı madde hidrojeni depolar. Daha sonra, depolanan hidrojen geri elde edilebilir. Bu yaklaşım, hidrojenin daha güvenli ve taşınabilir kimyasal formda depolanmasını sağlar.
- **Karışık Metal Hidritler (Metal Hydrides):** Bu sistemde, hidrojen metallerin kristal yapısına emilir. Daha sonra, ısı uygulanarak hidrojen geri alınabilir. Bu yöntem, güvenli ve kompakt bir depolama sağlar, ancak metal hidritlerin ağırlığı ve hacmi sınırlamalar getirir.
- **Hidrojen Adsorpsiyonu (Hydrogen Adsorption):** Özel yüzey kaplamaları veya nano yapılar, hidrojeni adsorbe ederek depolayabilir. Bu yöntem, nano teknolojiye dayalı gelişmelerle geliştirilmektedir.

Her bir depolama tekniğinin avantajları ve dezavantajları vardır ve uygulama bağlamına göre tercih edilirler. Örneğin, taşıma ve mobil uygulamalar için farklı depolama yöntemleri tercih edilebilirken, endüstriyel tesislerde farklı teknikler kullanılabilir.

2.3.2. Sentetik Doğal Gaz (SNG) Depolama Teknikleri

Sentetik Doğal Gaz (SNG), doğal gazın yapay olarak üretilmiş bir formudur. SNG depolama teknikleri, bu sentetik doğal gazın saklanması ve kullanılabilirliğini sağlayan yöntemleri içerir. İşte bazı temel SNG depolama teknikleri:

- **Yüksek Basınçlı Depolama (High-Pressure Storage):** SNG, yüksek basınçlı tanklarda sıkıştırılarak depolanabilir. Bu yöntem, doğal gazın genellikle nasıl depolandığına benzer şekilde çalışır. Ancak, SNG'nin depolanması için özel ekipmanlar ve tanklar gerekebilir.
- **Sıvılaştırılmış SNG (Liquefied SNG - LSNG):** SNG düşük sıcaklıklarda sıvı hale getirilerek depolanabilir. Bu işlem, SNG'nin hacmini önemli ölçüde azaltır, bu da depolama için daha az alan gerektiği anlamına gelir. Ancak, sıvılaştırma işlemi enerji yoğun olduğundan, enerji kaybına neden olabilir.
- **Depolama Tüpleri (Storage Tubes):** SNG, özel kaplamalı tüplerde kimyasal olarak depolanabilir. Bu tüpler, SNG'yi içlerine emerek depolar. Daha sonra, tüpler ısıtılarak SNG geri verilebilir.
- **Jeolojik Depolama (Geological Storage):** SNG, yeraltı formasyonlarına enjekte edilerek depolanabilir. Bu yöntem, doğal gazın doğal rezervuarlarda depolanma şekline benzer. Ancak, SNG'nin depolanması için uygun jeolojik koşulların bulunması gerekir.
- **Yarı-Sıvı Depolama (Semi-Liquid Storage):** SNG, belirli koşullarda yarı-sıvı hale getirilerek depolanabilir. Bu yöntem, SNG'nin daha yoğun bir formda saklanması sağlar.
- **Kimyasal Bağlama (Chemical Binding):** SNG, kimyasal reaksiyonlarla belirli malzemelerle bağlanarak depolanabilir. Bu yöntem, SNG'nin belirli bir süre boyunca emilmesini sağlar.

Her bir depolama tekniğinin avantajları ve dezavantajları vardır ve uygulama bağlamına göre tercih edilirler [11]. Örneğin, taşıma ve mobil uygulamalar için farklı depolama yöntemleri tercih edilebilirken, endüstriyel tesislerde farklı teknikler kullanılabilir.

2.4. Elektriksel Enerji Depolama Teknikleri

Elektriksel enerji depolama teknikleri, elektrik enerjisinin geçici olarak saklanması ve ihtiyaç duyulduğunda geri alınmasını sağlayan yöntemlerdir. İşte bazı temel elektriksel enerji depolama teknikleri:

- **Piller (Batteries):** Piller, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek enerjiyi depolar. Farklı türde piller bulunmaktadır, örneğin lityum-iyon piller, kurşun-asit piller, sodyum-sülfür piller vb.
- **Yükseltgen-İndirgen Aküler (Redox Flow Batteries):** Bu tür piller, elektrolitler aracılığıyla enerjiyi depolar. Elektrolitlerin reaksiyonları sonucu enerji üretilir. Bu piller, depolama kapasitesini artırma avantajına sahip olabilir.
- **Yarı İletken Depolama Sistemleri (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES):** Bu sistemler, süper iletkenlik özelliğine sahip malzemeler kullanarak manyetik enerjiyi depolar. Bu yöntem hızlı enerji geri dönüşü sağlar.
- **Yükseltgen İndirgen Akümülatörler (Rechargeable Capacitors):** Kapasitörler, elektrik yükünü depolayarak enerjiyi saklar. Rechargeable kapasitörler, depolama kapasitelerini artırmak için yeniden şarj edilebilir özelliktedir.
- **Yükseltgen İndirgen Süperkapasitörler (Supercapacitors):** Süperkapasitörler, yüksek yükleme ve boşaltma hızlarına sahip kapasitörlerdir. Kısa süreli enerji depolama için idealdirler.
- **Yüksek Sıcaklıkta Süperiletken Manyetik Enerji Depolama (High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage - HTS SMES):** Yüksek sıcaklıkta süperiletkenler kullanarak manyetik enerjiyi depolar. Daha yüksek depolama kapasitelerine olanak tanır.
- **Elektrokimyasal Kapasitörler (Electrochemical Capacitors):** Bu kapasitörler, yüksek yükleme ve boşaltma hızlarına sahip olup enerjiyi kimyasal reaksiyonlarla depolar.

Bu teknikler arasında seçim, uygulamanın özelliklerine, enerji ihtiyacına, depolama süresine ve maliyet faktörlerine bağlı olarak yapılır [3]. Her bir teknik, farklı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir ve belirli uygulamalar için daha uygundur.

2.5. Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama teknikleri, kimyasal reaksiyonların elektrik enerjisine dönüştürülmesi veya tersine, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye depolanması prensibiyle çalışan yöntemlerdir. İşte bu tekniklerden bazıları:

- **Yükseltgen-İndirgen Aküler (Redox Flow Batteries):** Bu sistemler, elektrotlar arasında bulunan sıvı elektrolit çözeltilerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar yoluyla enerjiyi depolar. Bu reaksiyonlar, elektrotların üzerinden akım geçirirken oluşur.
- **Lityum-İyon Piller (Lithium-Ion Batteries):** Lityum-iyon piller, lityum iyonlarının bir elektrot üzerinden diğerine geçişiyle çalışır. Bu geçiş, elektrik yükünün oluşturulmasını sağlar. Mobil cihazlardan elektrikli araçlara kadar birçok uygulamada kullanılır.
- **Kurşun-Asit Aküler (Lead-Acid Batteries):** Kurşun-asit aküler, sülfürik asit elektrolit çözeltisi ile kurşun ve kurşun dioksit elektrotları arasındaki kimyasal reaksiyonlardan elektrik üretir. Bu tip bataryalar genellikle otomotiv uygulamalarında kullanılır.
- **Nikel-Kadmiyum Aküler (Nickel-Cadmium Batteries):** Nikel-kadmiyum aküler, nikel oksit-hidroksit ve kadmiyum elektrotları arasındaki kimyasal reaksiyonlardan elektrik enerjisi üretir.
- **Yarı İletken Depolama Sistemleri (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES):** Bu sistemler, süper iletken malzemeler kullanarak manyetik enerjiyi depolar. Süper iletkenlik özelliği sayesinde enerjiyi çok uzun süre muhafaza edebilirler.
- **Lityum Hava Pilleri (Lithium-Air Batteries):** Bu piller, çevredeki havadaki oksijeni kullanarak çalışır. Lityum hava pilleri, yüksek enerji yoğunluğu ile dikkat çeker.
- **Sodyum-Sülfür Aküler (Sodium-Sulfur Batteries):** Bu piller sodyum ve sülfür elektrotları arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla enerji depolar.

Bu teknikler, farklı uygulama alanlarına göre tercih edilir ve belirli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir [2] [4]. Örneğin, lityum-iyon piller taşınabilir cihazlarda yaygın olarak kullanılırken, redoks aküler enerji depolama sistemlerinde tercih edilebilir.

2.5.1. Çalışma Prensibine Göre Piller

Çalışma prensiplerine göre piller farklı kategorilere ayrılabilir. İşte bazı temel piller ve çalışma prensipleri:

- **Kimyasal Piller (Chemical Batteries):** Kimyasal piller, kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen elektrik akımını kullanarak enerji depolar. Örneğin, kurşun-asit aküler, lityum-iyon piller, nikel-kadmiyum aküler gibi yaygın kullanılan pil tipleri bu kategoriye dahildir.
- **Fotovoltaik Hücreler (Solar Cells):** Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Güneş ışığı hücredeki yarı iletken malzemelerin yüzeyinde fotoelektrik etki oluşturarak elektrik akımı üretir.
- **Elektrokimyasal Piller (Electrochemical Batteries):** Bu piller, kimyasal reaksiyonların elektrik enerjisine dönüştürülmesi veya tersine, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye depolanması prensibiyle çalışır. Örneğin, lityum-iyon piller bu kategoriye dahildir.
- **Yarı İletken Depolama Sistemleri (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES):** Bu sistemler, süper iletken malzemeler kullanarak manyetik enerjiyi depolar. Süper iletkenlik özelliği sayesinde enerjiyi çok uzun süre muhafaza edebilirler.
- **Yükseltgen-İndirgen Aküler (Redox Flow Batteries):** Bu sistemler, elektrotlar arasında bulunan sıvı elektrolit çözeltilerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar yoluyla enerjiyi depolar. Bu reaksiyonlar, elektrotların üzerinden akım geçirirken oluşur.
- **Elektromanyetik Radyoizotop Piller (Radioisotope Thermoelectric Generators - RTG):** Bu piller, radyoaktif bir izotopun yaydığı ısıyı elektriğe dönüştürerek çalışır. Uzun süreli çalışmalarında sıklıkla kullanılır.

