

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NEREDEYSE SIFIR ENERJİLİ BİR BİNANIN SAYISAL,
DENEYSEL VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Muhammed GÜR

Doktora Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**NEREDEYSE SIFIR ENERJİLİ BİR BİNANIN SAYISAL, DENEYSEL
VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Tez Yazarı
Muhammed GÜR

Danışman
Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP

TEMMUZ 2025
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Neredeyse Sıfır Enerjili Bir Binanın Sayısal, Deneysel ve Termodinamik Analizi
Yazarı:	Muhammed GÜR
İlk Teslim Tarihi:	16.06.2025
Savunma Tarihi:	16.07.2025

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ahmet KOCA Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Gülşah ÇAKMAK Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Zafer GEMİCİ Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Neredeyse Sıfır Enerjili Bir Binanın Sayısal, Deneysel ve Termodinamik Analizi ” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

16.07.2025

Muhammed GÜR



ÖNSÖZ

Tez konum olan “Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar” hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilir bina tasarımı açısından son derece önemli bir araştırma alanıdır. Bu çalışmanın önemi, enerji tüketimini minimize ederek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını artırmasıdır. Ancak, binaya entegre fotovoltaiik sistemlerin tasarımı ve performans analizleri oldukça karmaşık ve çok yönlü süreçler gerektirmektedir. Bu bağlamda, sistemlerin hem sayısal hem de deneysel analizlerinin yapılması, önemli teknik zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelme konusundaki motivasyonum, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunma ve yenilikçi enerji çözümleri geliştirme isteğimidir.

Bu çalışmada, özellikle veri toplama, analiz süreçleri ve tez yazımı sırasında büyük desteklerini esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Hakan Fehmi ÖZTOP’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, deney setinin ortaya çıkmasında çok büyük emekleri olan Dr. Öğr. Üye. Halil İbrahim YAMAÇ’a, Muhammed ÜSTÜN’e ve Arş. Gör. Hakan COŞANAY’a çok teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde üzerimde emeği çok olan annem, kardeşim ve rahmetli babama şükranlarımı sunuyorum. Tezimin hazırlanması sürecinde gösterdiği sabır ve destekleri için arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan eşim Eda BAKIR GÜR’e teşekkür ederim. Üniversitemiz bünyesinde bina tahsisi ve diğer tüm imkanları kullanmamda destek veren F.Ü. Rektörü Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ’a, Rektör Yardımcısı Prof. Dr. Mehmet YILMAZ’a ve Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanı Mehmet İNALLI’ya destekleri için çok teşekkür ederim.

Tez araştırmalarımın başlamasından itibaren TÜBİTAK-BİDEB’in 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında, 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programından yararlanmış bulunmaktayım. 2211-C Yurt İçi Öncelikli alanlar Doktora Burs Programı kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı birimine teşekkür ederim. Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF. 23.01 ve ADEP 22.05 protokol numaralı projeler ile desteklenmiştir.

Muhammed GÜR
ELAZIĞ, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. SIFIR ENERJİLİ BİNALAR.....	5
2.1. Sıfır Enerji Binaların Tanımlanması ve Tasarım Stratejileri	9
2.1.1. Sıfır Enerjili Binaların Tanımlanması.....	9
2.1.2. Sıfır Enerjili Binaların Tasarım Stratejileri.....	13
2.2. Pasif Güneş Enerji Sistemleri.....	14
2.2.1. Güneş Kaynaklı Isının Önlenmesi	15
2.2.2. Bina Şekli ve Yönelimi.....	16
2.2.3. Gölgelemenin Önemi.....	18
2.2.4. Gün Işığından Yararlanma Yaklaşımları	20
2.2.5. Soğurulan Güneş Enerjisinin Modülasyonu	25
2.3. Termal Enerji Depolama	25
2.4. Faz Değiştiren Malzemeler	26
2.4.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması	28
2.5. Binaya Entegre Fotovoltaik Sistemler.....	30
2.5.1. Fotovoltaik Teknoloji	30
2.5.2. Fotovoltaik Sistemlerde Sıcaklık Etkisi	34
2.6. Binaya Entegre Fotovoltaik Ürünler	35
2.7. Solar-Termal Sistemler	36
2.7.1. PV/T Sistemler	37
2.7.2. Güneş Kolektörleri	38
3. MATERYAL VE METOT	40
3.1. Kullanılan Sistemler ve Malzemeler	41
3.1.1. Çatı Üzeri PV/T Panel Sistemi	41
3.1.2. FDM Destekli Yerden Isıtma Sistemi.....	43
3.1.3. Cephe Kaplama (Façade) Sistemi.....	45
3.1.4. Binaya Entegre Yarı Saydam PV Panel Sistemi	46
3.1.5. Enerji Depolama ve Yönetim Sistemi	47
3.2. Kullanılan Ölçüm Ekipmanları	51
3.2.1. Veri Derleyici	51
3.2.2. Isıl Çiftler.....	52
3.2.3. Işınım Ölçer	54
3.2.4. Akıllı Enerji Ölçüm Sensörü	55
3.2.5. Inverter ve Batarya Sistemi	55
3.3. Sayısal Çalışma	57

3.3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	57
3.3.2. Sonlu Hacimler Yöntemi	58
3.3.3. Ansys Fluent Modülü	59
3.3.4. Fiziksel Model	59
3.3.5. Sayısal Çalışmada Kullanılan Modelin Ağ Yapısı	65
3.4. Termodinamik Analiz	69
3.4.1. Enerji Analizi.....	69
3.4.2. Ekserji Analizi	70
3.4.3. Eksergoekonomik Analiz.....	71
3.4.4. Çevresel Analiz.....	74
3.5. Belirsizlik Analizi	75
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	77
5. SONUÇLAR.....	125
ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	A

ÖZET

Neredeyse Sıfır Enerjili Bir Binanın Sayısal, Deneysel ve Termodinamik Analizi

Muhammed GÜR

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2025, Sayfa: xiii + 135

Bu tez çalışması kapsamında, neredeyse sıfır enerjili bina konsepti doğrultusunda tasarlanmış ve inşa edilmiş deneysel bir yapının; yarı saydam fotovoltaiik (PV), fotovoltaiik-termal kolektörler (PV/T) ve faz değıştiren malzeme (FDM) destekli yerden ısıtma sistemleri, sayısal, deneysel ve termodinamik olarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırmanın temel amacı, entegre yenilenebilir enerji sistemlerinin elektrik ve ısı üretim performansını ortaya koymak, iç ortam konforuna katkısını değerlendirmek ve enerji bağımsızlığı potansiyelini belirlemektir. Sistem, Elazığ ilinde gerçek iklim koşullarında bir yıl boyunca çalıştırılmış; ölçümler beş dakikalık aralıklarla alınmıştır. Elde edilen verilere göre, sistem yıllık 4335.8 kWh elektrik ve 8671 kWh ısı enerjisi üretmiş, toplamda 3033 kWh’lik bir enerji tüketimi gerçekleştirmiştir. Kış aylarında cephe kaplama sistemine entegre yarı saydam PV paneller sayesinde dış ortam sıcaklığına karşı iç mekânda pasif bir sıcaklık farkı oluşmuş ve bu durum, binanın soğuk iklim koşullarından korunmasını sağlamıştır. Ayrıca FDM destekli yerden ısıtma sistemi sayesinde, geçiş FDM etkisiyle FDM’siz duruma kıyasla iç ortam sıcaklığında 4 °C’ye kadar artış gözlemlenmiştir; böylece ek enerji girdisi olmadan güneş destekli ısıtma sağlanabilmiştir.

Sistem, yıllık bazda %143 oranında enerji öz yeterliliği sağlamıştır. PV’lerin ortalama enerji verimi %7.45; PV/T sistemin elektrik verimi %13.9, ısı verimi %35.4, toplam verimi %49.3’tür. Ekserjiye dayalı verimlilikler PV için %6.89, PV/T için elektrik verimi %13.9, ısı verimi %9.4 olarak hesaplanmıştır. Enerji geri ödeme süresi 3.5 yıl, finansal geri ödeme süresi ise 8.9 yıl olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Neredeyse sıfır enerjili bina, Yarı saydam PV, PV/T destekli yerden ısıtma sistemi, Termodinamik analiz, Enerji verimliliği

ABSTRACT

Numerical, Experimental, and Thermodynamic Analysis of a Nearly Zero Energy Building

Muhammed GÜR

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

July 2025, Pages: xiii + 135

In this thesis study, a comprehensive numerical, experimental and thermodynamic analysis was conducted on a test structure designed and constructed in accordance with the nearly zero energy building (nZEB) concept. The system integrates semi-transparent photovoltaic (PV) modules, photovoltaic-thermal (PV/T) collectors, and a phase change material (PCM)-assisted underfloor heating system. The primary objective of the research is to evaluate the electricity and thermal energy production performance of these integrated renewable energy systems, assess their contribution to indoor thermal comfort, and determine their potential for energy independence. The system was operated under real climatic conditions in the city of Elazığ for one year, with measurements recorded at five-minute intervals. According to the data obtained, the system produced 4335.8 kWh of electrical energy and 8671 kWh of thermal energy annually, while the total annual energy consumption was 3033 kWh. During the winter season, the semi-transparent PV modules integrated into the façade cladding contributed to the formation of a passive indoor-outdoor temperature differential, thereby protecting the building from harsh cold weather conditions. Additionally, during the transitional seasons, the PCM-supported underfloor heating system increased indoor temperature by up to 4 °C compared to the system without PCM, providing solar-assisted heating without the need for supplementary energy input.

The system achieved an annual energy self-sufficiency rate of 143%. The average energy efficiency of the PV modules was calculated as 7.45%, while the PV/T system exhibited an electrical efficiency of 13.9%, a thermal efficiency of 35.4%, and a total efficiency of 49.3%. The exergy-based efficiencies were determined as 6.89% for PV modules, and for the PV/T system, 13.9% (electrical) and 9.4% (thermal). The energy payback period was found to be 3.5 years, while the financial payback period was calculated as 8.9 years.

Keywords: Nearly Zero Energy Building, Semi-transparent PV, PV/T-assisted underfloor heating, Thermodynamic analysis, Energy efficiency

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 2010 Yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve AB’de konut ve hizmet binalarının enerji kullanım alanları	6
Şekil 2.2. 2010 Yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin Ve AB’de konutlarda kullanılan enerji kaynakları	6
Şekil 2.3. Yeşil ve sıfır enerjili binaların planlanan beş aşaması.....	9
Şekil 2.4. SEB’ler için üç ana tasarım adımı	10
Şekil 2.5. Solar yükseklik, azimut ve zenit açılarının gösterimi.....	17
Şekil 2.6. Gölgeleme yaklaşımlarının gösterimi.....	19
Şekil 2.7. Cephe öz-gölgeleme özelliğine sahip bir bina.....	20
Şekil 2.8. Işık taşıma sisteminin uygulanmış hali.....	23
Şekil 2.9. Isı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması.....	25
Şekil 2.10. Isıl enerji depolama yöntemleri	26
Şekil 2.11. FDM’lerde faz değişim süreçleri.....	27
Şekil 2.12. FDM’lerin uygulama alanları	28
Şekil 2.13. FDM’lerin sınıflandırılması	29
Şekil 2.14. PV teknolojilerinin sınıflandırılması	33
Şekil 2.15. PV paneli oluşturan katmanların gösterimi	34
Şekil 2.16. BIPV sistemlerinin sınıflandırılması	36
Şekil 2.17. PV/T sisteminin detaylı görünümü.....	38
Şekil 2.18. Güneş kolektörlerinin genel sınıflandırması.....	39
Şekil 3.1. Deneyisel çalışmanın yapıldığı bölgenin konumu	40
Şekil 3.2. Çatı üstü modifiye edilmiş PV/T panel sistemi ve bağlantı detayları.....	42
Şekil 3.3. Yerden ısıtma ve FDM destekli ısı depolama sisteminin uygulama aşamaları	44
Şekil 3.4. PVC profillerden oluşturulan façade kaplama sistemi ve PV panellerle bütünleşik görünümü. ..	46
Şekil 3.5. Binaya entegre edilen yarı saydam PV paneller	47
Şekil 3.6. Elektrik bağlantılarının gösterimi	48
Şekil 3.7. Veri derleyici (Datalogger)	52
Şekil 3.8. Isıl çiftlerin görüntüleri	53
Şekil 3.9. Işınım ölçer.....	54
Şekil 3.10. Akıllı enerji ölçüm sensörü	55
Şekil 3.11. a) Inverter ve b) bataryanın görüntüleri.....	57
Şekil 3.12. Fiziksel modelin a) izometrik, b) arka, c) ön ve d) PV/T panelin detay önden görünümü	63

Şekil 3.13. Yerden ısıtma sistemin a) izometrik ve b) üstten görünüşü.....	64
Şekil 3.14. PV/T kolektörün ağ yapısı.....	65
Şekil 3.15. PV/T analizi için ağ kullanılacak ağ yapısının doğrulanması.....	66
Şekil 3.16. PV/T için sayısal ve deneysel çalışmanın doğrulanması	66
Şekil 3.17. Oda ve yerden ısıtma sisteminin fiziksel model görüntüsü	67
Şekil 3.18. Oda ve yerden ısıtma sisteminin ağ yapısı	68
Şekil 3.19. Oda hacminin tam orta noktasındaki sıcaklık değerleri için sayısal ve deneysel çalışmanın doğrulanması.....	69
Şekil 4.1. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen ısıtım miktarı.....	77
Şekil 4.2. Aylara göre zamana bağlı ölçülen dış ortam sıcaklığı.....	78
Şekil 4.3. Aylara göre PV ve PV/T’de üretilen enerji miktarı.....	79
Şekil 4.4. Aylara göre üretilen ve tüketilen enerji miktarının karşılaştırılması	80
Şekil 4.5. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen PV/T’ye giren su sıcaklığı	81
Şekil 4.6. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen PV/T’den çıkan su sıcaklığı	82
Şekil 4.7. Aylara göre zamana bağlı doğu cephede bulunan yarı saydam PV’lerin sıcaklığı.....	83
Şekil 4.8. Aylara göre zamana bağlı güney cephede bulunan yarı saydam PV’lerin sıcaklığı	83
Şekil 4.9. Aylara göre zamana bağlı batı cephede bulunan yarı saydam PV’lerin sıcaklığı	84
Şekil 4.10. Ocak ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	85
Şekil 4.11. Şubat ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	86
Şekil 4.12. Mart ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması .	86
Şekil 4.13. Nisan ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	87
Şekil 4.14. Mayıs ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	87
Şekil 4.15. Haziran ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	88
Şekil 4.16. Temmuz ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	89
Şekil 4.17. Ağustos ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	89
Şekil 4.18. Eylül ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	90
Şekil 4.19. Ekim ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	90
Şekil 4.20. Kasım ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	91
Şekil 4.21. Aralık ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması	91
Şekil 4.22. I. yasa çerçevesinde yapılan enerji verimi sonuçları	93
Şekil 4.23. I. yasa çerçevesinde yapılan toplam enerji verimi sonuçları	94