Bu piller farklı çalışma prensiplerine dayanarak enerji depolar ve çeşitli alanlarda kullanılır. Örneğin, kimyasal piller taşınabilir cihazlarda yaygın olarak kullanılırken, fotovoltaik hücreler güneş enerjisini elektriğe dönüştürerek kullanılır.

2.5.2. Kullanılan Kimyasalın Çeşidine Göre Piller

Kullanılan kimyasalın çeşidine göre piller, farklı kimyasal reaksiyonlarla çalışan ve enerji depolayan çeşitli kategorilere ayrılır. İşte yaygın olarak bilinen bazı piller ve kullandıkları kimyasal türleri:

- **Kurşun-Asit Aküler (Lead-Acid Batteries):** Elektrotlarda kurşun dioksit (PbO_2) ve sulu sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi kullanılır. Bu piller, otomobil aküleri gibi yaygın olarak kullanılır.
- **Lityum-İyon Piller (Lithium-Ion Batteries):** Lityum bileşenleri, elektrotlarda kullanılır. Mobil cihazlar, dizüstü bilgisayarlar ve elektrikli araçlarda sıkça kullanılır.
- **Nikel-Kadmiyum Aküler (Nickel-Cadmium Batteries):** Nikel ve kadmiyum bileşenleri kullanılır. Taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmış, ancak çevre dostu olmadığı için lityum-iyon pillerle yer değiştirmiştir.
- **Nikel-Metal Hidrit Aküler (Nickel-Metal Hydride Batteries):** Nikel ve metal hidrit bileşenleri kullanılır. Taşınabilir cihazlarda lityum-iyon pillere alternatif olarak kullanılır.
- **Çinko-Karbon Piller (Zinc-Carbon Batteries):** Çinko ve karbon bileşenleri kullanılır. Bunlar genellikle düşük güçlü cihazlarda, örneğin kumandalar ve saatlerde kullanılır.
- **Lityum Polimer Piller (Lithium Polymer Batteries):** Lityum bileşenleri polimer bir elektrolit içinde kullanılır. Daha esnek yapıları ile çeşitli cihazlarda kullanılırlar.
- **Alkalın Piller (Alkaline Batteries):** Alkalın bir çözelti (genellikle potasyum hidroksit) kullanılır. Bu piller evdeki elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılır.
- **Çinko Hava Pilleri (Zinc-Air Batteries):** Çinko ve havayı kullanarak çalışırlar. Bu piller genellikle işitme cihazlarında kullanılır.
- **Lityum Kükür Dihalojen Piller (Lithium Sulfur Dihalide Batteries):** Lityum, kükür ve diğer bileşenler kullanılır. Uzun ömürlüdürler ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler.
- **Organik Aküler (Organic Batteries):** Organik bileşenlerin kullanıldığı bu piller, çevre dostu seçenekler olarak dikkat çeker.

Her bir pil tipi farklı kimyasal reaksiyonlara dayanarak çalışır ve belirli uygulama alanları için avantajlara sahiptir [12]. Örneğin, lityum-iyon piller taşınabilir elektronik cihazlarda, kurşun-asit aküler otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır.

Li-ion piller gibi piller hem yüksek güç hem de yüksek enerji uygulamaları için uygundur [15]. Genellikle, hibrit enerji depolama sistemleri her iki modun da tek bir uygulama için mevcut olacak şekilde tasarlanır. Bu, kurulum ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltır çünkü aynı güç elektroniği cihazları ve şebeke bağlantıları bileşen enerji depolama sistemleri için yeterlidir. Hibrit Enerji Depolama Sistemleri, geliştirilmiş performanslar, artırılmış verimlilik, daha uzun kullanım ömrü, azaltılmış maliyetler ve daha uygun tasarım ve boyutlandırma sağlayabilir [16]. Enerji yönetimi, Hibrit Enerji Depolama Sistemleri durumunda hayati öneme sahiptir[17]. Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinde kullanılan farklı enerji depolama sistemleri arasında güç dağıtımını belirler ve bunları ortak bir hedefi yerine getirecek şekilde koordine eder. Ayrıca enerji depolama sistemlerinin boyutunu, yaşam döngülerini, verimliliklerini ve diğer çeşitli özelliklerini tanımlar. Bu nedenle, doğru enerji yönetim sistemi algoritmasının seçimi, Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinin optimize edilmiş kullanımı için çok önemlidir. Farklı enerji depolama sistemlerinin nasıl bağlandığına bağlı olarak, esas olarak seri veya paralel olarak sınıflandırılan farklı

Hibrit Enerji Depolama Sistemleri topolojileri vardır; çoğunlukla paralel topoloji kullanılır. Paralel olarak, enerji depolama sistemleri doğrudan (pasif yapılandırma) veya aradaki güç dönüştürücüler aracılığıyla (aktif yapılandırma) bağlanabilir. Genellikle AC veri yoluna göre içsel avantajları nedeniyle DC olan ortak bir veri yolu, tüm sistemi birbirine bağlar. Hibrit Enerji Depolama Sistemleri, hibrit elektrikli araçlar (HEV), yakıt hücresel elektrikli araçlar, pil/hidrojen kombinasyonu kullanan yenilenebilir otonom enerji tedarik sistemleri, evsel veya bölgesel kullanımda şebekeye bağlı Hibrit Enerji Depolama Sistemleri, büyük ölçekli rüzgar ve güneş çiftlikleri vb. gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir [15].

3. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Enerji depolama teknolojilerinden elektriksel ve kimyasal enerji depolama tekniklerinin elektrikli araçlarda, kimyasal ve ısı enerji depolama tekniklerinin bina ve evlerde, elektriksel, mekanik, kimyasal ve ısı enerji depolama tekniklerinin ise akıllı şebekelerde kullanıldığını görülmektedir. Bunların yanında enerji depolama tekniklerinin güç kalitesi, güvenilirlik, enerji yönetimi ve rezerv gibi uygulamaları da bulunmaktadır.

Enerji depolama teknolojileri olan elektriksel, mekanik, kimyasal ve ısı enerji depolama tekniklerinin uygulama alanları Tablo 2’de verilmiştir.

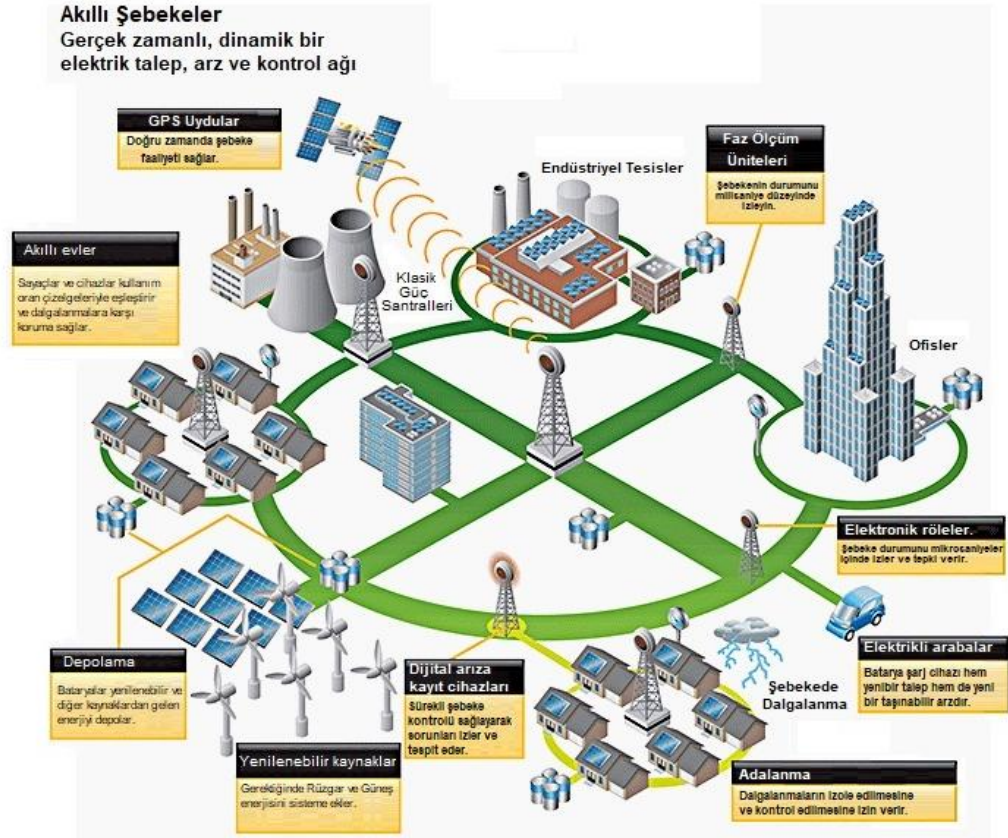
Tablo 2. Enerji depolama teknolojilerinin uygulama alanları[13]

Enerji Depolama Teknolojileri	Uygulamalar
Elektriksel (Süper kapasitör/Ultra kapasitör) Kimyasal (Yakıt hücreleri, kurşun -asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Nikel kadmiyum pilleri)	Elektrikli Araçlar
Elektriksel (Süper kapasitör/Ultra kapasitör, Mikro Süperiletken manyetik enerji depolama-SMES, Geniş SMES) Mekanik (Yüksek güç volanlar, pompalı hidroelektrik, Sıkıştırılmış hava enerji depolama(CAES) Isıl enerji depolama Kimyasal (Sodyum Sülfür-NaS pilleri, Kurşun-asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Nikel kadmiyum-NiCd pilleri, Yakıt hücreleri, Akış Çinko bromür-ZnBr)	Akıllı Şebekeler
Kimyasal (Kurşun-asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Yakıt hücresi) Isıl enerji depolama	Bina ve Evler

Akıllı şebekeler; doğayla dost bir teknoloji olmasının yanında, sabit ve gezgin enerji depolamasında ve dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarında aktif rol alır[18]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim merkezlerine uzak olması, düzenli olmaması ve hava tahminin yeteri kadar doğru yapılamaması nedeniyle, enerji depolama sistemlerinin de önemi giderek artmıştır [19]. Günümüzde bütün modern enerji sistemleri arz güvenilirliği, sistem stabilitesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması iletim / dağıtım problemlerinin ve maliyetlerinin minimize edilmesi gibi birçok nedenle enerjinin depolanmasını zorunlu kılar[20]. Enerji depolama, pik yük talebinin olduğu anlarda depolanan elektrik enerjisini kullanan acil sistem teknolojileridir[21]. Bu teknolojiler; elektrik şebekelerinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında farklı uygulamaları olup, akıllı şebekelerin önemli bir bileşenidir.