Şekil 4.24. II. yasa çerçevesinde yapılan ekserji verimi sonuçları	96
Şekil 4.25. II. yasa çerçevesinde yapılan toplam ekserji verimi sonuçları	97
Şekil 4.26. Eksergoekonomik analizde %5 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi	100
Şekil 4.27. Eksergoekonomik analizde %10 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi	101
Şekil 4.28. Eksergoekonomik analizde %15 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi	101
Şekil 4.29. Eksergoekonomik analizde %20 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi	102
Şekil 4.30. Eksergoekonomik analizde %5 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi	103
Şekil 4.31. Eksergoekonomik analizde %10 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi	104
Şekil 4.32. Eksergoekonomik analizde %15 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi	104
Şekil 4.33. Eksergoekonomik analizde %20 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi	105
Şekil 4.34. Çevresel analize göre aylık önlenecek CO ₂ miktarı	107
Şekil 4.35. Çevresel analize göre aylık önlenecek CO ₂ miktarına bağlı elde edilen tasarruf miktarı.....	108
Şekil 4.36. Ekim ayında bir gün için PV/T panelde oluşan su sıcaklıklarının ısı eş eğrisi	110
Şekil 4.37. Ekim ayında yerden ısıtma sisteminde FDM'nin oda sıcaklığına etkisi.....	112
Şekil 4.38. Saat 00:00 ile 04:00 arasında FDM'li durum ve FDM'siz durum için oda sıcaklıklarının değişimi	114
Şekil 4.39. Saat 12:00 ile 20:00 arasında FDM'li durum ve FDM'siz durum için oda sıcaklıklarının değişimi	115
Şekil 4.40. Sayısal çalışmada Ekim ayında FDM'li yerden ısıtma sisteminde bulunan FDM'nin zamana bağlı olarak sıvı fraksiyonu.....	117
Şekil 4.41. Sayısal çalışmada Ekim ayında FDM'li yerden ısıtma sisteminde bulunan FDM'nin zamana bağlı olarak sıvı fraksiyon eş eğrileri.....	119
Şekil 4.42. Temmuz ayında batı cephede bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri	121
Şekil 4.43. Temmuz ayında güney cephede bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri	122
Şekil 4.44. Temmuz ayında doğu cephede bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri	123

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. NSEB kavramı için çoklu tanım çerçeveleri.....	12
Tablo 3.1. RT22HC FDM'nin termofiziksel özellikleri.....	43
Tablo 3.2. Baz yüklerin hesaplanması ve tüketim değerleri	49
Tablo 3.3. Aylara göre toplam elektrik tüketiminin dağılımı.....	50
Tablo 3.4. Keithley 2701 veri derleyici teknik özellikleri	51
Tablo 3.5. Sistemde bulunan ısıtıcıların yerleştirildikleri yerler.....	52
Tablo 3.6. Sistem bileşenleri maliyet tablosu	73
Tablo 4.1. Ölçülen değerlerin belirsizlik analizi	92
Tablo 4.2. Sistemin eksergoekonomik analiz sonuçları	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Bina yüzey alanı (m ²)
B	: Gün açısı (°)
C_p	: Özgül ısı kapasitesi (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
C_s	: Sabit yatırım maliyeti (USD)
E_g	: Gömülü enerji (kWh)
E_x	: Ekserji (kWh)
$E_{x,güneş}$	: Güneş ekserji akısı (kWh)
G	: Yatay global güneş ışıınımı (W/m ²)
h	: Saat açısı (°)
HV	: Hurda değeri (USD)
i	: Yıllık faiz oranı
L	: Sistem ömrü (yıl)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
N	: Ay içindeki gün sayısı
n_{PV}	: PV panel sayısı (adet)
$n_{PV/T}$	: PV/T panel sayısı (adet)
$P_{elektrik}$	: PV modülünün ürettiği elektrik gücü (W)
HV	: Hurda değeri (USD)
$\dot{Q}_{termal}$	: Akışkana aktarılan ısı gücü (W)
T	: Sıcaklık (°C)
T_0	: Referans ortam sıcaklığı (°C)
α	: Güneş yükseklik açısı (°)
β	: Panel eğim açısı (°)
γ	: Güneş azimut açısı (°)
δ	: Sapma açısı (°)
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
η	: Verim
η_{ex}	: Ekserji verimi
$\eta_{ex,toplam}$	: Toplam ekserji verimi
η_{PV}	: PV'nin elektriksel verimi
$\eta_{PV/T}$	: PV/T'nin elektriksel verimi
η_{termal}	: Isıl verim
θ	: Güneş zenit açısı (°)

Kısaltmalar

AC	:Alternatif Akım
BIPV	:Binaya Entegre Fotovoltaik
BIPV/T	:Binaya Entegre Fotovoltaik/Termal
BYS	:Batarya Yönetim Sistemi
CIGS	:Bakır İndiyum Galyum Diselenid
COP	:Performans Katsayısı
DC	:Doğru Akım
DSSCs	:Boya Duyarlı Güneş Hücreleri
EÜF	:Enerji Üretim Faktörü
FDM	:Faz Değiştiren Malzeme
FGÖ	:Finansal Geri Ödeme Süresi
GIF	:Gün Işığı Faktörü
HOE	:Holografik Optik Eleman
HVAC	:Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
LED	:Işık Yayan Diyot
MPPT	:Maksimum Güç Noktası Takibi
NSEB	:Net Sıfır Enerjili Bina
nSEB	:Neredeyse Sıfır Enerji Bina
FDM	:Faz Değişim Malzemesi
PDO	:Pencere-Duvar Oranı
PV	:Fotovoltaik
PV/T	:Fotovoltaik-Termal Hibrit Sistem
SEB	:Sıfır Enerjili Bina
SGKF	:Sermaye Geri Kazanım Faktörü
SHY	:Sonlu Hacimler Yöntemi
UV	:Ultraviyole
VOC	:Açık Devre Gerilimi
YDDV	:Yaşam Döngüsü Dönüşüm Verimi
YEM	:Yıllık Eşdeğer Maliyet

1. GİRİŞ

Son yıllarda, artan nüfus ve hızla gelişen sanayileşme süreci, enerji gereksinimlerinde önemli bir artışa neden olmuştur. Küresel çapta hızla yükselen çevre kirliliği ve fosil yakıtların sınırlı olduğu gerçeği, insanları enerji tüketiminde daha bilinçli olmaya ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye zorlamaktadır. Elektrik enerjisi üretimi, sanayi, taşımacılık ve bina sektörlerinde sıfır sera gazı emisyonuna yönelik eğilimler hızla artarken, küresel ısınmayı 2°C'nin altında (tercihen 1,5°C'nin altında) tutmak için daha fazla önlem alınması gerekmektedir. Bu amaçla, fosil yakıt teşviklerinin kaldırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranının artırılması ve spesifik yenilenebilir enerji hedeflerinin belirlenmesi gibi politikalar uygulanmalıdır [1]. Bina sektöründe enerji tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması büyük önem taşımaktadır. Sıfır Enerjili Binalar (SEB), enerji verimliliği yüksek, sürdürülebilir ve düşük karbon salımlı yapılar olarak öne çıkmaktadır. Bu binalar, enerji tüketimini minimize ederken, ihtiyaç duydukları enerjiyi büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayarak enerji bağımlılığını azaltmayı amaçlar. Bu yaklaşım, enerji maliyetlerini düşürürken, çevresel etkileri de minimize eder. Dünya genelinde enerji tüketiminin %40'ından fazlası binalarda gerçekleşmektedir ve bu oran, kentsel alanlarda daha da yüksektir. Avrupa Birliği ülkelerinde bina sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmakta ve enerji tüketimi ile doğru orantılı olarak genişlemektedir. Türkiye'de ise bina sektörü, toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %32'sini oluşturmaktadır ve bu oran, sanayi ve ulaşım sektörlerinden daha yüksektir [2]. Bu nedenle, enerji verimliliği yüksek binaların inşa edilmesi ve mevcut binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi, hem enerji tasarrufu sağlamak hem de sera gazı emisyonlarını azaltmak için kritik öneme sahiptir [3]. Yaklaşık SEB'lerin temel amacı, enerji tüketimini minimum seviyede tutarken, yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanarak enerji ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bu binalar, yüksek yalıtım, enerji verimli sistemler ve akıllı bina teknolojileri ile donatılarak enerji tüketimini azaltır. Aynı zamanda, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyi kullanarak, dışa bağımlılığı azaltır ve çevresel etkileri minimuma indirir. Türkiye, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımına yönelik çeşitli politikalar geliştirmiştir. 2022 yılında, Türkiye, Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB) tanımını literatüre katmış ve bu binaların enerji performans sınıfının B veya daha iyi olmasını, ayrıca birincil enerji ihtiyacının en az %10'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasını zorunlu kılmıştır. Bu oran, 2025 yılı itibarıyla %5 olarak uygulanacaktır. Ayrıca, 2000 m² ve üzeri yapı inşaat alanına sahip binaların nSEB standartlarına uygun olarak inşa edilmesi gerekmektedir. nSEB'lerde enerji verimliliğini artırmak ve yenilenebilir enerji kullanımını maksimize etmek amacıyla BIPV/T sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. BIPV/T sistemler, binaların çatısına, cephesine veya diğer uygun yüzeylerine entegre edilerek, hem

elektrik hem de ısı enerjisi üretimi sağlar. Bu sayede, binaların enerji ihtiyacı yerinde karşılanarak, enerji maliyetleri düşürülür ve karbon salınımı azaltılır.

Elarga vd. [4] bir çift cidarlı cephede, geleneksel PV panel ve FDM'den oluşan sistemin performansını araştırmışlardır. Çalışmada sistemin dinamik termal davranışını simüle etmek için fiziksel ve matematiksel bir model geliştirilmiş ve çözümün performansını değerlendirmek için farklı iklimler (Venedik, Helsinki ve Abu Dabi) için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak aylık soğutma enerjisi talebinde %20-30 aralığında bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Yapılan çalışma sadece matematiksel olarak modellenmiş olup proje önerisinde ki yarı saydam PV uygulaması yerine geleneksel PV kullanılmıştır ve entegre bir sistem olmadığı halde enerji ihtiyacını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Kant vd. [5] üç farklı FDM için hava koşullarının etkisine bağlı olarak binalarda sıfır enerji yaklaşımına uygun olacak bir sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada FDM kalınlığı, hava boşluğu kalınlığı ve PV/T / FDM ile beton duvar arasındaki hava kütle akış hızının PV panel enerji üretimi üzerindeki etkisini ve havalandırılmalı sistem için havayla çıkarılan enerjinin normal bir binaya göre çok daha avantajlı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma sadece sayısal olarak modellenmiş olup incelenen parametre sadece FDM'nin kalınlığı ve hava ventilasyon tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. Guldentops vd. [6] pasif güneş enerjisi dış cephe tasarımlarının konutların sıfır enerji yaklaşımına etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Pasif güneş enerjisi sistemlerinin binaların enerji tüketimini azaltmasında önemli bir etkisinin olduğu çok açık bir şekilde görülmüştür. Ayrıca bu sistemlerin hem yaz hem kış koşullarında önemli avantajlar sağladığı açıkça gözlemlenmiştir. Sotehi vd. [7] net sıfır enerjili bir bina elde etmek için bir hibrit PV/T su güneş kolektörü kullanarak bir güneş enerjili damıtma cihazı aracılığıyla tatlı su üretme olasılığını incelemektir. Pasif güneş enerji sistemlerinin önemini göstermek için Boussaâda şehrinde inşa edilen bir deney düzeneğini Ouargla şehri iklimi altında incelenmiştir. Sonuçlar, ısıtma enerjisi ihtiyaçlarını azaltmak için pasif güneş enerjisi tekniklerinin kullanılmasının elde edilen güneş ışınlamına bağlı olarak oluşturulan prototipin yıllık evsel sıcak su, klima, ısıtma, aydınlatma ihtiyaçlarındaki maliyeti önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada sadece PV/T kolektör kullanıldığı halde binanın enerji ihtiyacının önemli ölçüde azaldığı sonucu görülmüştür, yapılacak olan çalışmamızda entegre bir sistem olacak olup hem PV hem de PV/T kullanılacak olup enerji verimliliğin daha da artması beklenmektedir. Bigaila vd. [8] PV/T havalı kolektör sistemlerin, faz değişim malzeme paneli kullanılarak sistemin güneşe bakan bir ofis binasına uygunluğu araştırılmıştır. Kanada, Saskatoon'da bulunan bina için yapılan sayısal bir çalışmada normal bir bina ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PV sistemin kullanıldığı binada normal binaya göre ısıtma gücü talebinde % 11,3 azalma sağlandığı görülmüştür. Sadece FDM kullanıldığı bu sistemde %12'lik bir enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür bizim tasarladığımız sistem tam olarak nSEB kavramına uygun olacak olup hem sayısal hem de deneysel olarak gerçekleştirilecektir. Ma vd. [9] PV paneli beton bir cephesi olan