Akıllı şebekelerin üç temel hedefi şunlardır[22]:

1. Şebeke kapasitesini optimize etmek için elektrik enerjisinin arz ve talep tarafını daha iyi dengelemek, yük eğrisinde günlük dalgalanmaları önleyerek, “yük faktörünü” maksimize etmek,
2. Üretim ve iletim kısıtlamalarından dolayı oluşan enerji maliyetlerindeki oynamaları düzenlemek,
3. Son kullanıcı tarafında daha fazla dağıtılmış üretim (yenilenebilir veya konvansiyonel) ve enerji depolamaya olanak tanıyan mikro şebekelerin kurulmasıdır.



Şekil 7. Akıllı şebekenin genel yapısı[23].

Akıllı ve mikro şebekelerde kullanılan enerji depolama teknolojileri; elektrik üretim ve dağıtım şirketleri, tesis işletmecileri ve elektrikli araç üreticileri için oldukça önemli bir ilgi alanıdır. Büyük miktarlarda enerjinin depo edilebilmesi elektrik şirketlerinin operasyonları için büyük bir esneklik sağlayabilir. Çünkü bu sayede, talep edilen enerjinin aynı anda üretilmesine gerek kalmaz[24].

Enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, gerilim düşmesi ve kesintiler gibi güç kalitesi problemlerinin hem sistem hem de ekipman düzeyinde ele alınan çözümlerinde büyük önem taşımaktadır[25]. Bununla birlikte, enerji depolamanın; sistem verimliliğini artırması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna olanak vermesi, şebeke kararlılığını ve güvenilirliğini artırması, enerji güvenliğini artırması ve sera gazı emisyonunu azaltması gibi faydaları vardır[25].

Tablo 3. Enerji Depolama Sistemlerinin teknik özellikleri[26]

Teknoloji	Enerji Çıkışı	Verim	Ömür (yıl)
Kinetik Enerji Depolama (Volan Depolama) FES	Elektrik	90-95	20
Pompalı Hidroelektrik Depolama (Basıncılı Su Depolama) (PSH)	Elektrik	50-85	40-60
Basıncılı Hava Enerji Depolama (CAES)	Elektrik	27-70	30
Süper Kapasitörler	Elektrik	90-95	10-12
Süper İletken Manyetik Enerji Depolama (SMES)	Elektrik	90-95	40
Termal Enerji Depolama	Termal	90-99	20-30
Hidrojen Enerjisi Depolama	Elektrik	30-50	5-30
Piller	Elektrik	75-95	5-15
Yeraltı Termal Enerji Depolama (UTES)	Termal	50-90	5-30
Eriyik Tuzlar	Termal	40-93	25
Kimyasal-Hidrojen Depolama	Elektrik	22-50	5-30

Tablo 4. Farklı enerji depolama teknolojilerinin çeşitli maliyetlerinin karşılaştırılması[27].

Enerji Depolama Teknolojileri	Güç yatırım maliyeti (\$/kW)	Enerji yatırım maliyeti (\$/kW)	İşletme ve bakım maliyeti (\$)
Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES)	200–489	1000–72000	0.001–18.5
Kinetik Enerji Depolama (Volan Depolama) (FES)	250–350	1000–14000	0.004–20
Pompaalı Hidroelektrik Depolama (Basınçlı Su Depolama) (PSH)	2500–4300	5–100	0.004–3.0
Termal Enerji Depolama (TES)	200–400	20–60	Mevcut değil
Basınçlı Hava Enerji Depolama (CAES)	400–1000	2–120	0.003–25
Piller			
Kurşun Asit	300–600	200–400	50
Lityum İyon	1200–4000	600–3800	–
Sodyum Sülfür	350–3000	300–500	80
Nikel Kadmiyum	500–1500	800–2400	20
Vanadyum redoks akışlı pil (VRB)	600–1500	150–1000	70
Çinko brom (ZnBr)	400–2500	150–1000	–
Polisülfid bromür (PSB)	700–2500	150–1000	–
Kapasitörler	200–400	500–1000	0.005–13.0
Süperkapasitörler	100–450	300–2000	0.005–6.0

Genel olarak, enerji depolama sistemleri güç oranlarına göre üç tipe ayrılır. Basınçlı Sıvı Enerji Depolama, Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ve Sıvı Hava Enerjisi Depolama büyük ölçekli uygulamalar için uygundur (>100MW). Kurşun-asit, Nikel Kadmiyum, Polisülfid Bromür, Süperiletken Manyetik Enerji Depolama ve rejeneratif yakıt hücreleri orta ölçekli (10-100MW) uygulamalar için uygunken, Küçük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama, volanlar, süperkapasitörler, Nikel-metal hidrit, Vanadyum Redoks Bataryalar, Çinko-Brom, Sodyum Sülfür, Çinko-hava ve Lityum iyon 1-3 MW'ın altındaki küçük ölçekli uygulamalarda devreye girmektedir. Tepkinin zaman ölçeğine göre, çeşitli enerji depolama sistemleri hızlı, nispeten hızlı ve hızlı olmayan olarak ayırt edilir. Milisaniye ile saniye arasındaki tepki süreleriyle volanlar, süper kapasitörler, Süper iletken Manyetik Enerji Depolama, her tür batarya ve akış bataryaları hızlı tepki veren sistemler devreye girmektedir. Rejeneratif yakıt hücreleri, Küçük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ile birlikte saniyeler aralığında nispeten hızlı tepki sağlarken, Basınçlı Sıvı Enerji Depolama, Büyük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ve Sıvı Hava Enerji Depolama birkaç dakikalık daha yavaş tepki sürelerine sahiptir.

Depolama süresi, Enerji Depolama teknolojilerini kısa vadeli (saniye-dakika), orta vadeli (saniye-saat) ve uzun vadeli (dakika-gün) olarak ayırmaya yardımcı olan kilit bir unsurdur. Depolama süresi doğrudan kendi kendine deşarj oranından etkilenir ve bu nedenle kısa vadeli depolama, çok yüksek günlük enerji dağılımları nedeniyle volanlar tarafından sağlanır. Orta vadeli depolama, artan parazit kayıpları nedeniyle elektromanyetik süper kapasitörler ve Süper iletken Manyetik Enerji Depolama, çalışma sıcaklığını korumak için kendi kendine ısınma ihtiyaçları nedeniyle yüksek sıcaklık/Sodyum bazlı bataryalar, Küçük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ve Sıvı Hava Enerjisi Depolama sistemi tarafından sunulmaktadır. Basınçlı Sıvı Enerji Depolama, büyük ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama, Kurşun-asit, Nikel Kadmiyum, Lityum iyon, Çinko-hava, akış bataryaları ve rejeneratif yakıt hücreleri uzun süreli depolama süresi sağlayabilmektedir. Ancak, Kurşun-asit, Nikel Kadmiyum ve Lityum iyon bataryalar orta düzeyde bir kendi kendine deşarj oranına sahiptir ve sonuç olarak onlarca günden daha uzun depolama süreleri için uygunsuz hale gelirler.

Depolama kapasitesiyle bağlantılı olarak özerklik, kesintili yenilenebilir kaynaklara dayanan izole sistemler ve mikro şebekeler için önemli bir özelliktir. Bir enerji depolama sisteminin sürekli olarak enerji sağlayabildiği süreyi ifade eder. Dolayısıyla enerji depolama teknolojileri, sağlayabildikleri güce (güç derecesi) karşı enerji kapasiteleri (depolanan enerji miktarı) açısından sınıflandırılabilir. Tipik olarak, volanlarla birlikte süperkapasitörlerin ve Süperiletken Manyetik Enerji Depolamanın elektromanyetik cihazlarından daha az otonomi beklenir. Daha yüksek otonomi Küçük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama, geleneksel ve yüksek sıcaklık bataryaları tarafından sergilenirken, Basınçlı Sıvı Enerji Depolama, büyük ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama, Sıvı Hava Enerji Depolama, akış bataryaları,

Çinko-hava ve rejeneratif yakıt hücrelerinin birkaç saat boyunca otonom olarak güç sağlayabileceği düşünülmektedir.

Çevrim veya gidiş-dönüş verimliliği, güç sistemi uygulamalarında enerji depolama sistemi seçeneklerinin değerlendirilmesinde kilit bir unsurdur. Çok yüksek verimlilikler (>%90) elektromanyetik depolama sistemlerinde, volanlarda ve Lityum iyon bataryalarda görülmektedir. Diğer bataryalar ve akış bataryaları, Küçük Ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ve Sıvı Hava Enerji Depolama %60'ın üzerinde yüksek verimlilik sağlamaktadır. Büyük ölçekli Basınçlı Hava Enerjisi Depolama, Çinko-hava ve rejeneratif yakıt hücreleri daha enerji yoğun dönüşüm süreçleridir ve bu nedenle rejeneratif yakıt hücresi durumunda %20'ye kadar düşebilen düşük verimliliklere sahiptir. Verimliliğin bazı uygulamalarda çok önemli bir faktör haline geldiği ve en ucuz teknolojilerin bile uygun olmayabileceği unutulmamalıdır. Buna örnek olarak elektrik enerjisinin satın alınabildiği ve dönüşüm kayıpları hariç geri satılabildiği enerji arbitrajı verilebilir. Bu durumlarda, kendi kendine deşarj oranı da dikkate alınmalıdır. Ayrıca, bazı teknolojiler yüksek voltajlı AC'den düşük voltajlı DC'ye (ve tekrar AC'ye) dönüşüm gerektirirken diğerleri gerektirmediklerinden, transformatörlerin ve güç dönüştürme sistemlerinin verimliliği de hesaplama dahil edilmelidir[28].

Toplam yatırım maliyetini etkileyen diğer faktörler ise kullanım ömrü ve çevrim süreleridir. Elektromanyetik enerji depolama cihazları, hareketli parçaların ve kimyasal reaksiyonların olmaması nedeniyle son derece yüksek çevrim kabiliyeti sağlar. Mekanik bileşenler normalde Basınçlı Sıvı Enerji Depolama, Basınçlı Hava Enerjisi Depolama ve volan sistemlerinin ömrünü belirlerken, her türlü kimyasal enerji depolama sistemi kimyasal elementlerin ve elektrolitlerin bozulması nedeniyle zamanla bozulur.

Verimlilik ve eski kullanım ömürlerindeki önemli gelişmelerin yanı sıra, Ar-Ge çalışmaları arttıkça sermaye ve İşletme ve Bakım maliyetleri düşme eğilimindedir. Bu anlamda, olgunlaşmış ve ticarileşmiş Basınçlı Sıvı Enerji Depolama ve Basınçlı Hava Enerjisi Depolama en düşük enerji sermaye maliyetini sunarak yüksek enerjili/uzun süreli uygulamalarda uygun hale gelirken, bunları Çinko-hava ve rejeneratif yakıt hücreleri takip etmektedir. Güç sermayesi maliyeti açısından, volan, süper kapasitör ve Süperiletken Manyetik Enerji Depolama teknolojisi, yakıt hücrelerinin ticarileştirilmesi ve Çinko-hava ve rejeneratif yakıt hücresinin geliştirilmesi ile birlikte yüksek güç/kısa süreli uygulamalar için uygundur. Akış bataryaları ve Lityum iyon hala çok pahalıyken, diğer geleneksel ve yüksek sıcaklık bataryaları ortada yer almaktadır. İşletme ve bakım maliyetleri açısından, kimyasal işlem gerektiren elektrokimyasal teknolojiler diğerlerine göre dezavantajlıdır ve bunu depolanan enerjiyi korumak için ek ekipmana ihtiyaç duyan teknolojiler takip etmektedir. Bununla birlikte, hem sabit hem de değişken İşletme ve Bakım maliyetlerinin yanı sıra değiştirme maliyetlerinin belirli uygulamalar için incelendiği [29]'da daha net bir gösterim elde edilebilir[29]. Bu yaklaşım doğrultusunda, tek bir cihazın bütün bir güç sisteminin gereksinimlerini karşılayamayacağı açıktır. Tipik olarak, deşarj süresi kısa olduğunda, yüksek güç sağlayabilen cihazlar gerekirken, birkaç saat veya daha uzun deşarj süreleri için büyük miktarlarda enerji depolayabilen cihazlara ihtiyaç vardır. Buna ek olarak, düşük sermaye maliyetli ve yüksek İşletme ve Bakım maliyetli cihazlar kısa süreli uygulamalar için daha uygunken, yüksek sermaye maliyetli ve düşük İşletme ve Bakım maliyetli cihazlar uzun süreler boyunca büyük miktarlarda enerji taşımak için tercih edilir. Son olarak, bir enerji depolama sisteminin uygun olup olmadığı, güç zincirinde tam olarak nerede kullanılmak istendiğine ve uygulamanın gereksinimlerine ve tercihlerine bağlıdır.

Mevcut eğilimler fosil yakıt fiyatlarında artışlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının mütevazı yaygınlığını varsayıyor olsa da, enerji güvenliği ve çevre koruma sağlarken ekonomik büyümeyi sürdürmek için, gelecekte tahminler fosil yakıtların daha yüksek maliyetlerini ve sonuç olarak daha geniş YEK yaygınlık gereksinimlerini içermelidir. Bu bağlamda ekonomi, şebekeye bağlı kesintili kaynaklar tarafından üretilen toplu elektriğin hemen kullanılmak yerine depolanmasını mümkün kılmaktadır. Orta güç ölçeklerinde, dağıtılmış elektrik yerel olarak depolanabilir ve hem tedarik şebekesi hem de üretim tesisi için yük dengeleme avantajı sağlar [10]. Ayrıca, piyasa mekanizmaları teşvik edilerek tüketicilere santrallerin yoğun olarak yüklendiği yüksek talep dönemlerinde kullanımı azaltma ve yoğun olmayan dönemlerde kullanımı artırma yönünde bir teşvik sağlanabilir [30]. Sayacın talep tarafındaki küçük ve daha basit enerji depolama üniteleri daha sonra küçük ölçekli RES sistemlerinin olası kurulumuna yardımcı olacak ve yedek güç, pik tıraşlama, yük dengeleme vb. gibi ek faydalar sağlayacaktır. [31].

Kesintili yenilenebilir kaynaklarına yönelmeyi, gaz emisyonlarını ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmayı amaçlayan küresel çabalar, tüm enerji sistemini dramatik bir değişime zorlamaktadır. Şebekeye bağlı büyük ölçekli RES, yüksek oranda dağıtılmış değişken üretim, fiş takılarak şarj edilebilen hibrit elektrikli araçların (PHEV'ler) ve Elektrikli araçların artma eğilimi ve talep yanıtı gereksinimi, kesinlikle enerji depolama sistemlerinin aktif katılımını gerektirmesi ve ek değer sağlayacak daha geniş bir uygulama alanı açan en önemlilerinden bazılarıdır [32,33]. Gelecekte gelişmesi beklenen mikro şebeke (AC veya DC) ve akıllı şebeke sistemleri de hayati öneme sahiptir ve enerji depolama sistemleri topolojisi, modeli ve cihaz çalışması için bir test ortamının yolunu açmaktadır [34]. Ancak, enerji depolamaya alternatif olarak talep tarafı yönetimi veya güçten gaza süreçleri de mevcuttur. Talep tarafı yönetimi, binaların veya sanayi tesislerinin verimliliğini artırmak için binaları önceden ısıtarak veya önceden soğutarak, suyu ısıtarak, belediye su pompalama ve sulama sistemlerinin kullanımını zamanlayarak, suyu tuzdan arındırarak vb. başlayan kamu hizmeti kontrolünü içerir [12,35]. Elektrik üretimini karbondan arındırmak ve elektriği dolaylı olarak depolamak için elektrikten gaza geçiş umut verici bir yol olarak görünmektedir. Gaz depolama sistemleri, hem güç sisteminin esnekliğini hem de biyoenerjinin payını artırmak için karbon yakalama ve depolama (CCS) sürecinin entegre edilmesini ve elektrolize dayalı olmasını sağlar[28]. Hidrojen (H₂) ve sentetik doğal gazı (SNG) giden çeşitli yollar başlıca örneklerden bazılarıdır ve uygulanabilir alternatifler olarak düşünülebilir [36,37].

SONUÇ

Bir enerji depolama sistemi, geleceğin önemli teknolojilerinden biri olan akıllı şebeke konseptlerini mümkün kılacaktır. Enerji üretimindeki dalgalanmaları ortadan kaldıran enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Enerji depolama sistemleri, sistem güvenilirliğini destekleyerek yük izleme, dönüş rezervi ve soğuk başlatma gibi ek faydalar sağlar. Ayrıca, tepe yüklerini azaltarak jeneratör arızalarını da en aza indirir. Depolanan enerji miktarı, pik yükleri telafi etmede önemli bir rol oynar. Bu şekilde baz üretim birimlerinin kapasite faktörü artırılabilir ve düşük maliyetle depolanan enerji kullanımı teşvik edilebilir. Enerji depolama sistemleri, yeni teknolojilerin çeşitliliği, değişen tüketici alışkanlıkları ve elektrik üretimi ile dağıtım sistemlerindeki değişikliklere uyum sağlamak için kilit bir bileşen olarak görülmektedir. Ayrıca, şebeke performansını güvenilirlik, hızlı yanıt verme ve yük eşleştirme yeteneği gibi konularda iyileştirir. Sürdürülebilirlik ve çevre koruma konusundaki önemli sorunlar, bizi enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye ve yenilenebilir enerji kullanımını artırmaya yönlendirmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan gelen enerjinin kısa ve uzun vadeli dalgalanmaları, enerji üretim miktarlarının değişimini izlemeyi gerektirir. Bu nedenle, enerji depolama, elektrik şebekesinin yanıt kapasitesini yönetilebilirlik, kontrol edilebilirlik, öngörülebilirlik ve esneklik gibi özelliklerle iyileştirmek için büyük önem taşır. Batarya ve benzeri enerji depolama sistemleri, teknolojinin geleceğini iyileştiren ve araştırmaya değer konular olup, gelişime en açık alanlardan biri olmaya devam edecektir. Elektrik enerjisi depolama teknolojileri, akıllı şebekelerin geliştirilmesinde en önemli unsurlardan biridir. Geleceğin şebekesinin çift yönlü akışlı ve akıllı şebekelere dönüşeceği göz önüne alınırsa, enerji depolama teknolojilerinin akıllı ve mikro şebekelerdeki yeri daha iyi anlaşılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] MIT Climate Portal. (2020, September 11). "Energy storage." <https://climate.mit.edu/explainers/energy-storage>
- [2] YANG, X., LAI, T., ZHANG, Q. et al. "Energy storage systems: a review. Energy Storage Saving 1", 166–216 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>
- [3] HE, W., KING, M., LUO, X., DOONER, M., LI, D., & WANG, J. (2021). "Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective.", Advances in