binaya uygulayarak sistemin binalarda kullanımının kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada beton duvara yerleştirilen PV sistemin termal ve elektriksel performansı, gerçek zamana bağlı şekilde sayısal olarak çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda PV cephesinin yaklaşık olarak yılda 62,56 kWh / m² elektrik tasarrufu sağladığı ve PV cephesi olan bölgede ısıtma ve soğutma için gerekli olan enerjide belirli ölçüde azalma sağladığı görülmüştür. Bu çalışmada sadece PV'nin etkileri incelenmiştir ve geleneksel PV kullanılmıştır kullanılan geleneksel PV'ler binanın güneş ışığı almasını tamamen engellemektedir yarı saydam PV'ler ise hem güneş ışığını içeriye alıp hem de elektrik üretecektir böylelikle daha iyi konfor şartları sağlanacaktır. Arkar vd. [10] gizli ısı depolama ile yarı saydam PV/T cephe kaplamasının enerji verimliliği üzerine etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. İyileştirilmiş yaşam koşulları için binaya entegre bir PV cephe tasarlamıştır. PV panelin iç kısmına kapsüllenmiş faz değiştirme malzemesi eklenmiş olup ısı depolama kapasitesi incelenmiştir. Faz değişim malzemeli panelde normal binaya göre entegre PV panelin kullanıldığı cephede % 44 ile % 63 aralığında enerjisi kullanım verimliliği ile enerji ihtiyacını referans cepheye kıyasla % 40 ile % 55 azalttığı görülmüştür. Yapılan çalışma yine sınırlı şartlarla yapılmış olup tam olarak nSEB kavramını karşılamamasına rağmen yüksek indeksli dergide bilimsel makale olarak yayınlanmıştır. Barone vd. [11] hibrit PV/T cephe kaplamasını geleneksel kolektörle kıyaslayan deneysel bir çalışma yapmışlardır. Isıtma, kullanım suyu ısıtma ve güç üretimi açısından incelen sistemde enerji depolama amacıyla FDM kullanılmıştır. Sistemin tamamı, geleneksel cephe yapıları ve pencere çerçevesi düzenlemeleri ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte sistem tarafından üretilen ek elektrik gücü dahil edildiğinde ısı tutma performansı, normal bir cepheye göre %38.3 daha verimli olduğu görülmüştür. Yu vd. [12] BIPV/T cephe ve termal enerji depolama sistemlerinin nSEB yaklaşımlarında etkilerini inceleyen bir derleme çalışma yapmışlardır. Cephe tabanlı entegre PV sistemlerinin performansına bağlı birçok etken olduğu, uygulanacak binada bu etken olan parametrelerin dikkatle seçildiği takdirde enerji verimliliği açısından oldukça % 50'lere varan sonuçlar çıkardığı ve uygulanacak sistemin bulunduğu bölgenin iklim şartlarının önemli olduğunu vurgulamışlardır. Sadece cephe uygulamasıyla kullanılan PV'nin oldukça yüksek değeri olduğu görülmüş olup entegre bir sistem olmadığı da ayrıca belirtilmelidir. Farid vd. [13] binalarda faz değişim malzemelerinin aktif ve pasif yöntem olarak kullanılmasıyla ısı konforu iyileştirmesini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. FDM olmayan bir kontrol grubuyla kıyaslandığında kışın on günden fazla süren ölçümlerde faz değişim malzemesi olmayan kulübe göre tüketilen enerji miktarı % 22 daha az olduğu ve elektrik maliyetinde ise % 32'lik bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma, nSEB kriterlerine yönelik olarak çatı üstü PV/T kolektörleri, üç cepheye entegre yarı saydam PV panelleri, FDM destekli yerden ısıtma sistemini ve akıllı enerji depolama ve yönetim altyapısını tek bir gerçek ölçekli yapıda bütüncül biçimde içeren, sayısal, deneysel ve

termodinamik yöntemlerle kapsamlı bir araştırma sunmaktadır. Çalışmanın özgün amacı; bu çok işlevli hibrit sistemin elektrik, ısı eş üretim potansiyelini, mevsimsel iç ortam konforuna katkısını ve enerji, ekserji, eksergoekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilirlik değerlerini mühendislik çözümleri ile nesnel olarak ortaya koymaktır. Böylece literatürde genellikle ayrı ayrı incelenen PV/T, BIPV ve ısı depolama teknolojilerini tasarım, üretim, uygulama ve performans döngüsünün tüm adımlarını kapsayacak şekilde tek bir nSEB prototipinde birleştiren; deneysel çalışma doğrulamasını ayrıntılı CFD modellemesi ve termodinamik analiz ile birleştiren çalışma olma niteliğiyle nSEB araştırma alanına özgün, ölçeklenebilir ve uygulamaya dönük bir referans senaryosu kazandırmaktadır.

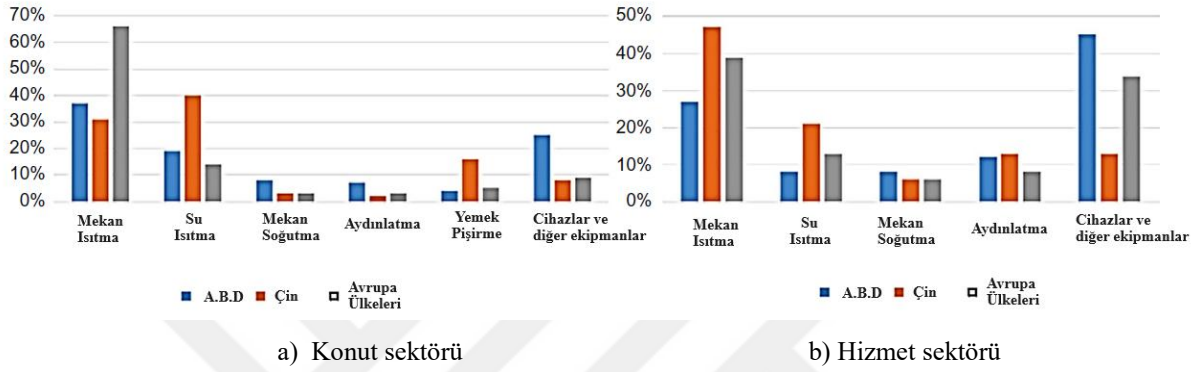


2. SIFIR ENERJİLİ BİNALAR

Neredeyse sıfır enerjili binalar, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedeflerini en üst düzeye çıkaran, modern yapı teknolojilerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile inşa edilen binalardır. NSEB konsepti, Avrupa Birliği'nin 2010/31/EU sayılı Enerji Performansı Direktifi'nde tanımlanmış olup, bu binaların enerji tüketimlerinin çok düşük olması ve ihtiyaç duydukları enerjinin büyük bir kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaları gerekliliğini belirtir. Bu binalar, yüksek yalıtım seviyeleri, enerji verimli sistemler ve yenilikçi yapı tasarımları ile enerji tüketimini minimize ederken PV paneller, rüzgar türbinleri ve jeotermal enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanarak enerji ihtiyaçlarını karşılar. NSEB'lerin tasarımı ve inşasında, enerji tüketimi ile ilgili pasif stratejiler (doğal havalandırma, gün ışığı kullanımı) ve aktif sistemler (gelişmiş HVAC sistemleri, enerji yönetim sistemleri) entegre bir şekilde kullanılarak, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlanır. Bu binalar, sadece enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynar. NSEB'ler, gelecekteki sürdürülebilir şehirlerin temel yapı taşlarını oluşturmakta ve bina sektöründe enerji verimliliği standartlarının yükseltilmesi için örnek teşkil etmektedir [14]. Binalardaki enerji tüketimi, Avrupa düzeyinde büyük bir endişe kaynağıdır. Binaların, birincil enerjinin yaklaşık %40'ını ve sera gazı emisyonlarının %36'sını oluşturduğu tahmin edilmektedir [14]. Bazı üye devletlerde bu oran %45'i bile aşarak, bina sektörünü Avrupa'daki en büyük nihai kullanım sektörü yapmaktadır.

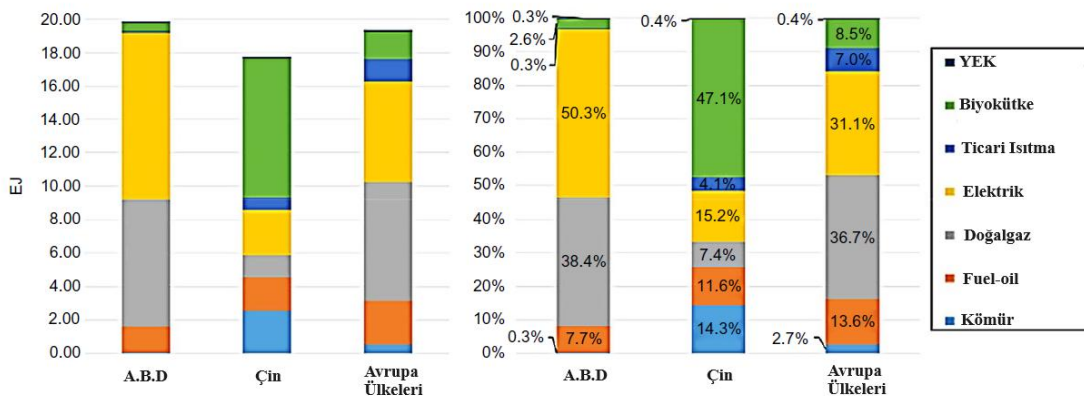
2007 yılında belirlenen İklim ve Enerji Paketi'nde, binalarda birincil enerji tüketiminin 2020 yılına kadar %20 azaltılması, yenilenebilir enerji üretiminin %20 artırılması ve 1990 seviyelerine kıyasla sera gazı emisyonlarının %20 azaltılması hedeflenmiştir. 2030 İklim ve Enerji Çerçevesi ile yeni hedefler belirlenmiştir [15]. Bu paket, sera gazı emisyonlarının 1990 seviyelerine göre %40 azaltılmasını, yenilenebilir enerji payının %27'ye çıkarılmasını ve enerji verimliliğinde %27 iyileşme sağlanmasını öngörmektedir. Son olarak, 2050 Avrupa Yol Haritası, sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla en az %80 oranında azaltmayı hedeflemektedir. İnsanların yaşamlarının %90'ından fazlası binalar içinde geçmektedir ve bu durum, termal konfor gereksinimlerinin çok büyük bir enerji talebi yaratmasına neden olmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, bina enerji tüketiminin toplam enerji tüketimine oranı, 1980 ile 2010 yılları arasında %33,7'den %41,1'e yükselmiştir [16]. Ekonomik durgunluğun ardından bu oran 2016 yılına kadar biraz düşüş göstermiştir; ancak, 2035 yılına kadar istikrarlı bir artış göstermesi beklenmektedir. Çin'de ise hızlı kentleşme ve büyük ekonomik büyüme, 1990 ile 2009 yılları arasında bina enerji tüketiminin %40 oranında artmasına neden olmuştur. Şekil 2.1, 2010 yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve AB'deki bina enerji kullanım paylarını göstermektedir. Hem mekân hem de su ısıtmanın, dünya genelinde bina enerji tüketiminin büyük bir bölümünü oluşturduğu

anlaşılmaktadır [16]. Bina enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan her türlü önlemin, küresel ısınma tehdidini önemli ölçüde azaltacağı açıktır. Bu özellikle, binaların genellikle uzun ömürlü olduğu ve tasarım ve inşaat aşamasında enerji tasarrufu önlemlerinin uygulanmasının uzun vadeli faydalar sağlayacağı göz önüne alındığında geçerlidir. Bu bağlamda, son birkaç on yılda bilimsel topluluk tarafından bina enerji tüketimini azaltmak için çözümler bulmaya yönelik önemli araştırmalar yapılmıştır.



Şekil 2.1. 2010 Yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve AB'de konut ve hizmet binalarının enerji kullanım alanları

Bina emisyonlarını azaltmayı hedefleyen en önemli çözümlerden biri, gerekli bina yüklerini karşılamak için temiz yenilenebilir enerjilere yönelmektir. Şu anda, bina enerjisinin büyük bir kısmı şebeke elektriği, doğal gaz, petrol, kömür, ticari ısı ve biyokütle ve atıklar tarafından sağlanmaktadır. Şekil 2.2, 2010 yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve AB'deki bina enerji kaynaklarının payını göstermektedir. Yenilenebilir enerjiler son on yılda önemli ölçüde gelişmiş olmasına rağmen, günümüzün küresel endüstrisinde bina enerjisini sağlama konusunda hala küçük bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, daha büyük bir büyüme potansiyeli bulunmaktadır [16].



Şekil 2.2. 2010 Yılında Amerika Birleşik Devletleri, Çin Ve AB'de konutlarda kullanılan enerji kaynakları

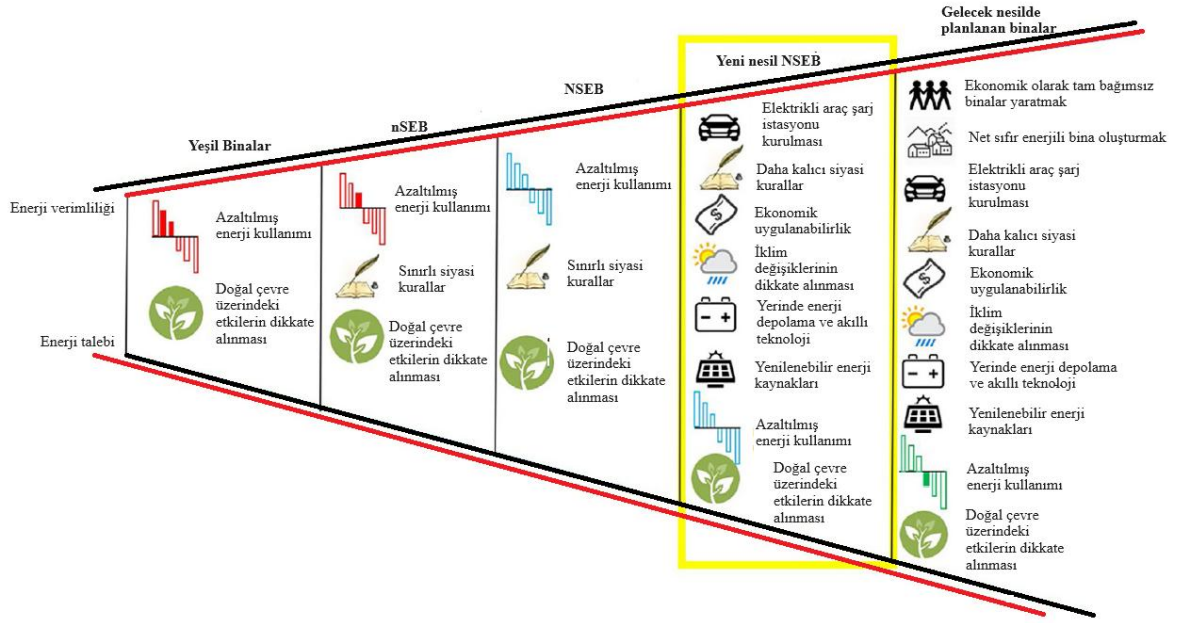
Bu alanda yavaş yavaş toplanan yenilikler arasında, öncü yeşil enerji kaynağı olarak güneş enerjisi öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi, bina enerjisinin karşılanmasında önemli bir rol oynayabilecek, bol miktarda mevcut olan bir enerji kaynağıdır. Bu enerji desteği, PV sistemler, Güneş Termal (GT) modülleri, güneşle çalışan kombine ısı ve güç üretim üniteleri, güneş enerjisiyle çalışan ısı pompaları ve hatta pasif tasarım teknikleri, yani pasif güneş destekli ısıtma ve soğutma yoluyla sağlanabilir. Teknik olarak, pasif ısıtma tasarım stratejileri büyük ölçüde güneş enerjisine dayanmaktadır. Bir güneş kazancı duvarı, pasif ısı kazancı için kullanılan bir çözümdür. Bu cihazda, güneş ısısı yakalanarak bina ısıtması için kullanılır. Güneş destekli soğutma yöntemleri de binalarda uygulanabilir, bunlar arasında aktif bir yöntem olarak güneş absorpsiyonu veya pasif bir yöntem olarak FDM kullanılarak güneş destekli soğutma yer alır. Biyokütle, rüzgar ve jeotermal enerji gibi diğer yenilenebilir kaynaklar da bina taleplerini karşılamak için kullanılabilir, ancak bu konuda hiçbirinin güneş enerjisi kadar potansiyeli yoktur. SEB konsepti, ilk olarak 2000 yılında bahsedilen nispeten yeni bir kavramdır. Ancak 2006 yılına gelindiğinde, oldukça hızlı bir şekilde ana akım bir kavram haline gelmiştir. Bu terim için birden fazla tanım çerçevesi mevcut olmasına rağmen, bu bina basitçe, enerjisini büyük ölçüde yenilenebilir yeşil kaynaklardan üreten bir yapı olarak anlaşılabilir. NSEB ve nSEB gibi çeşitli terimler, SEB'in hedeflenen performans tanımını ifade etmek için kullanılmaktadır [17]. Ayrıca, dünya genelinde SEB'lerle ilgili çeşitli standartlar ve kılavuzlar geliştirilmiştir ve bunların çoğu on yıldan daha eski değildir. Avrupa Birliği'nin Binaların Enerji Performansı Direktifi'nin yeniden düzenlemesi, 2020'den itibaren tüm yeni binalar için SEB statüsünü tasarım hedefi olarak belirlemiştir. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2007 Enerji Bağımsızlığı ve Güvenliği Yasası, yeni ticari binaların %50'si için 2040 yılına kadar ve tüm yeni ticari binalar için 2050 yılına kadar sıfır enerji hedefini belirlemiştir [17]. Ancak, Çin'de SEB standartları ve düzenlemeleri, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri kadar organize edilmemiş ve uygulanmamıştır, fakat Çin'in bina sektöründe SEB standartlarına uyum sağlama potansiyeli yüksektir ve bu, CO₂ değerlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Çin'de önemli SEB projeleri de uygulanmıştır, bunlar arasında en farklı olanlarından biri Guangzhou'daki Pearl River Tower'dır. Bununla birlikte, her ülke SEB kavramını kendi anlayışı doğrultusunda yorumladığı için, ülkeler arasında SEB performansını karşılaştırmak biraz zor olabilir.