- Applied Energy, 4, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100060>
- [4] MCNAMARA, W., PASSELL, H., MONTES, M., JEFFERS, R., & GYUK, I. (2022). "Seeking energy equity through energy storage.", The Electricity Journal, 35(1), 107063. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107063>
- [5] [KOOHI-FAYEGH, S., & ROSEN, M. A. (2020)., "A review of energy storage types, applications and recent developments.", Journal of Energy Storage, 27, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>
- [6] Deneysan Eğitim Cihazları. "Hidrojen Enerjisi", http://deneysan.com/Content/images/documents/es-08_59355631.pdf
- [7] HASSAN, Q., SAMEEN, A. Z., SALMAN, H. M., JASZCZUR, M., & AL-JIBOORY, A. K. (2023). "Hydrogen energy future: Advancements in storage technologies and implications for sustainability.", Journal of Energy Storage, 72(Part B), 108404. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108404>
- [8] MILLER, M.A., PETRASCH, J., RANDHIR, K., RAHMATIAN, N., & KLAUSNER, J. (2021). "Chemical energy storage. In A. Wörner & C. Sattler (Eds.), Thermal, Mechanical, and Hybrid Chemical Energy Storage Systems (pp. 249-292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819892-6.00005-8>
- [9] REVANKAR, S. T., Chemical energy storage. In H. Bindra & S. T. Revankar (Eds.), Storage and Hybridization of Nuclear Energy" (pp. 177-227). Elsevier. (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813975-2.00006-5>
- [10] AGYEKUM EB, NUTAKOR C, AGWA AM, KAMEL S., "A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation. Membranes (Basel)", 2022 Feb 1;12(2):173. doi: 10.3390/membranes12020173. PMID: 35207094; PMCID: PMC8880752.
- [11] GUTIÉRREZ-MARTIN, F., RODRIGUEZ-ANTÓN L.M., "Power-to-SNG technology for energy storage at large scales", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 42, 2016, Pages 19290-19303, ISSN 0360-3199,
- [12] HANNAN, M. A., WALI, S. B., KER, P. J., RAHMAN, M. S., MANSOR, M., MUTTAQI, K.M., RAMACHANDARAMURTHY, V. K., MAHLIA, T. M. I., & DONG, Z. Y." Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues", Journal of Energy Storage, 42, 103023. (2021).
- [13] KOCAMAN B., "Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri", BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 2(1), 119-127, 2013
- [14] Hybrid energy storage: Are combined solutions gaining ground? <https://energystorageforum.com/news/energy-storage/hybrid-energy-storage-combined-solutions-gaining-ground>
- [15] BOCKLISCH, T., "Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Applications", Energy Procedia 2015, 73, 103–111.
- [16] SERPI, A., PORRU, M., DAMIANO, A., "A Novel Highly Integrated Hybrid Energy Storage System for Electric Propulsion and Smart Grid Applications, Advancements in Energy Storage Technologies", Xiangping Chen and Wenping Cao; IntechOpen: London, UK, 2 May 2018.
- [17] ETXEBERRIA, A., VECHIU, I., CAMBLONG, H., VINASSA, J.M., CAMBLONG, H., "Hybrid Energy Storage Systems for renewable Energy Sources Integration in microgrids: A review.", In Proceedings of the 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, 27–29 October 2010
- [18] Dinçer H., Mutlu F., Kuzlu M. 2011. Sayısal Teknolojinin Elektrik Şebeke Ağına Katılması: Akıllı Şebeke, EMO IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu.
- [19] Çetinkaya H.B., "Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği Açısından Akıllı Şebekeler ve SCADA uygulamaları", 3. Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı., 2012.
- [20] Hızla Gelişen Endüstri: Enerji Depolama Sistemleri. http://www.normenerji.com.tr /menu_detay.asp?id=7965
- [21] KUŞDOĞAN Ş., KURT G., ARSOY (BASA) A., "Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sisteminin (SMES) İncelenmesi ve Teknolojik Değerlendirilmesi", Eleco, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, pp 199-202, Bursa. 2000.
- [22] ŞAMİOĞLU S. 2011. Schneider Electric, Akıllı Şebeke Uygulamaları. <http://www.akillisebekeler.com/schneider-electricakilli-sebeke-uygulamaları/>
- [23] NIKOLAIDISA, P., POUILLIKAS, A., "A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability", Journal of Power Technologies, 97 (3) (2017) 220–245.
- [24] RAHMAN S., "Advanced Energy Technologies", 2012. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b12056-5>
- [25] GENCER Ö.Ö., "Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Dinamik Gerilim Düzenleyici Tasarımı", Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli. 2006

- [26] TURAN, D., YÖNETKEN A., "Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, AKU J. Sci. Eng.16 (2016) Özel Sayı (113-121)
- [27] XING, L., WANG, J., DOONER, M., CLARKE, J., "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation." Appl. Energy 137 (1), 511–536. 2015.
- [28] DELL, R. M., RAND D.A.J., "Energy storage, key technology for global energy sustainability", Journal of Power Sources 100 (1) (2001) 2–17.
- [29] B. ZAKERİ, S. SYRI, Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews 42 (2015) 569–596
- [30] HADJIPASCHALIS, I., POULLIKKAS, A., EFTHIMIOU, V., "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", Renewable and sustainable energy reviews 13 (6) (2009) 1513–1522.
- [31] ALLAN, G., EROMENKO, I., GILMARTIN, M., KOCKAR, I., MCGREGOR, P., "The economics of distributed energy generation: A literature review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 42 (2015) 543–556.
- [32] DE CARNE, G., vd., "The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions"; Electric Power Systems Research Volume 236, November 2024, 110963
- [33] PHIPPS K., MEISENBACHER S., HEIDRICH B., TUROWSKI M., MIKUT R., HAGENMEYER V., "Loss-customised probabilistic energy time series forecasts using automated hyperparameter optimisation", Proceedings of the 14th ACM International Conference on Future Energy Systems, e-Energy '23, ACM, Orlando FL USA (2023), pp. 271-286
- [34] PHIPPS K., LERCH S., ANDERSSON M., MIKUT R., HAGENMEYER V., LUDWIG N., "Evaluating ensemble post-processing for wind power foreca", Wind Energy, 25 (8) (2022), pp. 1379-1405
- [35] APPINO, R.R., ORDIANO J.Á.G., MIKUT R., FAULWASSER T., HAGENMEYER V., "On the use of probabilistic forecasts in scheduling of renewable energy sources coupled to storages", Appl. Energy, 210 (2018), pp. 1207-1218
- [36] Analytical uncertainty propagation for multi-period stochastic optimal power flow; Bauer R., Mühlpfordt T., Ludwig N., Hagenmeyer V.; Sustain. Energy Grids Netw., 33 (2023), Article 100969
- [37] UDDIN, M., ROMLIE M.F., ABDULLAH M.F., ABD HALIM S., ABU BAKAR A.H., "Chia Kwang T.A review on peak load shaving strategies", Renew. Sustain. Energy Rev., 82 (2018), pp. 3323-3332

ENDÜSTRİYEL ATMOSFERİK DEPOLAMA TANKLARINDA ISI YALITIMI VE EKONOMİK DEĞERLENDİRİLMESİ

İlhan Tekin ÖZTÜRK*, Batuhan KILIÇ**

***Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü**

41380 İzmit/Kocaeli

**** OSB, Dilovası OSB, Tuna Cd. Dilovası Organize Sanayi Bölgesi 1. Kısım No:7, 41455**

Dilovası/Kocaeli

ilhan@kocaeli.edu.tr, batuhan.kilic@yandex.com.tr

ÖZET

Isıtma ihtiyacı bulunan endüstriyel ürünlerin depolandığı atmosferik koşullarda çalışan yer üstü depolama tanklarında ısı kayıpları, işletme maliyetlerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Bu depoların büyük olması (ortalama 15 m çapında ve 15 m yüksekliğinde) nedeniyle atmosferik ortama özellikle kışın çok fazla ısı kaybetmekte ve genellikle tavanı işletme nedeniyle yalıtılamamaktadır. Bilindiği gibi ürünlerin depolama maliyetlerini ve depolama karbon ayak izini azaltmak için enerji verimliliği kapsamında gerekli tedbirlerin alınması artık elzem olmuştur. Depolama alanlarında farklı boyutlarda çok fazla depo bulunmasından dolayı bu kayıplardan dolayı oluşan işletme maliyetleri oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu çalışmada, sıvı yakıt (fuel oil) depolanan bir sıvı yük depolama terminali tesisinde yer alan silindirik bir depolama (örnek) tankı için yalıtımsız çatı kısmından kaynaklanan ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik bir pilot uygulama gerçekleştirilmiştir. Tank çatısına farklı kalınlıklarda uygulanan ısı yalıtım boyası ve geleneksel cam yünü yalıtımının ısı performansları karşılaştırılmış; gerekli ısı transferi hesapları yapılmış ve ekonomik analizlerle yatırımın geri dönüş süresi belirlenmiştir. Yapılan hesaplamaları sonucunda, yalıtımsız durumdaki çatının toplam ısı kaybının %82'sinden sorumlu olduğu belirlenmiştir. Uygulanan yalıtım yöntemleriyle yıllık doğal gaz tüketiminde ciddi azalmalar sağlanmış; en uygun geri ödeme süresinin cam yünü yalıtımı ile elde edildiği görülmüştür. Bu bulgular, benzer endüstriyel depolama tesislerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulanabilir mühendislik çözümlerine ışık tutacaktır.

Anahtar Kelimeler: Isı yalıtımı, depolama tankı, enerji verimliliği, ekonomik analiz, TS EN 12241

1. GİRİŞ

Dünyamızın enerji tüketiminin önemli bir kısmının halen fosil kökenli kaynaklardan karşılanması, dünyamızı global ısınmaya neden olmakta bunun sonucunda ciddi iklim değişiklikleri olmaya başlaması ve dünyamızda sürülebilir bir yaşamın daha da zora girmesine neden olmaktadır. Yüksek düzeyde verimli enerji kullanmak bu kapsamda alınabilecek önemi çözümlerden biri olmaktadır. Türkiye'nin Enerji Görünümü, MMO Raporuna göre 2022 yılı için ülkemizde tüketilen enerjinin yaklaşık %24 endüstriyel tesislerde gerçekleşmektedir. Endüstriyel tesislerde enerji verimliliği her geçen gün daha da önem kazanmakta olup, bu kapsamda tesisler üzerine düşeni yapmaya çalışmaktadır.

Endüstriyel tesislerde enerji verimliliğinin en önemli adımlarından biride tesislerde bulunan tank, depo ve cihazlar ve tesisat borularındaki sıcak ve soğuk yüzeylerin uygun şekilde yalıtılarak bu enerji kayıp ve kazançlarının önüne geçilmesidir.

Bina ve endüstriyel tesisatta bu enerji kayıpların azaltılması için bu kapsamda uluslararası bir standart hazırlanmıştır ve bu standart ülkemizde de kullanılmaya başlanmıştır (TS EN 12241- 2008).