SEB'leri geliştirmede ve değerlendirmede iki tür enerji dengesi yaklaşımı izlenebilir. İlki, tasarım aşamasında uygulanabilir olan enerji talebi ve yenilenebilir enerji üretimi arasındaki dengedir; ikincisi ise mevcut bir SEB'in performansını değerlendirmek için kullanılacak, ithal edilen enerji ile şebekeye satılan enerji arasındaki dengedir. Yenilenebilir enerji seçenekleri hem yerinde hem de yer dışında kullanılabilir. Ayrıca, yeşil enerji veya CO₂ kredisi doğrudan satın alınabilir, bu da SEB projelerinin uygulanabilirliğini genişletir. Ayrıca, SEB'ler şebekeye bağlı veya otonom (bağımsız) olabilir. Otonom SEB, enerjisini üretir ve tüketir ve şebeke enerjisine bağımlı değildir. Bu iki bina türü için tasarım stratejileri büyük ölçüde farklıdır çünkü otonom

binalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının (özellikle güneş ve rüzgar enerjisi) süreksiz doğası nedeniyle enerji depolama birimlerine büyük ölçüde bağımlıdır [16].

Daha önce belirtildiği gibi, SEB konsepti esas olarak 2000 yılında ortaya atılmıştır. Ancak, bu tarihten önce de bina enerji kullanımı ile ilgili endişeler mevcuttu. Yeşil binalar planlaması, 1990'larda bu endişelere bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. O zamana kadar, binaların enerji gereksinimlerini azaltmak ve bunu temiz yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılamak için yenilikçi çözümler bulmaya yönelik büyük bir araştırma çabası gösterilmiştir. Ancak, yeşil binalar SEB'lerle karıştırılmamalıdır. Her ne kadar karbon emisyonu konusu gibi birçok performans hedefini paylaşırsalar da, farklı tasarım stratejileri ve kılavuzlar izlerler [18]. Zuo ve Zhao [19], yeşil bina konsepti dört temel prensip üzerine kurulmuştur: çevresel etkiyi en aza indirmek, sakinlerin sağlık koşullarını iyileştirmek, yatırımcılar için kabul edilebilir bir geri dönüş sağlamak ve işletme ve bakım gereksinimlerini en aza indirerek yaşam döngülerini uzatmak. Bu bağlamda, bazı tasarım stratejileri daha iyi sağlık koşullarına yol açabilir, ancak enerji performansını düşürebilir veya tam tersi. Aynı durum ekonomik uygulanabilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi için de geçerlidir. Mevcut aşamada, SEB'lerin bazı iklimlerde uygulanabilir olabilmesi için yenilikçi teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır ve bunların çoğu, yatırım geri dönüş süresini kabul edilemez seviyelere çıkarma eğilimindedir çünkü ticari olarak yeterince gelişmiş değillerdir. Şekil 2.3'te, tanınmış beş kuşak yeşil ve sıfır enerji binaları göstermektedir. Mevcut araştırma ve geliştirme çalışmalarının büyük ölçüde dördüncü kuşağın uygulanabilirliğini iyileştirmeye odaklandığını belirtmek gerekir [18].

Daha önce de belirtildiği gibi, NSEB'lerin genişlemesi ve ticarileşmesi önündeki en büyük engel, birçok yatırımcı ve bina kullanıcısının, bir NSEB'in sermaye maliyetlerinin işletme maliyetlerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğuna inanmasıdır [20]. Yeşil binalarla ilgili öncü resmi sertifikasyon çerçeveleri arasında 1990 yılında Birleşik Krallık'ta yayımlanan Bina Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodolojisi (BREEAM) ve 1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde yayımlanan Enerji ve Çevre Tasarımında Liderlik (LEED) bulunmaktadır. nSEB ile ilgili diğer standartlar ve eylem planları da dünya genelinde kademeli olarak belirlenmiş ve uygulanmıştır. Örnekler arasında Japonya'da Kapsamlı Çevre Verimliliği Değerlendirme Sistemi (CASBEE), Almanya'da Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) ve Avustralya'da Green Star Sistemi bulunmaktadır. Wells vd. [20], 2018 itibarıyla, yeşil bina/NSEB ile ilgili 31'den fazla sertifikasyon şeması, 30'dan fazla ülkede aktiftir. Ancak, terminoloji, hedefler, değerlendirme kriterleri önem seviyesi ve hedef pazar sektörü açısından büyük farklılıklar göstermektedir. Farklılıklarına rağmen, çoğu enerji kullanımı, su kullanımı, iç mekan konforu ve sağlık koşulları, binada kullanılan malzemeler ve binanın çevre üzerindeki etkisini dikkate almaktadır



Şekil 2.3. Yeşil ve sıfır enerjili binaların planlanan beş aşaması

2.1. Sıfır Enerji Binaların Tanımlanması ve Tasarım Stratejileri

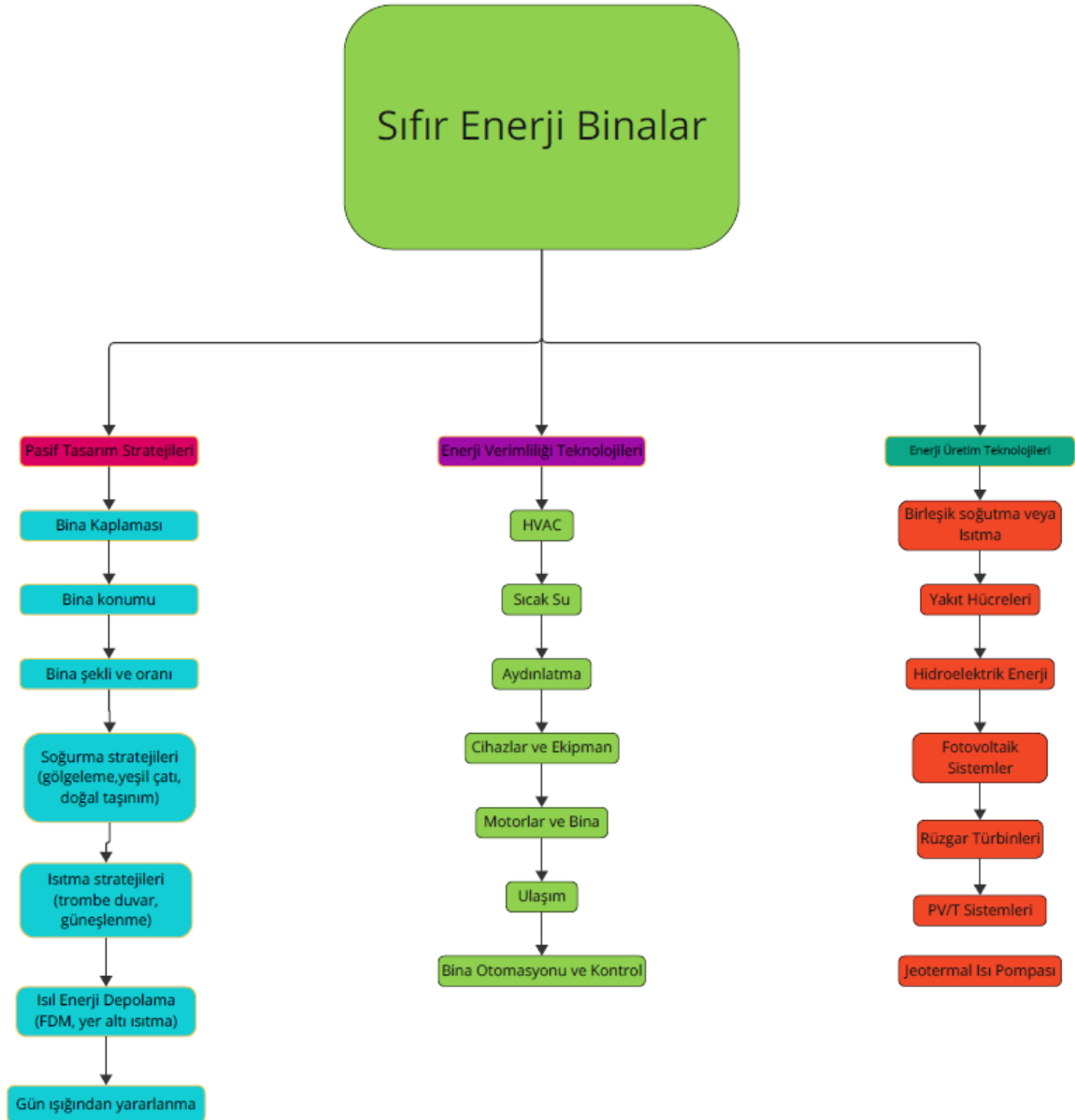
SEB terimi günümüzde birden fazla yoruma sahiptir. Hâlihazırda, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'nde birden fazla ana tanım çerçevesi etkin durumdadır ve bu alandaki literatürde de çeşitli tanımlar sunulmuştur.

2.1.1. Sıfır Enerjili Binaların Tanımlanması

SEB terimi için, özellikle son on yıl içinde bilim camiası tarafından çeşitli tanımlar önerilmiştir. Genel olarak, bir tanım çerçevesi geliştirildiğinde üç ana unsurun netleştirilmesi gerekmektedir: sistem sınırları, sistem ölçütleri ve değerlendirme zaman aralığı. İlk olarak, analiz edilen sistemin çeşitli bölümlerinin sınırları tamamen belirlenmelidir. “Yerinde” üretilen enerjinin, bina sınırları içinde, yakında veya yerel bir elektrik şebekesinden satın alınan enerji olup olmadığı açıkça belirtilmelidir. Ardından, sistem ölçütleri tanımlanmalıdır. Ölçütler, değerlendirme işleminin hangi kriterlere dayandığını belirleyen unsurlardır. Örneğin, “Sıfır Enerji” terimi ile kastedilen, sıfır enerji dengesi (tüketilen enerji ile üretilen enerji), sıfır enerji maliyeti (satın alınan enerji ile satılan enerji) veya hatta sıfır enerji emisyonu olabilir. Enerji taşıyıcılarının ağırlık fonksiyonları netleştirilmelidir. Bir enerji birimi elektrik, bir enerji birimi yakıt veya ısı ile aynı olmayabilir. Son olarak, değerlendirme süresi belirlenmelidir. Denge haftalık mı, aylık mı, yıllık mı sağlanacak? Hatta bina yaşam döngüsü bile, bina inşaatından yıkımına kadar olan süre ya da ham madde çıkarımından bina malzemelerinin geri dönüşümü ve atık alanlarının kullanımına kadar farklı zaman aralıklarına atfedilebilir. Eğer doğru bir tanım yapılması isteniyorsa, tüm bu kriterlerin

ve değerlerin belirlenmesi ve netleştirilmesi gereklidir. En basit NSEB tanımı, bina sınırları içinde üretilen enerji miktarının (yenilenebilir) bir yıl içinde tüketilen enerji miktarına eşit veya ondan fazla olduğu bir binadır. Bu basit tanımın genel bir matematiksel temsili şu şekilde ifade edilebilir [21] ve Şekil 2.4'te bunun grafiksel temsili verilmiştir.

$$Net\ Enerji = \text{Çıkan} - \text{Giren} = Net\ İşletme\ Enerjisi - Üretilen\ Enerji = \sum_k \text{Çıkan}\ Enerji(k) \times Ağırlık(k) - \sum_k \text{Giren}\ Enerji(k) \times Ağırlık(k) \geq 0 \quad (2.1)$$



Şekil 2.4. SEB'ler için üç ana tasarım adımı

SEB projelerinin uygulanmasında ekonomik, çevresel, enerji verimliliği gibi farklı amaçlar güdüldüğü için, alanın mevcut literatüründe farklı tanımlar geliştirilmiştir. Başlıca bir tanım metodolojisi, ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından önerilmiştir. DOE, NSEB'i dört kategoride

tanımlar: net sıfır saha enerjisi bina, net sıfır kaynak enerjisi bina, net sıfır emisyon bina ve sıfır enerji maliyeti bina. Bu terimlerin her biri kısaca şu şekilde tanımlanmıştır [11]:

- **Net sıfır saha enerjisi:** Bu terim, binanın bulunduğu alanda tüketilen enerjinin, alanda üretilen enerjiye eşit olduğu bir binayı ifade eder, enerji kaynağının kökeni ne olursa olsun. Bu tanım çerçevesinde, dışsal dalgalanmaların ölçümler ve hesaplamalar üzerindeki etkileri minimize edilir; bu nedenle, en tekrar edilebilir ve tutarlı çerçeve olarak kabul edilir. Ancak, enerji kalitesi veya kaynağı dikkate alınmadığından, binanın işletiminin çevresel etkileri hakkında çok fazla bilgi olmayabilir. Ayrıca, bu çerçevenin yalnızca değerlendirme temeli olarak seçildiği varsayıldığında, enerji tasarrufu veya maliyet düşürücü önlemleri belirlemek bir nebze zor olabilir. Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği'nin (ASHRAE) 2020 vizyonunda, bu tanım çerçevesi bir NSEB için temel tanım olarak seçilmiştir [22].
- **Net sıfır kaynak enerjisi:** Bu terim, tüketilen her enerji birimi için bir enerji biriminin üretildiği durumu ifade eder. Bu değerler enerji kaynağında ölçülür. Dolayısıyla, kaynak enerjisi kayıpları ve dağıtım kayıpları da hesaba katılır ve elde edilen tahminler daha doğru ve gerçekçidir. Ancak, modelleme ve tasarım, dışsal dalgalanmalara daha yatkındır ve bu da modelde birden fazla kaynak ve dağıtım faktörü yer aldığından tasarım sürecini daha karmaşık hale getirir. Yine de bu model, enerji kalitesini hesaba katmaz ve bir enerji biriminin bir diğeriyle eşdeğer olduğunu varsayar. Bu nedenle, farklı enerji kaynaklarının maliyet ve emisyon durumu göz önünde bulundurulmaz ve dolayısıyla bu model, binanın inşaatı ve işletmesinin çevresel etkileri ve ekonomik uygulanabilirliği hakkında çok fazla bilgi üretemez.
- **Net sıfır emisyon:** Bu NSEB modelleme metodolojisi, bina performansının ölçülebilir karbon emisyonu durumuna doğrudan odaklanır. Bu tanım çerçevesinde, net sıfır emisyonlu bir bina, tüketilen her karbon salınımlı enerji birimi için, salınımsız bir enerji biriminin üretildiği bir binadır. Bu tanım, IEA tarafından tasarlananlar da dahil olmak üzere, sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan çoğu resmi standartla uyumludur. Ancak, ekonomik değerlendirme yeteneğinden yoksundur ve dolayısıyla yatırımcılara sunulacak kapsamlı bir çerçeve olarak kullanılamaz. Ayrıca, eşdeğer salınımsız enerji üretildiği süreç, önlenebilir olsa bile, salınımlı enerji tüketimine izin verebilir.
- **Net sıfır maliyet:** Basitçe ifade etmek gerekirse, net sıfır maliyetli bir enerji binası, enerji faturalarının ücretsiz olduğu bir binadır. Bu bağlamda, bir bina, yerinde üretilen enerjiyi satarak ödenen enerji masraflarını karşılayabilecek kadar enerji geliri elde edebiliyorsa, bu bina net sıfır maliyetli bir enerji binası olarak kabul edilir. Bu tanım, bilim dışı topluluklar, bina sahipleri ve yatırımcılar gibi gruplara sunulması için en uygun tanımdır. Ayrıca, binanın ekonomik performansı hakkında çok miktarda bilgi üretir, ancak çevresel etkiler

veya bina sistemlerinin verimliliği hakkında çok az bilgi sağlar. Dahası, enerji fiyatları ve tarife planları dünya genelinde büyük ölçüde farklılık gösterdiğinden, farklı bölgelerdeki binaların performansını karşılaştırmak oldukça zor ve karmaşıktır.

EPBD, nSEB olarak başka bir SEB tanım çerçevesi sunmaktadır. Bu tanıma göre, nSEB, gereksinim duyulan yıllık enerji tüketiminin büyük bir kısmının yerinde veya yakında, çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanarak üretildiği çok yüksek verimli bir binadır. Bu tanım, çoğu gerçek dünya durumunda tam anlamıyla sıfır enerji hedefine ulaşmanın mümkün olmadığı için daha gerçekçi bir çerçeveye sahiptir. Ayrıca, yenilenebilir kaynaklara odaklanarak çevresel etkiler de dikkate alınmaktadır. nSEB tanım çerçevesinde, maliyet 2021 yılına kadar ısıtma ve soğutma talebini karşılamak için yıllık $<30 \text{ kWh/m}^2$ enerji tüketimi olarak varsayılmaktadır [16]. Bir diğer tanım çerçevesi, Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bağımsızlığı ve Güvenliği Yasası'nda tanımlanan “net sıfır enerji ticari bina”dır. Bu tanıma göre, net sıfır enerji ticari bina, minimum miktarda enerji gerektiren ve bu enerjinin, net sıfır sera gazı emisyonu ve ekonomik uygulanabilirlik kriterlerinin aynı anda sağlanacak şekilde temin edildiği bir binadır. Bu çerçevede, binanın performansının hem emisyon durumu hem de ekonomik durumu dikkate alınarak güvenilir değerlendirme ve karşılaştırma kriterleri sağlanmaktadır. Bu standartların çoğunun belirli bir binaya belirli bir ölçekte bir derece verdiğini ve bu sayede karşılaştırma amaçlarının mümkün hale geldiğini belirtmek gerekir.

nSEB kavramının çok geniş ve kapsamlı yorumu göz önüne alındığında, kullanışlı bir nSEB tanım çerçevesinin özellikleri etrafında gelişen bir bilimsel bakış açısı ortaya çıkmaktadır. Bu bakış açısına göre, kapsamlı bir tanım, sistem sınırı, metrik ve kriterler gibi nSEB'in farklı yönlerini içeren bir çerçeve olmalıdır. Bu çerçeve kullanılarak, her araştırmacı veya bina sahibi, belirli bir duruma özgü bir tanım oluşturmak için çerçevenin farklı seviyelerinden belirli unsurları seçebilmelidir. Seçilen unsurlar, maliyetler, iklim koşulları, çevresel koruma endişeleri, yerinde ve yer dışındaki mevcut yenilenebilir enerji kaynakları, şebeke bağlantı durumu gibi faktörler göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Tablo 2.1, açıklanan tüm NSEB tanımlarını ve bunlara karşılık gelen değerlendirme kriterlerini, sınırlarını ve zaman dilimlerini göstermektedir [23].

Tablo 2.1. NSEB kavramı için çoklu tanım çerçeveleri

Tanım	Değerlendirme kriterleri	Sınırlar	Zaman
Net sıfır saha enerjisi	Enerji dengesi	Bina alanı	Yıllık
Net sıfır kaynak enerji	Enerji dengesi	Enerji üretim alanı	Yıllık
Net sıfır emisyon enerji	Karbon salınım dengesi	Enerji üretim alanı	Yıllık
Net sıfır emisyon enerji	Fiyat dengesi	Bina alanı	Yıllık
Neredeyse sıfır enerjili	Enerji/karbon dengesi	Bina alanı	Yıllık

2.1.2. Sıfır Enerjili Binaların Tasarım Stratejileri

Bina tasarımı ve optimizasyon problemleri, birçok etkili parametrenin dikkate alınması gereken karmaşık problemlerdir. Enerji dengesi ile ilgili birçok faktör tasarım aşamasına eklendiğinden, SEB'lerin tasarımı ve optimizasyonu çok daha karmaşıktır. Tasarım hedefleri ne kadar iddialı olursa, tasarım aşaması da o kadar karmaşık ve emek gerektiren bir hâl alır.

Genel olarak, bir SEB tasarlama sürecinde tasarımcıların dikkate alması gereken altı ana yön bulunmaktadır [24]. Bu yönler; tanım setleri ve metrikler, konfor kriterleri ve iklim koşulları, pasif stratejilerin tasarımı, farklı bina sistemlerinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi, mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının planlanması ve son olarak, spesifik tasarım durumu için uygulanabilir yenilikçi çözümler ve teknolojiler arayışını içerir. Mevcut bina performansı tasarım yazılım paketlerinin çoğu, tasarım sonrası değerlendirmeler için faydalıdır ve ön tasarım tahmini konusunda fazla bilgi sağlamaz. Oysa SEB'lerin erken tasarım aşamasında alınan kararların yaklaşık %20'si, sonraki tasarım kararlarının %80'ini etkiler. Bu parametrelerin birbirine bağlılığı, yoğun bir deneme-yanılma tasarım sürecine yol açabilir. Bu durum, geleneksel bina tasarım sürecinden farklıdır, çünkü geleneksel süreç, bir dizi ardışık ve ayrık önlemden oluşur. Bu bağlamda, bina performansı ile ilgili böyle yinelemeli ve karar alma sürecine özel olarak tasarlanmış yazılım araçlarının geliştirilmesi gerekliliği açıkça hissedilmektedir. Bununla birlikte, bazı araştırma çalışmaları bu alanı kapsamaya çalışmıştır. Attia vd. [24], SEB'lerin erken tasarım aşamasında mevcut çözümler arasında karar verme sürecini kolaylaştırmayı amaçlayan ve sıcak iklimlere özel dikkat gösteren enerji odaklı bir yazılım aracı sunmuşlardır. Ayrıca, tasarım araçları için bir kıyaslama vaka çalışması ve duyarlılık analizi de dahil etmişlerdir.

SEB tasarım sürecinin performans odaklı bir tasarım metodolojisi olduğunu belirtmek gerekir. Attia vd. [24] göre, bir SEB'nin kavramsal tasarım aşaması beş seviyeden oluşmaktadır. Bunlar: (1) bina performans göstergelerinin belirlenmesi, (2) gerekli kriterleri karşılamak için mevcut çözümler üzerinde düşünülmesi, (3) bina bölge düzeninin tasarlanması, (4) ön kavramsal tasarım ve (5) ayrıntılı kavramsal tasarım. Genel bir kural olarak, tasarımcılar her zaman iki ana hedefi göz önünde bulundurmalıdır: birincisi, maksimum enerji verimliliğini planlamak ve ikincisi, minimize edilmiş enerji ihtiyacını yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı düşünmek. Tasarım seviyeleri özetlenirse, planlanması gereken üç ana adım vardır: pasif tasarım stratejileri, enerji verimliliği teknolojileri ve enerji üretim teknolojileri [25].

SEB tasarım sürecinde optimizasyon çabaları da önemli bir rol oynar, çünkü en iyi şekilde tatmin edilmesi gereken birden fazla çelişkili tasarım hedefi vardır. Buna bağlı olarak, çok amaçlı tasarım optimizasyon algoritmaları bu konuda literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, çok amaçlı problem çözüm algoritmaları üç sınıfa ayrılır: sayısal algoritmalar, deterministik algoritmalar ve stokastik algoritmalar. Sayısal algoritmalar, çözüm alanını ayrık olarak tarar ve sürecin sonunda en uygun olanı seçmeden önce tüm olası çözümleri değerlendirir. Bina

performansı optimizasyonu gibi geniş çözüm alanlarına sahip problem türleri için bu algoritma tipi uygun değildir, çünkü hesaplama açısından pahalıdır ve uygulaması pratik değildir. Öte yandan, stokastik algoritmalar bu problem türleri için en iyi seçenektir çünkü problemi çözmek için ağır matematiksel gereksinimleri yoktur. Bu amaçla kullanılabilecek bazı stokastik algoritmalar; tavlama, karınca kolonisi, parçacık sürüsü ve genetik algoritmalarıdır [26]. Daha önce belirtildiği gibi, genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyonu, SEB tasarım problemlerinde en yaygın kullanılan çözümlerdir.

2.2. Pasif Güneş Enerji Sistemleri

Neredeyse tüm binalar dış mekanlarda yer alır ve bu nedenle güneş radyasyonuna maruz kalırlar. Gelen güneş radyasyonu, binanın ihtiyaç duyduğu soğutma/ısıtma yüklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Uygun bir şekilde tasarlandığında, güneşten gelen ısı kazançları soğuk iklimlerde binayı ısıtmak ve fosil yakıtlara veya diğer ısıtma kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmak için kullanılabilir. Öte yandan, sıcak iklimlerde etkili bir pasif tasarım, güneşten gelen ısı kazancının binanın iç yaşam alanına girmesini etkin bir şekilde önleyebilir ve dolayısıyla HVAC cihazlarıyla binanın soğutulması için gereken enerjiyi önemli ölçüde azaltabilir. Bu etkili kararların çoğunun tasarım aşamasında alındığını ve binanın enerji tüketimi üzerinde uzun vadeli etkileri olacağını belirtmek gerekir [18]. Bu nedenle, SEB'lerin tasarım aşamasında kapsamlı bir özen gösterilmelidir, çünkü pasif stratejiler, binanın ihtiyaç duyduğu enerjiyi en aza indirmede ve dolayısıyla sıfır enerji hedefine yaklaşmada en önemli stratejiler olabilir.

Pasif güneş ısıtma/soğutma teknikleri genellikle üç yaklaşıma dayanır: güneş enerjisi emilimini önlemek/kolaylaştırmak, emilen güneş enerjisini modüle etmek veya alınan güneş ısını dağıtmak. Isıyı önleme stratejisinde, güneş radyasyonunun binaya ulaşmasını ve aşırı ısınmaya neden olmasını engellemeye çalışılır. Gölgeleme cihazlarının kullanılması, cephe öz-gölgeleme, uygun pencere-duvar oranı seçimi ve belirli yönlendirme seçeneklerinin uygulanması bu yaklaşıma dayanmaktadır. Ancak, bu tür stratejilerin uygunsuz bir şekilde uygulanması durumunda, gün ışığı ve görüş konforunun tehlikeye girebileceği unutulmamalıdır. Öte yandan, güneş ısı kazancı, uygun pasif güneş tasarımı ile soğuk iklimlerde kolaylaştırılabilir. Bu tasarım stratejisi yine bina yönelimi ve etkin pencere düzenlemesi gibi kararları içermektedir. Bir diğer yaklaşım ise, emilen güneş enerjisinin, spesifik modüller aracılığıyla kısmen değiştirilerek anlık ısıtma etkisinin önlenmesidir. Bir yöntem, emilen ısıyı termal enerji depolama birimi aracılığıyla depolamak ve ardından bu ısıyı soğuk dönemlerde kademeli olarak serbest bırakmaktır. FDM entegrasyonu ile kubbeli ve tonozlu çatı şekillerinin kullanılması bu kategoriye girmektedir. Son olarak, genellikle pasif soğutma tekniklerinde kullanılan bir ısı dağıtma stratejisi, binadan ısıyı pasif olarak uzaklaştırarak bina soğutması için gereken enerjiyi azaltmayı amaçlar. Güneş bacasında olduğu gibi doğal soğutma, buharlaşmalı soğutma ve gece radyasyonu ile soğutma bu kategoriye girer. Önceki çözümlerden

farklı olarak, bazı ısı dağıtma stratejileri, SEB tasarım durumlarında diğer güneş enerjisi toplayıcıları veya yerinde üretilen güneş elektriği ile sağlanabilecek düşük miktarda enerji gerektirebilir [27].

2.2.1. Güneş Kaynaklı Isının Önlenmesi

Binalar, gün boyunca yoğun bir şekilde güneş radyasyonuna maruz kalır. Bu durum, soğuk iklimlerde bir avantaj olarak değerlendirilebilir; çünkü güneş ısının mümkün olduğunca toplanması, binanın ihtiyaç duyduğu ısıtma yükünü önemli ölçüde azaltabilir, aksi takdirde bu yük fosil yakıtlar gibi diğer enerji kaynaklarıyla karşılanmak zorunda kalacaktır. Öte yandan, güneş radyasyonu, sıcak iklimlerde iç mekan termal konforunu önemli ölçüde bozabilir ve bu sorunun üstesinden gelmek için büyük ve son derece enerji tüketen HVAC tesisatlarının kullanılması gerekebilir. Bu bağlamda, güneş ısı kazancını önlemek veya kolaylaştırmak, binanın bulunduğu iklime bağlı olarak tasarım açısından önemli olabilir.

Bina çatıları, güneş radyasyonu ve diğer iklim koşullarına diğer bina bölümlerinden daha fazla maruz kalır. Sonuç olarak, ısı kaybı/kazanımına büyük ölçüde eğilimlidirler ve SEB tasarımı için çatıya ilişkin tasarım hususları dikkatle ele alınmalıdır. Ayrıca, duvarlar, binanın dış mekandan korunmasını, termal ve akustik koruma sağlamasını ve estetiğini önemli ölçüde etkiler. Duvarların ısı direnci, R değeri ile karakterize edilir ve bu özellikle, yüksek duvar zarf oranına sahip olan, yani yüksek katlı binalar için geçerlidir. Uygun yalıtım, analiz aşamasında dikkate alınması gereken ilk önemli özellikler arasında yer alır. Ayrıca, pasif bir güneş enerjisi evinin tasarımında pencere düzeni önemli bir rol oynar. Pencere düzeni, çoğunlukla pencereler ve kapılar dahil olmak üzere, binanın dış zarfı boyunca yer alan açıklıkları ifade eder. Bu açıklıklar estetik, aydınlatma ve gün ışığı, hava akışı ve iç hava kalitesi, bina giriş ve çıkışı gibi konularda önemlidir. Ancak, bu açıklıkların tasarımı dikkatle yapılmalıdır; çünkü bu alanlar, binanın içine ve dışına önemli miktarda hava sızmasına neden olabilir, bu da ısıtma/soğutma yükü talebini artırabilir. Bu nedenle, güneş kontrol camları, yalıtımlı cam üniteleri, düşük emisyonlu kaplamalar, vakumlu ve aerjel camlama, ve gaz dolgu boşlukları, ısı performansını artırmak için kullanılabilir [28].

Belirtilen unsurlara ilişkin olarak bir SEB'in doğru bir şekilde tasarlanması, bina yönelimi ve PDO dahil olmak üzere çeşitli parametrelere karşılık gelen optimum değerlerin belirlenmesini ve güneş hesaplamalarının yapılmasını gerektirir. Ayrıca, gölgeleme hesaplamaları dikkatle yapılmalı ve bu, güneş ısı kazancını en aza indirmek veya maksimize etmek açısından önemli olabilir. Gölgeleme cihazlarının uygulanması veya cephe öz gölgeleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi bu aşamada analiz edilir. Gün ışığı, binanın pasif tasarımına büyük ölçüde bağlı olan ve aynı zamanda, aydınlatma sistemi HVAC cihazlarından sonra binanın enerji tüketen sistemlerinden biri olduğu için, genel bina enerji tüketimi üzerinde büyük bir etki yapabilecek

önemli bir faktördür. Son olarak, bina içinde gerekli görülen yerlerde uygun yalıtım ve cam malzemelerinin dahil edilmesi, binanın genel ısıtma/soğutma yüklerini büyük ölçüde etkileyebilir ve dolayısıyla, ilgili hesaplamalar tasarım aşamasında yapılmalıdır.

2.2.2. Bina Şekli ve Yönelimi

Bina şekli ve yönelimi, binanın kışın minimum iç ısı kaybına uğrayacak ve yazın mümkün olduğunca az güneş radyasyonu alacak şekilde tasarlanmalıdır. Bina şekli ve yönelimi bu kriterleri etkileyebilir. Bu kararlar, yıllık meteorolojik verilere dayalı olarak tasarım aşamasında dikkatle alınmalıdır. Kuzey-Güney eksenine göre uzanan binaların, Doğu-Batı eksenine göre uzanan binalara kıyasla daha az verimli olduğu belirtilmelidir. Bunun nedeni, Doğu-Batı yönelimli bina şekillerinin kışın yüksek, yazın ise düşük seviyelerde güneş radyasyonu almasıdır [29].

Büyük ölçüde güneş ışınlamı ilişkilerine dayandığından Zaman denklemi (ZD) değeri, gün sayısına bağlı olarak (dakika cinsinden hesaplanır) şu şekilde ifade edilebilir [30]:

$$ZD = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) (\text{dak}) \quad (2.1)$$

B, aşağıdaki şekilde hesaplanır [30]:

$$B = (Gün - 81) \frac{360}{364} \quad (2.2)$$

Burada “Gün” yılın gün sayısını ifade eder. Yerel güneş zamanı (YGZ), genellikle zaman dilimine yakın bir meridyenden veya Greenwich gibi 0° boylamına sahip standart bir meridyenden hesaplanır. Güneşin 1° boylamı geçmesi 4 dakika sürdüğünden, zaman diliminin hesaplandığı meridyen ile yerel meridyen arasındaki fark, görünen güneş zamanı (GGZ) hesaplanırken dikkate alınmalıdır. Buna göre, GGZ şu denkleme göre hesaplanabilir [30]:

$$GGZ = YGZ + ZD \pm 4x(SB - YB) - ZF \quad (2.4)$$

Burada, YGZ saatin gösterdiği zamanı, SB zaman diliminin ayarlandığı standart boylamı, YB yerel boylamı ve ZF ise yılın zamanına ve yaz saati uygulamasına göre 0 veya 60 dakika değerini alan yaz saati farkını ifade eder. Ayrıca, standart saat dilimi meridyeninin doğusundaki yerler için artı işareti, batısındaki yerler için eksi işareti kullanılır. YGZ’ye yapılan düzeltmenin tamamının dakika cinsinden hesaplandığını belirtmek gerekir.

Dünyanın belirli bir noktasındaki saat açısı (h), Dünya’nın bu noktanın meridyeninin doğrudan güneş altında olması için dönmesi gereken açıyı tanımlar. Yerel güneş öğleninde saat açısı sıfırdır. Bu açı aşağıdaki şekilde tanımlanır [30]:

$$h = (GGZ - 12) \times 15 \quad (2.5)$$

Güneş sapma açısı (δ), güneş ışınlarının ekvatora olan açısal mesafesi olarak tanımlanır ve kuzey pozitif olarak kabul edilir. Bu açı, aşağıdaki bağıntı kullanılarak tahmin edilebilir [30]:

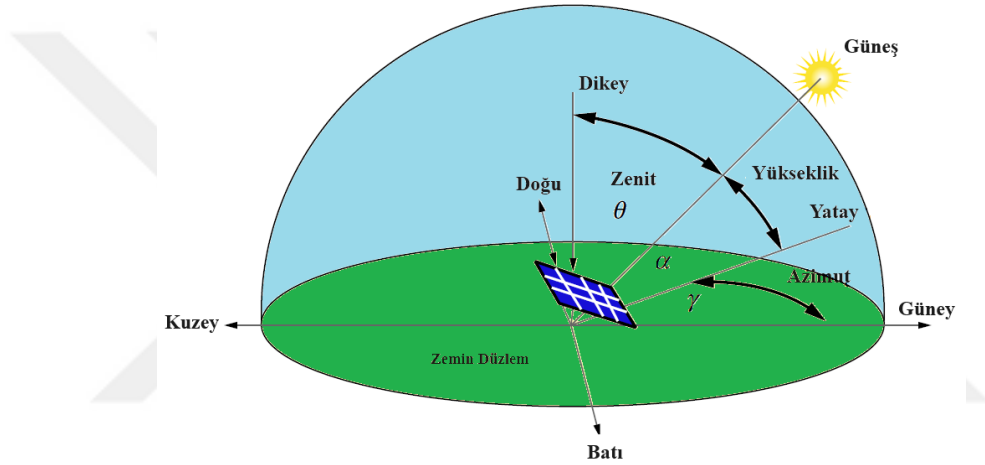
$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + \text{Gün}) \right] \quad (2.6)$$

Ayrıca, güneş yükseklik açısı (α) şu şekilde hesaplanır [30]. Güneş yükseklik açısı ve güneş zeniti (θ) birbirini tamamlayan açılar olarak dikkate alınır;

$$\sin(\alpha) = \cos(\theta) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.7)$$

Burada, L yerel enlemi ifade eder. Güneş ışınlamı yatay düzleme yansıtıldığında, kuzey yarımkürede güney doğrultusuyla yaptığı açıya güneş azimut açısı (γ) denir. Aksine, güney yarımkürede bu açı kuzey doğrultusuna göre ölçülür. Denklem 2.8’de bu ilişkiye ait bağıntı verilmiştir. Her iki durumda da batıya doğru olan açı pozitif olarak kabul edilir. Güneş azimut açısı şu şekilde hesaplanır [30]. Ayrıca, temel güneş açıları Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

$$\sin(\gamma) = \frac{\cos(\delta) \cos(h)}{\cos(\alpha)} \quad (2.8)$$



Şekil 2.5. Solar yükseklik, azimut ve zenit açılarının gösterimi

Son olarak, belirli bir eğim açısına (β) sahip bir düzlemdeki güneş ışınlam açısı (i), Denklem 2.9 ile ifade edilir [30]:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \cos(\gamma_s) \\ & + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) \\ & + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(\gamma_s) \\ & + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(\gamma_s) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Burada, γ_s yüzey azimut açısını ifade eder ve bu açı, düzlemin yatay yüzeydeki normalinin kuzey yarımkürede güney, güney yarımkürede kuzey doğrultusuna göre yaptığı açıdır; batıya doğru olan açı pozitif olarak kabul edilir. Her bir bölge için en uygun bina yönelimini belirlemek amacıyla tasarım aşamasında güneş yolu projeksiyon yazılımları ve diyagramları yoğun bir şekilde kullanılır. Güneş radyasyonuna maruz kalma sonucu kazanılan toplam enerji (E_{toplam}) Denklem 2.10 kullanılarak bulunur [27]:

$$E_{toplaml} = A \times \int_{hsr}^{hss} (0.834 \times RAD) \times \left(\frac{\cos i}{\cos \theta} \right) dh \quad (2.10)$$

Burada, A bina yüzey alanını, RAD yatay bir yüzeydeki aylık ortalama günlük global radyasyonu, hsr ve hss ise sırasıyla gün doğumu ve gün batımı saat açıları ifade eder.

PDO cephenin camlama alanının duvar alanına oranıdır. Pencere montaj alanı, binanın gün ışığı performansını, ısıtma, soğutma ve havalandırma ihtiyaçlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Ulusal Bina Enerji Kodu (UBEK) ve ASHRAE (90.1), yıl boyunca iklim koşulları ve bina özel gereksinimlerine dayalı olarak PDO değerinin belirlenmesine ilişkin standartlar geliştirmiştir. PDO, cephenin camla kaplı olduğu alanın yüzdesine bağlı olarak 0 ile 1 veya %0 ile %100 aralığında bir değere sahip olabilir. PDO için yaygın bir ortalama standart değer %40'tır; ancak bu değer, iklim koşullarına bağlı olarak daha yüksek veya daha düşük olabilir. Yüksek PDO değerleri için, soğuk iklimlerde pencerelerin yalıtımı iki kez kontrol edilmeli ve sıcak iklimlerde gölgeleme önlemleri dikkate alınmalıdır. PDO 'nın matematiksel temsili şu şekilde ifade edilebilir [27]:

$$PDO = \frac{NCA}{BDA} \quad (2.11)$$

Burada, NCA net camlama alanını, BDA ise brüt duvar alanını ifade eder. Bina pencerelerinin tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer nokta ise, pencerelerin konumlandırılmasıdır. Doğu-Batı eksenine yönelik binalar için, binanın güney cephesi kışın güneş ışınlamına daha fazla maruz kalır. Soğuk havalarda maksimum güneş ısı kazanımı sağlamak için pencereler ağırlıklı olarak binanın güney cephesine yerleştirilmelidir. Öte yandan, çoğunlukla havalandırma ve gün ışığı sağlamak amacıyla tasarlanan kuzey cephesindeki pencereler, güney cephesindeki pencerelere kıyasla daha küçük alanlarda tasarlanmalıdır. Bu sayede, kışın iç mekan ısının dışarıya sızması azalır ve bu da daha düşük ısıtma enerjisi ihtiyacına yol açar. Bununla birlikte, binanın kuzey bölümüne yeterli gün ışığı, pencereleri aracılığıyla sağlanabilir [29]. Özetle, pencerelerin ve camlama alanlarının konumlandırılması, boyutları kadar önemli olabilir, çünkü bunlar, gereken ısıtma/soğutma yüklerini ve gün ışığı performansını büyük ölçüde etkileyebilir.