P. Armstrong ve arkadaşları (2014) yaptıkları bu çalışmada; Sıcak su depolarının enerji depolama cihazları olarak etkili bir şekilde çalışabilmeleri için, çalışma sırasında katmanlı bir sıcaklık dağılımının korunmasının çok önemli olduğunu belirterek, duvar malzemesi spesifikasyonunun evsel sıcak su depolarındaki katmanlaşmanın giderilmesi üzerindeki etkisini anlamak için deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış ve sonuçlarını ayrıntılı olarak açıklamışlardır.

R. Christodoulaki ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada, bir güneş enerjisi ısı depolama tankının yalıtımında, 117°C'de erime noktasına sahip ve sistemin yaklaşık 120°C'deki çalışma sıcaklığına denk gelen S117 Faz Değişim Malzemesi kullanılmıştır. Tankın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çalışmasından elde edilen simülasyon sonuçları da burada sunulmuştur.

İ.T. Öztürk ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada, sıcak akışkan taşıyan bir boru için hem boru çapı hemde üzerine yapılacak yalıtımın aynı anda belirlenmesi için üç ayrı termoeconomik model ve ayrıca ekserji veriminin maksimum ve maliyetlerin minimum prensibine dayalı simülasyon yöntemi kullanılarak, elde edilen sonuçları karşılaştırmışlar ve en uygun optimizasyon sonucunun ekserji esaslı termoeconomik optimizasyon olduğunu elde etmişlerdir.

Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığının, Enerji Verimliliği Yönetmeliği'nde ise sıcak ve soğuk yüzeylerin çevresi ile arasında sıcaklık farkının 5 °C oluncaya kadar yalıtılması belirtilmektedir.

Depolarda depolanan akışkanın yüksek, orta ve düşük sıcaklıkta depolanması durumları için seçilecek malzeme ve yalıtım kalınlıkları farklılık göstermektedir. Son yıllarda yalıtım boyalarının kullanımı da gündeme gelmiştir. Ayrıca son çalışmalarda faz değiştiren malzemelerin depo yalıtımında ve yüzey sıcaklığının sabitlenmesinde kullanıldığı görülmektedir. Bunlarla birlikte depo veya boru termal yalıtımında enerji kaybını ve kazancını minimum yapmak için yapılan yalıtım çözümlerinde ekonomik değerlendirmelerin de bir zorunluluk haline geldiği görülmektedir.

Sıvı kimyasalları depolayan depoların tavan yalıtımı konusunda literatürde kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Atmosferik depolama tanklarında yaklaşık 45 °C akışkan sıcaklığında (düşük sıcaklıkta) ısı kayıpları bakımından değerlendirilip, ilk defa bu depoların tavan yalıtımı incelenenecektir. Bu düşey tankların yanal yüzeyleri iyi bir şekilde yalıtılabilmesine karşın özellikle tavan yüzeylerinde işletme anında kontrol amaçlı yürüme zorunluluğunun bulunması ısı yalıtımı zorlaştırmaktadır. Bu tavandan olan enerji kayıpları geniş yüzey olmasından dolayı oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu çalışma kapsamında depolama tankı tavan yüzeyinde uygulanabilecek yalıtım çözümlerinin ısı ve ekonomik analizi sunulacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

İlık sıcaklıkta (yaklaşık 45 °C) bir akaryakıt içeren endüstriyel bir tank için ısı yalıtım durumu incelenecektir. İnceleme teorik çalışma kapsamında olacak olup hesaplamalar için ölçülebilecek sıcaklıklar ölçülerek geri kalan kısmı teorik olarak çalışılacaktır. Deponun üst kısmında cam yünü ve taş yünü gibi klasik yalıtım malzemeleri uygulanması, üzerine basılması ve mevcut nozulların personeller tarafından kullanılması nedeniyle mümkün olmadığından, yalıtım boyası da bu kapsamda değerlendirilecektir. Ayrıca yatırım ve işletme maliyetleri de göz önünde bulundurularak ekonomik değerlendirme yöntemlerinden net geri ödeme süresi yöntemi kullanılacaktır.

2.1 Tank Özellikleri

İncelenen tank, 15,28 m çapında, 15 m yüksekliğinde fuel oil depolanmasında kullanılmaktadır. Tankın yanal yüzeyleri 10 cm kalınlığında cam yünü ile kaplanarak yalıtılmış, ayrıca tavanı hafif bombeli olup yalıtılmamış ve sadece yüzeyi korozyona karşı koruma amaçlı boyanmıştır. Deponun üst kısmında maksimum güvenli sıvı yüksekliğinde yaklaşık 0,75 m hava boşluğu bırakılarak doldurulan tank, atmosfer basıncında altında sıcaklığı düşmeyecek şekilde ısıtılmaktadır. Deponun işletme sıcaklığı 45-50 °C sıcaklığı aralığındadır.

2.2 Yalıtım Malzemesi Seçimi

Mevcut durumda karbon çelik sac olan depolama tankı tavanı korozyona karşı boya kaplı olup üzerinde herhangi bir yalıtım malzemesi yoktur. Bu çatı için muhtelif yalıtım malzemeleri kullanılabilir ancak bu malzemelerin avantaj ve dezavantajları vardır. Bu malzemelerin birim direnç maliyeti, yalıtım kabiliyeti (λ_y) ve maliyetini içerdiği için en önemli karşılaştırma kriterini oluşturmaktadır. Belirli bir kalınlık (e_y) için yalıtım malzemesi satın alma maliyeti bilindiğinde, önce bu kalınlık için oluşan iletimle ısı direnç (R_{id}) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$R_{id} = \frac{e_y}{\lambda_y} \quad (1)$$

Daha sonra metrekaşe yatırım maliyeti fiyat f_{yat} (TL/m²) kullanılarak, Birim direnç maliyeti aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$f_d = \frac{f_{yat}}{R_{id}} \quad (2)$$

Farklı yalıtım malzemeleri için verilen yatırım maliyetleri esas alınarak birim direnç yatırım maliyeti (f_d) **Tablo 1**'de sunulmuştur.

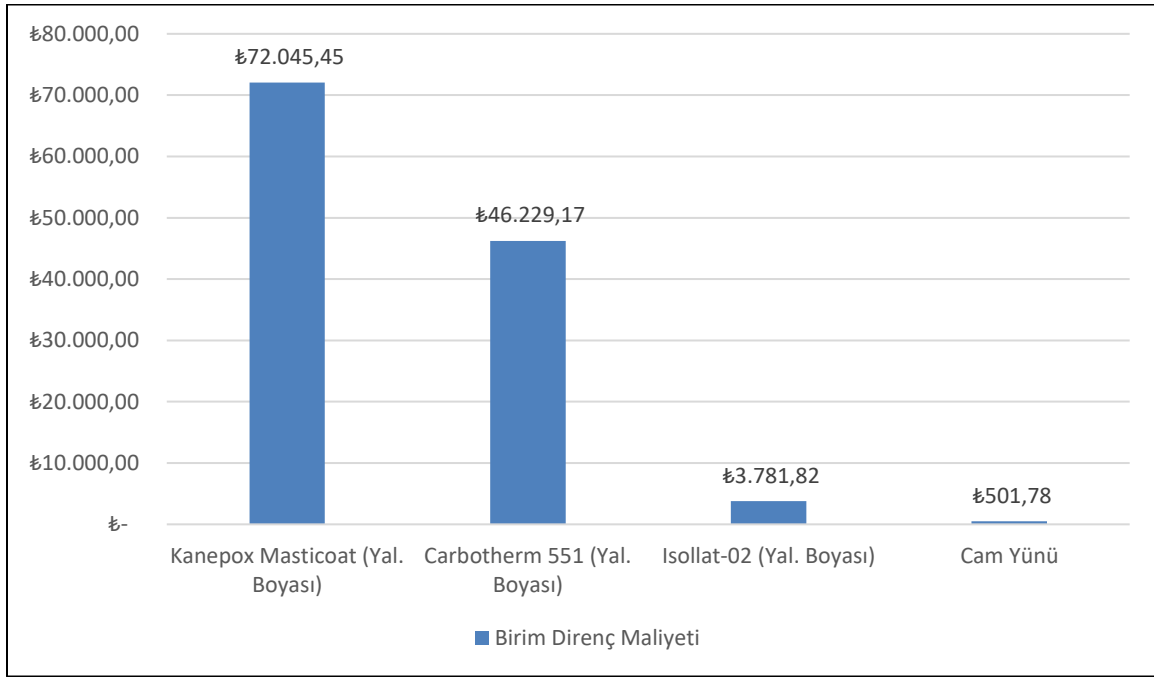
Tablo 1: Farklı yalıtım malzemeleri için birim direnç maliyetleri

Yalıtım Malzemesi Cinsi	Isı İletim Katsayısı (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Kalınlığı (mm)	Isıl Direnci (m ² K/W)	İlgili kalınlıktaki yatırımın birim maliyeti (TL/m ²) (işçilik hariç)	Birim Direnç Maliyeti (TL -W/(m ⁴ .K))
Kanepox Masticoat (Yalıtım. Boyası)	0,0600	2,00	0,03330	2.377,50	72.045,45
Carbotherm 551 (Yalıtım Boyası)	0,0550	2,00	0,03636	1.664,25	46.229,17
Isollat-02 (Yalıtım Boyası)	0,0029	2,00	0,68966	2.401,27	3.481,82
Cam Yünü	0,0350	100,00	2,85710	1.433,63	501,78

****Maliyetler için 1 Euro = 47,55 TL alınmıştır (08/2025 Ortalaması).**

Yalıtım malzemelerinin birim direnç yatırım maliyetleriyle birlikte, uygulama kolaylığı, tankın atmosfere açık çatı yüzeyinde kullanılacağı için yüksek basma mukavemeti, güneş radyasyonuna dayanıklı olması gibi diğer faktörlerde göz önüne alınmalıdır.