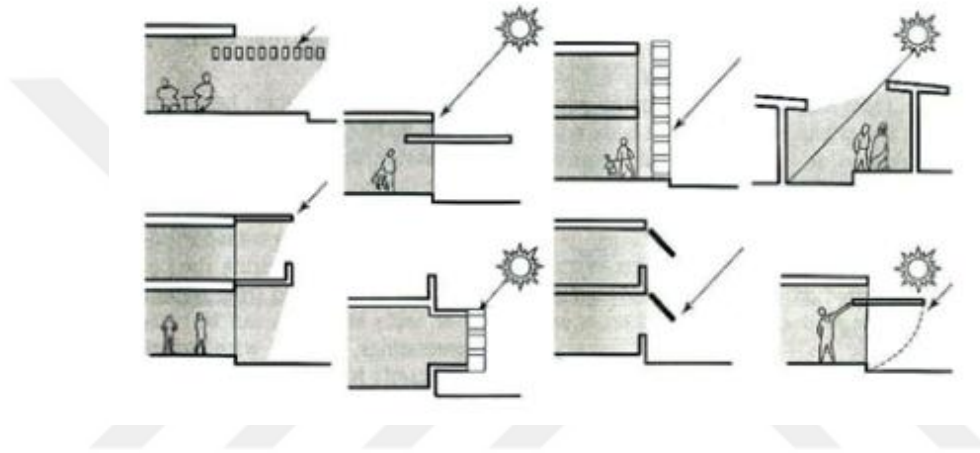
2.2.3. Gölgelemenin Önemi

Güneş ısı kazancını kolaylaştırma/önleme pasif stratejisi açıklanırken belirtildiği gibi, yani binanın aşırı miktarda güneş ışığına maruz kalmasını engellemek, gerekli soğutma enerjisini azaltmak açısından kritik öneme sahiptir. Bina yönelimi ve şekli bu alanda hayati bir rol oynasa da, gölgeleme stratejileri de SEB tasarımında büyük önem taşır. Özellikle, ayarlanabilir gölgeleme stratejileri, binanın gerçek zamanlı gereksinimlerine göre radyant güneş ısını emme veya reddetme konusunda önemli bir esneklik sağlar. Uygun gölgeleme, bina zarfının öz-gölgeleme tasarımı ve gölgeleme cihazlarının kullanılmasıyla elde edilebilir. Cephe öz-gölgeleme yaklaşımında, binanın cephesinin bazı bölümlerini çatı veya üst cephe bölümleri kullanılarak

gölgeleme hedeflenir. Belirli bir noktanın çatı gölgesi altında olduğundan emin olmak için denklem (2.12) kullanılabilir [18]. Bu ilişki, cephedeki bir noktanın hala çatı konturu tarafından gölgelenebileceği maksimum yüksekliği verir. Çatıdan $d_{p,max}$ değerinden daha uzun dikey mesafelere sahip cephe noktaları güneş ışığına maruz kalır.

$$d_{p,max} = d / \tan \theta \quad (2.32)$$

Burada, $d_{p,max}$ çatı ağındaki bir noktadan çatı konturuna olan mesafeyi, θ ise güneş zenit açısını ifade eder. Cephe öz-gölgeleme için çeşitli tasarım yaklaşımları kullanılabilir ve bunlardan bazıları Şekil 2.6'da gösterilmiştir [31].



Şekil 2.6. Gölgeleme yaklaşımlarının gösterimi

Şekil 2.7, cephe öz-gölgeleme özelliklerine sahip bazı inşa edilmiş bina çatılarını göstermektedir [32]. Cephe öz-gölgeleme tasarım stratejileri, kaynak açısından daha fazla tüketim gerektirdiği ve uygulanması daha karmaşık olduğu için, gölgeleme cihazlarının kullanılması da binaya giren tüm güneş radyasyonunu engellemek için mükemmel bir yöntem olabilir.



Şekil 2.7. Cephe öz-gölgeleme özelliğine sahip bir bina

Cephe öz-gölgeleme tasarım stratejileri, kaynak açısından daha fazla tüketim gerektirdiği ve uygulanması daha karmaşık olduğu için, gölgeleme cihazlarının kullanılması da binaya giren tüm güneş radyasyonunu engellemek için mükemmel bir yöntem olabilir. Gölgeleme cihazlarıyla ilgili önemli bir tasarım dikkati, bu cihazların binanın zarfının belirli bir bölümünü güneş ışığından koruyarak gerekli soğutma yükünü azaltabilmesine rağmen, aynı zamanda gün ışığı kalitesini de düşürebilmesidir. Bu nedenle, gün ışığından faydalanma ve binanın soğutma yükünü azaltma arasında bir denge kurulmalıdır. Genellikle, binanın dışına monte edilen gölgeleme cihazları, iç gölgeleme elemanlarına göre daha verimlidir [33].

2.2.4. Gün Işığından Yararlanma Yaklaşımları

Yapay aydınlatma, bazı durumlarda toplam bina elektrik tüketiminin %40'ına kadar varan büyük bir kısmını oluşturabilir. Bu bağlamda, gün ışığı stratejilerinden yararlanmak, binanın ihtiyaç duyduğu enerjiyi önemli ölçüde azaltabilir. SEB'de, gerekli elektrik yükü mümkün olduğunca minimize edilmelidir. Bu nedenle, gün ışığı toplama alanındaki yeni teknolojiler oldukça faydalı olabilir. İç mekân gün ışığını karakterize etmek bir ölçüde karmaşıktır çünkü bu değeri etkileyen birçok faktör vardır; bunlar arasında görüş faktörü, açıklık boyutu ve oda derinliği yer alır. İç mekân aydınlatma değerini elde etmenin bir yöntemi, bunu mevcut toplam dış gün ışığı ile karşılaştırmaktır. Elde edilen oran, “gün ışığı faktörü” (GIF) olarak adlandırılır ve iki şekilde olmak

üzere; evin belirli bir noktası için veya tüm zemin alanı üzerinde ortalama bir değer olarak hesaplanabilir. Aşağıdaki bağıntıya göre GIF yüzde cinsinden bulunur [34]:

$$GIF = \frac{\text{Gün ışığından iç mekan aydınlatma oranı}}{\text{Yatay dış mekan aydınlatma oranı}} \quad (2.13)$$

Bu denklem, standart bulutlu gökyüzü koşulları altında hesaplanmak üzere kullanılmaktadır. GIF bina tipi, pencere boyutları, çerçevelerin konumu ve türü, cam türü ve özellikleri, cam temizliği ve iç alanın yüzey yansıtıcılığı gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, bir yapay gökyüzü kullanılarak ölçekli bir modelle veya gerçek bir bina içinde yapılan saha ölçümlerine dayanarak tahmin edilebilir. Bunun yanı sıra, GIF genellikle üç ana bileşenden oluşur: gökyüzü bileşeni, iç yansıtımlı bileşen ve dış yansıtımlı bileşen. Ortalama GIF_{ort} Denklem 2.14 ile hesaplanır [34] :

$$GIF_{ort} = \frac{\tau_g \varepsilon A_g \varphi}{A(1-R^2)} \quad (2.14)$$

Bu bağıntıda, τ_g kirlenme etkisini dikkate alarak camın ışık geçirgenliğini, ε kirlenme etkisini hesaba katan bakım faktörünü, A_g çerçeveler veya engeller hariç pencerelerin camla kaplı alanını (m^2), φ pencere açıklığı merkezinden ölçülen görünür gökyüzü açısını (derece), A odanın toplam alanını (m^2 cinsinden) ve R odanın çevresindeki yüzeylerin ortalama yansıtıcılığını temsil eder. Bina aydınlatması, binanın toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Sıfır enerji hedefi göz önüne alındığında, gerekli elektrik yükünü azaltmak ve dolayısıyla enerji satın alma veya üretme ihtiyacını düşürmek için bina aydınlatmasına önemli bir dikkat gösterilmelidir. Gün ışığı, harika bir ışık kaynağıdır ve gündüz saatlerinde maksimum gün ışığı toplama, belirtilen hedefe önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Geleneksel gün ışığı toplama cihazları, çoğunlukla karmaşıklık içermeyen binalarda pasif bir şekilde uygulanır. Bu cihazlar iki kategoriye ayrılabilir: yan aydınlatma ve üst aydınlatma sistemleri. Yan aydınlatma sistemleri, ticari pencere açıklıkları gibi binanın yan tarafında kurulur; üst aydınlatma modülleri ise binanın çatı veya tavan biriminde yer alır. Çatı veya tavandaki yaygın açıklıklar, üst aydınlatma sistemlerine örnek olarak verilebilir. Ancak, üst aydınlatma sistemleri tasarlanırken dikkatli olunmalıdır, çünkü özellikle yaz aylarında binanın iç kısmında aşırı ısınmaya yol açabilirler.

Günümüzdeki birçok modern yapı, özellikle ticari binalar, karmaşık mimari tasarımlara, nispeten yüksek derinliklere sahip olup, diğer engeller tarafından kısmen gölgelenmekte ve bina çekirdeğine daha yakın bölümlerin aydınlatılmasında zorluklar yaşamaktadır. Bu tür durumlarda, yenilikçi günışığı aydınlatma sistemleri önemli ölçüde fayda sağlayabilir. Yenilikçi günışığı modülleri, günışığını toplayarak binanın doğal ışık almayan derinlikleri veya pencere ya da çatı açıklığı bulunmayan alanları gibi bölgelere yansıtmak, yönlendirmek ya da kırmak suretiyle ileten sistemlerdir. Bu tür alanların tamamen ya da kısmen günışığı kullanılarak aydınlatılması, binanın

toplam elektrik yükünü önemli ölçüde azaltabilir. Bu modüller genel olarak ışık yönlendirme sistemleri ve ışık taşıma sistemleri olmak üzere iki gruba ayrılır.

a) Işık Yönlendirme Sistemleri:

Bu sistemler, günışığını doğal olarak az ışık alan ya da pencere yoluyla yeterli ışık ulaşmayan oda derinliklerine yansıtarak ve yönlendirerek ileten modüllerdir. Genellikle basit yapıya sahip olup, bina pencerelerine yapılan düşük maliyetli modifikasyonlarla uygulanabilirler. Bu tür sistemlere güneş perdeleri, stor perdeler ve jaluziler örnek verilebilir. Işık yönlendirme sistemleri, günışığının iç mekânda daha homojen dağılmasını sağlayarak parlamayı (göz kamaşmasını) azaltır, pencere ve açıklıklara yakın bölgelerdeki aşırı aydınlatmayı engeller ve böylece bu bölgelerin aşırı ısınmasının önüne geçer. Kullanım kolaylığı, ekonomik olarak uygulanabilir maliyetleri, düşük bakım gereksinimleri ve mevcut binalara herhangi bir büyük yapısal değişikliğe gerek kalmadan entegre edilebilmeleri, bu sistemlerin başlıca avantajları arasında yer almaktadır [35].

b) Işık Taşıma Sistemleri:

Bu sistemler, günışığını toplar ve aynalar veya ışık yoğunlaştırıcılar gibi bir dizi optik cihaz aracılığıyla, bina açıklıklarına erişimi olmayan alanlara optik olarak taşır. Işık yönlendirme sistemlerine kıyasla daha gelişmiş olan bu sistemler, 10 metreden daha derin alanların aydınlatılması için kullanılabilir. Işık boruları ve anidolik günışığı modülleri, bu sistemlere örnek olarak verilebilir. Işık boruları (aynı zamanda ışık kanalları veya tübüler günışığı cihazları olarak da bilinir), günışığını toplar ve kanal içine yerleştirilmiş bir dizi ayna aracılığıyla bina çekirdek bölgelerine iletir. Işık boruları dikey ve yatay olmak üzere iki modele sahiptir ve 30 metreden daha derin bina alanlarının aydınlatılması için kullanılabilir. Şekil 2.8, günışığına doğrudan erişimi olmayan bina derinliklerinde günışığı sağlamak amacıyla bir SEB prototipinde uygulanan iki tür ışık taşıma modülünü, yani ayna kanalları ve döner aynalı ışık borularını göstermektedir [35].

Günışığı yönlendirme sistemlerine kıyasla daha verimli olmalarına rağmen, bu sistemler oldukça pahalıdır ve şu an için yalnızca inşaat maliyetlerinin belirleyici bir kriter olmadığı ticari binalarda ticarileştirilmiştir. Ayrıca, mevcut bir binaya kurulum yapılmak istendiğinde, genellikle yüksek düzeyde bina tadilatı gerektirmektedir. Bunun yanı sıra, bu sistemlerin çapı, genellikle uzunluklarının 20 katından daha fazla olamayacağı için pratik sınırlamalar da bulunmaktadır. Düşük güneş yüksekliklerinde, ışık kanalı boyunca meydana gelen çoklu yansıma kayıpları nedeniyle performansları düşmektedir. Bu tür modüllerin verimliliğini artırmak amacıyla Fresnel mercekleri veya diğer ışık yoğunlaştırıcılar kullanılabilir; ancak yoğunlaştırıcıların kullanımı, zaten yüksek olan ilk yatırım maliyetini daha da artırmaktadır. Yüksek ilk yatırım maliyeti, performans değişkenliği, bakım gereksinimi ve bina iç bölümlerinde gerekli olan büyük yapısal değişiklikler, bu ürünlerin ticarileşmesini sınırlayan başlıca faktörler arasında yer almaktadır [34].



Şekil 2.8. Işık taşıma sisteminin uygulanmış hali

c) Yalıtım ve Camlama Malzemeleri

Bir binada sıfır enerji hedeflerine ulaşmak için yalıtım malzemelerinin doğru şekilde entegre edilmesi son derece önemlidir. Yalıtım, sıcak iklimlerde dış ortam sıcaklığının binaya girişini, soğuk iklimlerde ise iç ortam sıcaklığının binadan çıkışını engelleyebilir. Uygun bir yalıtım malzemesi şu özelliklere sahip olmalıdır [28].

Isıl direnç ve ısıl atalet, uygun yalıtım tipini seçmede belirleyici faktörlerdir. Çoğu uygulamada, daha yüksek ısıl direnç ve ısıl atalet tercih edilmektedir. Düşük su içeriği tercih edilmektedir; zira su, sıvı ya da buhar halinde, taş yünü, cam yünü ve fiberglas gibi bazı yalıtım malzemelerinin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Çevresel etki, yalıtım malzemesi seçiminde bir diğer önemli unsurdur. Ekstrüde polistiren ve poliizosiyanürat gibi bazı yalıtım malzemeleri, yaşam döngüleri boyunca ozon tabakasının incelmeye ve dolayısıyla küresel ısınmaya neden olabilecek kloroflorokarbonlar (CFC) ve hidrokloroflorokarbonlar (HCFC) yaymaktadır.