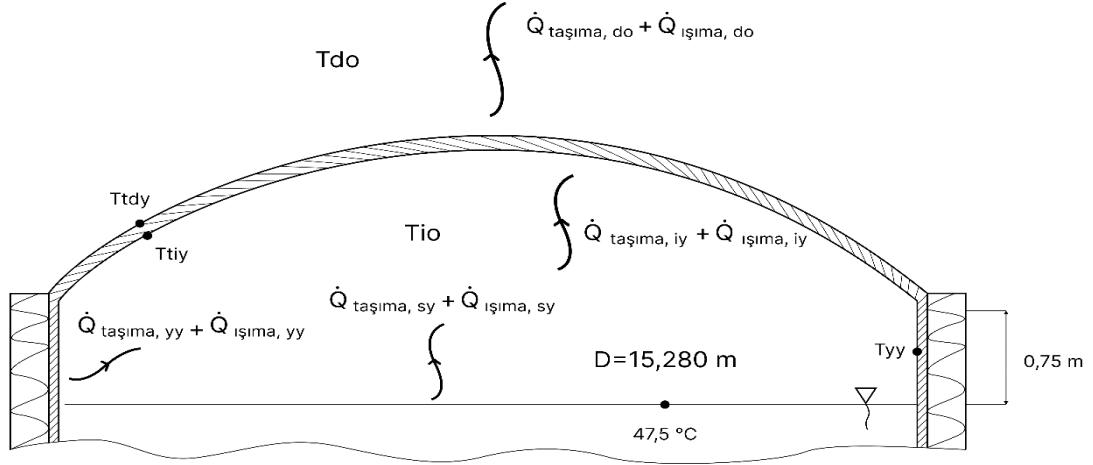
Tablo 1'den görüleceği gibi birim direnç yatırım maliyeti en uygun olan yalıtım malzemesi oldukça açık ara ile cam yünüdür. Bununla beraber yatay yüzeyde özellikle yürüme olan yerlerde cam yününün basma mukavemeti oldukça düşük olup uygulanması zordur. Eğer yürüme yolları ve kapakların açılıp kapanması ile ilgili kısımlar için özel çözümler bulunabilirse cam yünü kullanılabilir. Isı yalıtımı boyaları içinde Isollat-02'nin birim direnç maliyetinin açık ara ile en düşük olduğu görülmektedir. Şekil 1'de Tablo 1'de elde edilen birim direnç maliyetleri esas alınarak hazırlanan grafik verilmiştir. Yalıtım malzemelerinin bu kapsamdaki karşılaştırılmasında en iyi yalıtım malzemesi 10 cm kalınlığında cam yününün, Kanepox Masticoat ısı yalıtım boyasına göre 145 kat, boya uygulaması olarak ise Isollat-02 ısı yalıtım boyasının Kanepox Masticoat'a oranla 20 kat daha fazla birim direnç maliyetine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 1 : Yalıtım Malzemelerinin Birim Direnç Maliyeti Karşılaştırması

2.3 Isı Geçişi İçin Esas Alınan Sistem ve Hesaplama Yöntemi

Hesaplamalarda *TS EN 12241 - Bina Donanımları ve Endüstriyel Tesisatlar İçin Isıl Yalıtımı* standardında belirtilen hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Depo atmosfer ortamda olup, iç kısmındaki hava boşluğunun olduğu kısım ise kapalı ortam olarak değerlendirilecektir. Tankın ısı transferi bakımından incelenmesi için gerekli sistemi ve semboller *Şekil 1'*de verilmiştir.



Şekil 2 - Tankın Üst Tarafından Isı Kaybının Hesabı İçin Kurulan Enerji Dengesi

3 HESAPLAMALARDA KULLANILAN BAĞINTILAR

Bu bölümde kullanılacak bağıntılar verilecektir. Bu bağıntılar taşıma, iletim ve ısıma ısı geçişi denklemleri, muhtelif yerlerdeki taşınım katsayısı denklemleri ile ısı geçişi için kurulan enerji dengesi denklemlerini kapsamaktadır.

3.1 Kapalı Ortamda Sıcak Yüzeylere Ait Isı Taşınım Katsayıları

TS EN 12241 Bina veya endüstriyel tesisatlar da yalıtım standardına göre taşınım katsayıları;

- Kapalı ortam içindeki düşey levha için laminar akış ve doğal konveksiyon ($H^3 \cdot \Delta T \leq 10^3 \cdot K$) durumunda aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$\alpha_t = 1,32 \times \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{H}} \quad (3)$$

- Kapalı ortam içinde yatay levha ve yatay borular için ayrıca büyük çaplı küre depolar içinde kabaca kullanılabilecek ısı taşınım katsayısı türbülanslı akış için ($H^3 \cdot \Delta T > 10^3 \cdot K$) şartlarında ve doğal taşınım durumu için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\alpha_{idy} = 1,75 \times \sqrt[3]{\Delta T} \quad (4)$$

$$\Delta T = T_y - T_0 \quad (5)$$

Bu denklemlerde;

T_y : ortalama yüzey sıcaklığı (°C veya K)

T_0 : depo içindeki ortam sıcaklığı (°C veya K)

H : tankın yüksekliği veya çapı (m)

3.2 Tank Çatı Kısımında Dışarıda Isı Taşınım Katsayısı

Bina dışında yatay düz yüzeylerde için türbülanslı ($v.H \geq 8 \text{ m}^2/\text{s}$) akış için aşağıdaki denklem yardımıyla dış yüzey ısı taşınım katsayıları elde edilir.

$$\alpha_t = 5,76 \times \sqrt[5]{\frac{v^4}{H}} \quad (6)$$

v : Rüzgar hızı (m/s), (Bu çalışmada ortalama hız $20 \text{ km/h} = 5,555 \text{ m/h}$ alınmıştır.)

H : Tankın çapı (m)

3.3 Yüzeyden Işınım İle Isı Transferi

Yüzeyden ışınlama ısı geçişini hesaplayabilmek için kullanılan ışınlama eşdeğer ısı geçiş katsayısı için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$\alpha_{\text{ışınım}} = \left(\frac{\varepsilon \times \sigma}{\theta_y - \theta_0} \right) \times (\theta_y^4 - \theta_0^4) \quad (7)$$

θ : Kelvin cinsinden sıcaklığı

σ : Stefan-Boltzman sabiti ($5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

ε : Yüzey ışınlama katsayısı (Boyalı yüzey 0,8-0,9 arası, metal olmayan yüzeylerde 0,94 olarak alınır.)

ifade etmektedir. Yüzey ışınlama katsayısı bu çalışmada $\varepsilon=0,85$ olarak alınmıştır.

3.4 Tank Çatı Yüzeylerinde Meydana Gelen Isı Transferi

Tankın üst yüzeyinden geçen ısı miktarı, iç ortam hava ve dış ortam hava sıcaklıkları esas alınarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla tek bir seferde hesaplanabilir.

$$Q_{\text{kay}} = \frac{A \times (T_{\text{io}} - T_{\text{do}})}{\frac{1}{(\alpha_{\text{taş}} + \alpha_{\text{ışınım}})_i} + \frac{\varepsilon_d}{\lambda_d} + \frac{\varepsilon_{\text{yal}}}{\lambda_{\text{yal}}} + \frac{1}{(\alpha_{\text{taş}} + \alpha_{\text{ışınım}})_d}} \quad (8)$$

Herhangi bir yüzeyden taşıma ve ışımla geçen ısı miktarının toplamı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$Q_{\text{taş,ışınım}} = (\alpha_{\text{taş}} + \alpha_{\text{ışınım}}) \times A \times (T_y - T_{\text{do}}) \quad (9)$$

Depo çatısından kaybolan ısıların her bir katmandan geçişi aşağıdaki bağıntılar yardımıyla ifade edilir.

$$Q_{\text{kay}} = Q_{\text{iç yüz, taş+ışınım}} = Q_{\text{metal+yalıtım iletimle}} = Q_{\text{dış yüzey, taş+ışınım}} \quad (10)$$

Gerekli ifadeler yerine yazılırsa,

$$Q_{\text{kay}} = (\alpha_{\text{taş}} + \alpha_{\text{ışınım}})_i \times A \times (T_{\text{iy}} - T_{\text{io}}) = \left(\frac{\lambda_d}{e_d} + \frac{\lambda_{\text{yal}}}{e_{\text{yal}}} \right) \times A \times (T_{\text{iy}} - T_{\text{dy}}) = (\alpha_{\text{taş}} + \alpha_{\text{ışınım}})_d \times A \times (T_{\text{dy}} - T_{\text{do}}) \quad (11)$$

tankın çatısı için kararlı rejimde enerji dengesi elde edilir.

Bu bağıntılar incelendiğinde; tank iç hava sıcaklığı, tankın çatısı iç ve dış yüzey sıcaklıklarının belli olmadığı, iki yüzey sıcaklığı arasında iletimle ısı geçiş denklemi kullanılarak birbirine bağlanabildiği ve sonuçta üç bilinmeyen sıcaklık olduğu ve denklemlerin lineer olmadığı düşünüldüğünde enerji dengesi ve ilgili

denklemlerden bu sıcaklıkların (birini kabul ederek diğerlerinin) iterasyonla bulunabileceği görülmektedir. Bu hesaplamalarda mevcut durumda tank içi hava sıcaklığı, belirtilen ortalama dış ortam sıcaklığında çalışma şartlarında tank içinden ölçülmüş olup, diğer yalıtım durumları içinde belirli bir yaklaşımla kabul edilmiştir. Daha sonrada iki bilinmeyen yüzey sıcaklıklarının yukarıda verilen denklemlerin tamamını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilerek (iterasyonla), hesaplamalarda %2 ‘den daha düşük hatayla yaklaşım sağlıyorsa çözümün tamamlandığı varsayılmıştır.

Çatısı yalıtımsız durumdaki tank hakkındaki veriler kullanılarak, enerji dengesinden iterasyonla ara yüzey sıcaklıkları bulunup, tankın ısı kaybı belirlenecek, daha sonrada aynı kalınlıklarda farklı markalara ait yalıtım boyları ve 10 cm cam yünü kullanılması durumlarında bu sıcaklıklar belirlenip, bunlara karşılık gelen ısı kayıpları hesaplanacaktır. Daha sonra da ekonomik hesaplamalar yapılarak sonuçlar değerlendirilecektir.

3.5 Çözümlerde Yapılan Kabuller

- Hesaplamalar kararlı rejimde çalışma durumu için yapılmıştır.
- Tavana gelen güneş radyasyonu ile enerji ihmal edilmiştir. (Kocaeli’de güneşlenme oranı düşük olduğu için.)
- Hesaplamalar Kocaeli için ortalama yıllık dış hesap sıcaklığı (14,9 °C) için yapılmıştır.
- Tankın yalıtılmış yan yüzey iç sıcaklığı, tank içi sıvı sıcaklığına ($T_{yy}=T_{sıvı}$) eşit alınmıştır.

3.6 Termal Hesaplamaların Sonuçları

Yukarıda ilgili denklemler esas alınarak yapılan çözümlerin sonuçları **Tablo 2’**de depo iç ortam hava, depo içi iç yüzey, depo dış çatı yüzey sıcaklıkları, hesaplanan birim yüzey için ortalama ısı kayıpları ve çatı yüzeyi esas alınarak toplam ısı kayıpları her bir durum için özetlenmiştir.

Tablo 2: Tank için farklı yalıtım malzemeleri ve yalıtım kalınlıklarında termal hesaplama sonuçları

Yalıtım Kalınlığı (mm)	T_i (°C)	T_{iy} (°C)	T_{dy} (°C)	Çatı İç Yüzeyden Gelen Isı (W/m ²)	Çatı Dış Yüzeyden Giden Isı (W/m ²)	Yaklaşım Hatası (%)	Çatıdan Ortalama Isı Kaybı (W/m ²)	Çatıdan Toplam Isı Kaybı (W)
Yalıtımsız	42,70	25,95	25,93	198,155	199,403	0,630	198,780	37.994,62
1,00 (Yal. Boyası)	45,00	39,85	18,36	62,319	61,783	0,865	62,052	11.860,62
2,00 (Yal. Boyası)	46,00	42,80	17,01	37,385	37,740	0,941	37,563	7.179,79
3,00 (Yal. Boyası)	46,80	44,20	16,43	26,843	27,270	1,566	27,060	5.172,23
100,00 (Cam Yünü)	47,50	47,50	15,53	11,189	11,232	0,380	11,211	2.142,87

Not: Yalıtım Boyası olarak birim direnç maliyeti en düşük olan Isollat-02 hesaplamalarda kullanılmıştır.

Tablo 2’den görüleceği gibi çözümlerde belirtilen enerji dengesi için tüm çözümlerde % 2 hatanın altında kalmıştır. Ayrıca tankın çatısının yalıtımsız durum için ısı kaybının oldukça yüksek olduğu ve bunun için acil önlem alınması gerektiği görülmektedir.

4. EKONOMİK DEĞERLENDİRME

Bu tür enerji tasarrufu projeleri için yapılacak yatırımın elde edilecek kazançlara değip değmeyeceği ve yatırımın karlı olup olmayacağına karar verilmesi için ekonomik değerlendirilme yapılması gerekmektedir. Bu bildiride basit geri ödeme süresi yöntemi kullanılacak olup, bu yöntemde gerekli işletme ve yatırım maliyetlerinin nasıl hesaplanacağı aşağıdaki bölümlerde detaylı verilmiştir.

4.1 Tankın Tavanından Isı Kaybından Dolayı Yıllık Yakıt Sarfiyatı ve İşletme Maliyeti

Isı kaybının karşılanması için ısıtıcıların yükünü karşılamak için sarf edilen yıllık yakıt miktarı aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilir.

$$B_{yakıt} = \frac{\dot{Q}_{kayıp} \times t}{H_0 \times \eta} \quad (12)$$

Bu yakıtın tüketilmesine karşılık olan yıllık işletme maliyeti, işletmenin beyan ettiği birim yakıt maliyeti esas alınarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilir.

Bu yakıtın tüketilmesine karşılık olan yıllık işletme maliyeti, aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilir.

$$F_{yakıt} = B_{yakıt} \times f \quad (13)$$

Yukarıdaki bağıntılarda kullanılan semboller,

H_0 : Doğal gazın alt ısı değeri (34.500 kJ/sm³)

t: yıllık çalışma süresi (8000 h/yıl)

$B_{yakıt}$: yıllık yakıt tüketimi (sm³/yıl)

f: yakıtın birim fiyatı (31.08.2025 tarihi için vergiler hariç 15,14 TL/ sm³)

η : kazan verimi (% 90) (şebeke kaybı da dahil)

olarak tanımlanmışlardır.

$$G\ddot{O}S = \frac{F_{yat}}{F_{tas}} \quad (14)$$

Gerekli hesaplama sonuçları **Tablo 4'**de özetlenmiştir. **Tablo 4'**den görüleceği gibi yalıtım malzemesi olarak cam yününün kullanımı en kısa (0,54 yıl ya da yaklaşık 6,5 ay) geri ödeme süresi elde edilmektedir. Oysa 2,00 mm kalınlığında yalıtım boyası kullanılması durumunda yaklaşık 2,5 cm cam yününe eşdeğer yalıtım yapılmasına karşın geri ödeme süresi 1,27 yıl olarak elde edilmektedir.

Tablo 4: Tankın tavanı için farklı yalıtım durumlarında birim ve toplam yatırım maliyetleri, tasarruf miktarı bedeli ve geri ödeme süreleri

Yalıtım Kalınlığı (mm)	İşçilik Dahil Birim Yatırım Maliyeti (m ² /TL)	Toplam Yatırım Maliyeti (%20 KDV Dahil) (TL)	Tasarruf Miktarı Bedeli (%20 KDV Dahil F_{tas} (TL/yıl)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
100,00 (Cam Yünü)	1.445,46	331.542,26	604.277,99	0,55
1,00 (Yal. Boyası)	1.594,40	365.704,34	440.481,74	0,83
2,00 (Yal. Boyası)	2.887,11	662.208,35	519.379,04	1,27
3,00 (Yal. Boyası)	4.205,37	964.577,30	553.223,65	1,74

Not: Yalıtım Boyası olarak birim direnç maliyeti en düşük olan Isollat-02 hesaplamalarda kullanılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan hesaplamalar ve elde edilen sonuçlardan aşağıdaki değerlendirmelerin yapılabilir;

- Örnek tankın yalıtılmamış çatısından olan ısı kaybının yaklaşık 37.994,62 W = 38 kW olduğu,
- Örnek tankın 10,00 cm cam yünüyle yalıtılmış yanal yüzeyinden olan ısı kaybının yaklaşık 8.087,64 W = 8,088 kW olduğu,

- Örnek tankın toplam ısı kaybının ($38+8,088= 46,088$ kW) olduğu ve tankın yalıtımsız çatısının bu toplam ısı kaybının yaklaşık % 82 sine karşılık geldiği ve yalıtılması durumunda ciddi enerji tasarrufu yapılabileceği,
- Pilot çalışma olarak uygulanması planlanan tank tavanının 2,00 mm yalıtım boyası ile kaplanması durumunda yılda 28.582,04 Sm³ doğal gaz, tasarrufu yapmasına karşılık, yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin 1,27 yıl elde edildiği,
- Tank tavanının 10,00 cm cam yünü yalıtılması durumunda yılda 33.254,52 Sm³ doğalgaz, tasarrufu yapılmasına karşılık, yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin 0,55 yıl elde edildiği,
- Cam yünü yalıtımının daha avantajlı olduğu fakat uygulama zorluğunun aşılması gerektiği,

Terminalde 40 °C ve üstü sıcaklığa ısıtılan farklı büyüklükte bulunan diğer depoların yer aldığı düşünülürse depo çatılarının çok iyi yalıtımlı hale gelmesi sonucu depoların ısıtılmasından dolayı ciddi anlamda yakıt tasarrufu sağlanabileceği,

- Tesiste yeni yapılacak depoların veya yalıtımı eskiyen depoların yalıtımının yenilenmesi durumunda depo yan yüzeyleri ve çatısı için 20 cm cam yünü kalınlığı ve daha üstü yalıtım kalınlıklarının da değerlendirilmesi gerektiği,
- Eğer yalıtım boyası kaplaması tercih edilecekse, özellikle güneş radyasyonuna uzun süre dayanımı konusunda yalıtım yapıldıktan sonra belirli bir süre özellikle yaz sezonunu takiben tankın ısı kaybının, ısıtıcının devreye giriş çıkış sürelerinin ve varsa enerji tüketim değerleri üzerinden izlenmesi gerektiği,

sonuçlarına varılmıştır.

6. KAYNAKÇA

1. TS EN 12241: Bina ve Endüstriyel Tesislerde Yalıtım Standardı, 2008 (E).
2. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı Enerji Verimliliği Yönetmeliği, (28097 Sayılı 27.11.2011 Tarihli Yönetmelik)
3. Türkiye'nin Enerji Görünümü, oda raporu 2024, Makine Mühendisler Odası, Yayın no: MMO/758,2024.
4. Örneklerle Isı Transferi, Sadık Kakaç, ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Yayın No:27, Ankara,
5. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Dördüncü Basımdan çeviri, Literatür Yayınevi, İstanbul, 2003,
6. Heat Transfer, Adrien Bejan, John Wiley&Sons, Inc., 1993.
7. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceleristatistik.aspx?k=undefined&m=KOCAELI> (10/10/2024 erişim tarihi)
8. R. Christodoulaki, I. S. Akmandor, O. Bayerc, U. Desideri, L. Ferrari, G. F. Frate and V. Drosou On the design of a solar heat storage tank at 120°C, International Journal Of Sustainable Energy 2023, VOL. 42, NO. 1, 1278–1296, <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2246080>.
9. P. Armstrong, D. Ager, I. Thompson, M. McCulloch Improving the energy storage capability of hot water tanks through wall material specification, Energy, 78 (2014) 128-140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.061>
10. İ. T. Öztürk, H. Karabay, E. Bilgen, Thermo-economic optimization of hot water piping systems: A comparison study, Energy, 31(2006) 2094-2107, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.008>

11. A. Simpson, R. Fitton, I.G. Rattigan, A. Marshall, G. Parr, W. Swan ,Thermal Performance of Thermal Paint and Surface Coatings in Buildings in Heating Dominated Climates, *Energy & Buildings* 197 (2019) 196–213
12. I. V. Dolotovskii, N. V. Dolotovskaya,, E. A. Larin, and A. V. Len'kova Increasing the Energy Efficiency of Heating and Cooling Systems for the Tank Farms of Oil and Gas Enterprises *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 52, Nos. 11–12, March, 2017 (Russian Original Nos. 11–12, Nov.–Dec., 2016)