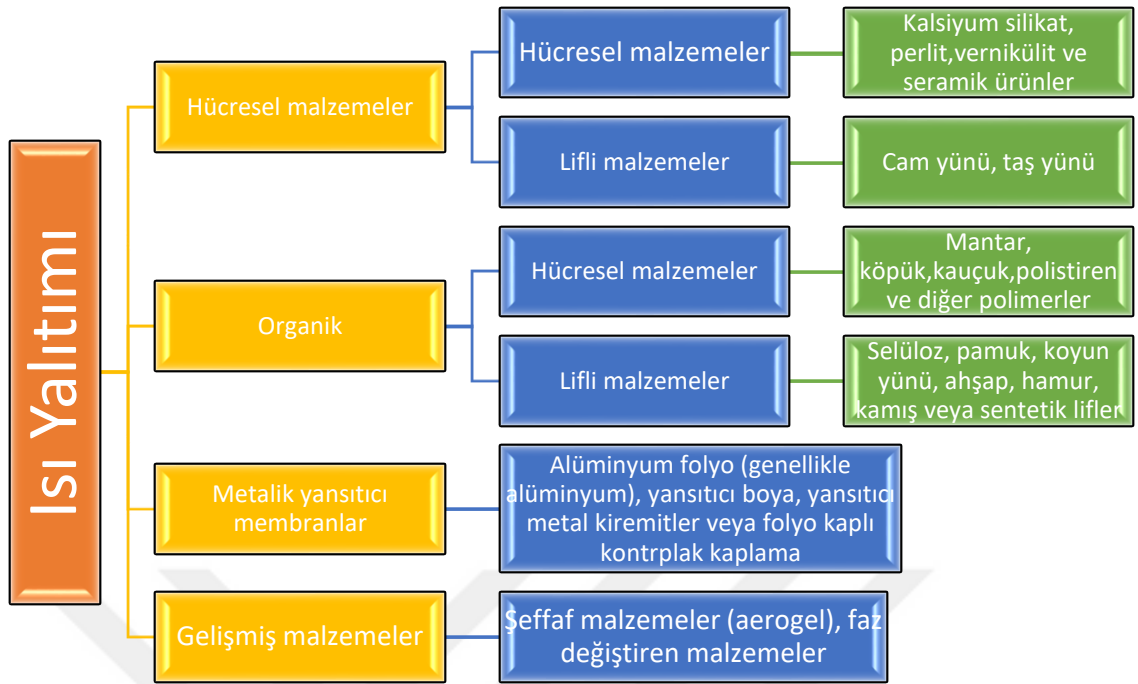
Sağlık ve güvenlik unsurları da yalıtım malzemesi seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır. Bazı yalıtım malzemeleri, korunmasız ciltle temas ettiğinde deri veya gözlerde ciddi tahrişlere yol açabilir, hatta solunum yolu sorunlarına veya kansere neden olabilir. Alevlenebilirlik de bina tasarımında yangın güvenliği önlemleri alınırken dikkate alınmalıdır. Yalıtım malzemeleri; alev yayılımı, yakıt katkısı ve duman oluşumu gibi faktörleri kapsayan yangın testleriyle kontrol edilmeli ve derecelendirilmelidir. Yangın geciktirici katkı maddeleri yangın güvenliğini artırabilir; ancak yalıtım panelinde yer kapladıkları için ısıl direnci azaltırlar.

Ekonomik uygulanabilirlik, termal yalıtım malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken son önemli faktördür. Bu bağlamda, yatırım geri dönüş analizi faydalı olmaktadır. Yalıtım malzemeleri, çeşitli yöntemlerle bina zarflarına entegre edilebilir. Bu yöntemler arasında; lifli battaniyeler, püskürtülerek doldurulan gevşek dolgular, beton gibi yapısal malzemelerle karıştırılan yalıtımlar, rijit paneller, köpük veya sprey yalıtımlar, levha ve bloklar gibi yapısal formlar yer almaktadır. Sadineni vd. [28] yalıtım malzemeleri dört ana sınıfa ayrılmaktadır: organik, inorganik,

metalik ya da metalleştirilmiş yansıtıcı membranlar ve ileri düzey malzemeler. Ayrıca, vakum yalıtım panelleri, vakumlanmış folyo ile kaplanmış gözenekli malzemelerden üretilen yüksek kaliteli yalıtım elemanlarıdır. Bu panellerde yaygın olarak kullanılan gözenekli yapı dumanlaştırılmış silika (SiO_x) olup, yaklaşık $0,003 \text{ W/m.K}$ ısı iletkenliğine (50 mbar basınçta) ulaşabilmektedir. Atmosfer basıncında ise bu paneller, geleneksel yalıtım malzemelerinin yarısı kadar olan $0,02 \text{ W/m.K}$ değerine kadar düşen ısı iletkenlikleri sunabilmektedir.

Camlama malzemeleri, genel olarak üç temel amaçla kullanılmaktadır: yüksek performanslı yalıtım, güneş kazanım kontrolü ve güneşiği uygulamaları. Literatürde, özellikle SEB için çeşitli yeni camlama teknolojileri incelenmekte ve test edilmektedir. Bu teknolojilerden bazıları şunlardır:

- **Aerogel camlama:** Aerogeller, %50'nin üzerinde hacimsel gözenekliliğe ve $1\text{--}150 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen yoğunluklara sahip, açık gözenekli katı malzemelerdir. Çoğu durumda, hacimlerinin %90 ila %99,8'i havadan oluşmaktadır. Silika, alümina, lantanitler, geçiş metali oksitleri, metal kalkojenitler, organik ve inorganik polimerler ile karbon gibi çeşitli malzemeler aerogel üretiminde temel olarak kullanılabilir. Düşük yoğunlukları, kabul edilebilir performansları ve yüksek ışık dağıtma yetenekleri nedeniyle özellikle çatı uygulamaları için uygun bir tercih oluşturmaktadır.
- **Vakum camlama:** Bu camlama türü, iki cam paneli arasındaki havanın boşaltılmasıyla oluşturulur ve bu sayede ısı iletimi ve taşınımı büyük ölçüde engellenir. Bu tür camlamalarda cam merkezinin U-değeri $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ kadar düşük seviyelere ulaşabilir. Cam panellerin bir ya da her ikisi, güneş ışığının iç mekâna yeniden yayılımını azaltan düşük emisyonlu kaplamalarla kaplanabilir. Bu yaklaşım, uzun süreli vakum koruma sorunlarına rağmen, camlama sistemlerinde oldukça popülerdir.
- **Anahtarlanabilir yansıtıcı camlama:** Bu tür camlama sistemleri, gelen güneş radyasyonu miktarına bağlı olarak değişken optik özelliklere sahiptir. Bu optik özelliklerdeki değişim, düşük bir DC voltaj ya da hidrojen gazı kullanılarak sağlanabilir. Ayrıca, ışık yönlendirme elemanları aracılığıyla da bu değişim gerçekleştirilebilir. Ancak bu teknoloji, yüksek maliyet, düşük garanti süresi, parıltı sorunları, anahtarlama süresindeki kontrol zorlukları ve renk doğruluğu problemleri nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir [19]. Şekil 2.9, binalarda yaygın olarak kullanılan yalıtım türlerini sınıflandırmaktadır.



Şekil 2.9. Isı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması

2.2.5. Soğurulan Güneş Enerjisinin Modülasyonu

Bir binanın soğurduğu güneş enerjisi, istenen termal etkiyi elde etmek amacıyla modüle edilebilir. Güneş ısısı, daha sonra kademeli olarak serbest bırakılmak üzere depolanabilir ya da bir hava katmanı içinde hapsedilerek sera etkisi oluşturabilir ve böylece bina ısınmasına katkıda bulunabilir. Bu işlevlerin tümü, çoğunlukla pasif çalışan modüller aracılığıyla gerçekleştirilir ve bu modüllerin entegrasyonu, önemli mimari tasarım hususları veya bina zarfında yeni malzemelerin kullanımı gerektirebilir. Bu alandaki temel yaklaşım, termal enerji depolamadır.

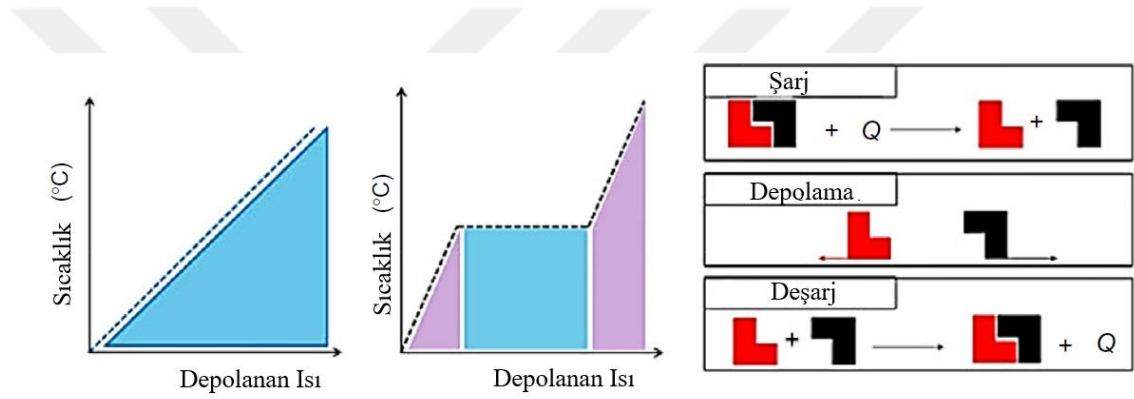
2.3. Termal Enerji Depolama

Bina içinde termal enerji depolama birimlerinin kullanılması, binanın termal davranışını iyileştirebilir. Bu iyileştirme, bina için gerekli ısıtma/soğutma yüklerinin azaltılması ya da tepe yüklerin elektrik veya sıcak su gibi hizmetlerin daha ucuz olduğu günün belirli saatlerine kaydırılmasıyla sağlanabilir. SEB, mümkün olduğunca harici enerji kaynaklarından bağımsız olarak verimli çalışmak zorunda olduğundan, bu tür binalarda enerji depolama modüllerinin uygulanması bir zorunluluktur. Bu durum, özellikle sıfır maliyetli enerji binaları için geçerlidir; çünkü bu tür binalarda enerji maliyetlerinin olabildiğince düşürülmesi gerekmektedir.

Termal enerji depolama Şekil 2.10'da gösterildiği gibi duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama olmak üzere üç şekilde yapılabilir. Termokimyasal enerji depolama, genellikle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için tercih edildiğinden, bina

uygulamaları için uygun değildir. Öte yandan, duyulur ısı ve gizli ısı depolama çözümleri, sıcaklık aralığı, güvenlik, uygulanabilirlik ve maliyet açısından bina uygulamalarının gereksinimlerini karşılayabilir.

Duyulur ısı depolama yönteminde, enerji depolandıkça sistem sıcaklığı artar. Buna karşılık, gizli ısı depolama tekniklerinde, enerjinin büyük bir kısmı, moleküller arası bağların oluşturulması ya da kırılması yoluyla depolanır veya serbest bırakılır ve bu süreç, yaklaşık olarak sabit sıcaklıklarda bir faz değişimine neden olur. Her iki yöntem de kendine özgü avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Duyulur ısı depolama modülleri daha gelişmiş, inşası daha ucuz ve uygulanması daha kolay olmasına rağmen, gizli ısı depolama birimleri, daha az alan kaplayarak daha yüksek performans sağlayabilir. Su havuzları (çoğunlukla çatı havuzları) ve FDM, sırasıyla binalarda en yaygın kullanılan duyulur ve gizli termal enerji depolama çözümlerindendir [36].



Şekil 2.10. Isıl enerji depolama yöntemleri

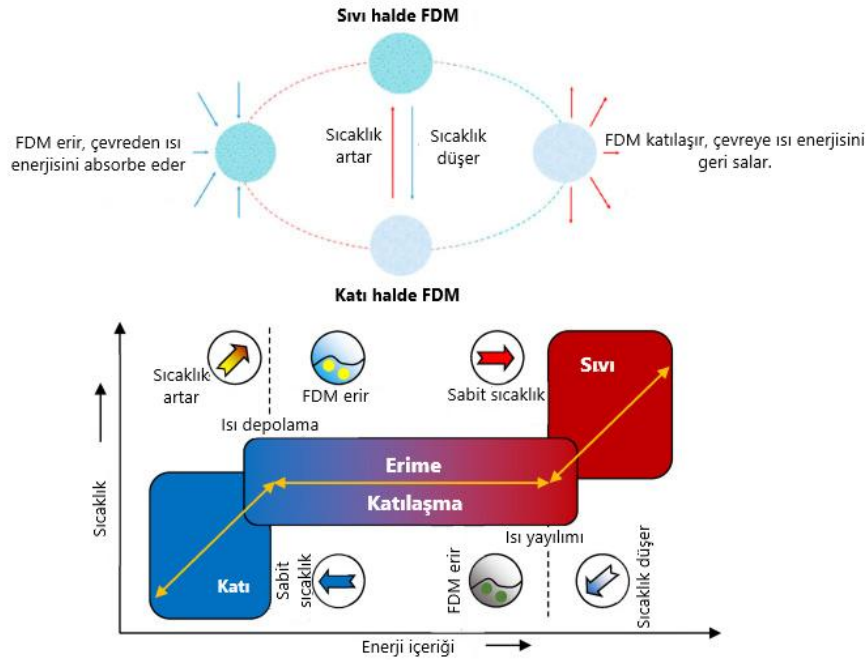
Duyulur ısı depolama sistemleri, güneş ışınlarının yoğun olduğu saatlerden daha sonraki saatlere veya geceye kadar tepe sıcaklıklarının kaydırılması amacıyla binalarda kullanılabilir. Bu sayede, gündüz ve gece boyunca gerekli olan soğutma ve ısıtma yükleri azaltılabilir. Bu bağlamda, binanın güneş ışınımına en fazla maruz kalan kısmı genellikle çatı olduğundan, çatılara ısı depolama modüllerinin kurulması, binanın ısıtma/soğutma yüklerini azaltmada etkili olabilir. Yüksek özgül ısı kapasitesine sahip, zehirsiz ve kolay erişilebilir bir malzeme olan su, çatı üzerindeki duyulur ısı depolama sistemleri için uygun bir tercih olabilir. Genellikle betondan yapılan çatı su havuzları, binalarda hem pasif ısıtma hem de soğutma amacıyla çatıya entegre edilebilir.

2.4. Faz Değiştiren Malzemeler

Termal enerji depolama sistemleri, duyulur ısı depolama yerine gizli ısı depolamaya daha uygundur. Bu tür sistemlerde, enerji transferi ve depolamanın büyük bir kısmı, bileşen malzemenin faz değişimi sırasında gerçekleşir ve bu süreçte sıcaklık yaklaşık olarak sabit kalır. Dolayısıyla,

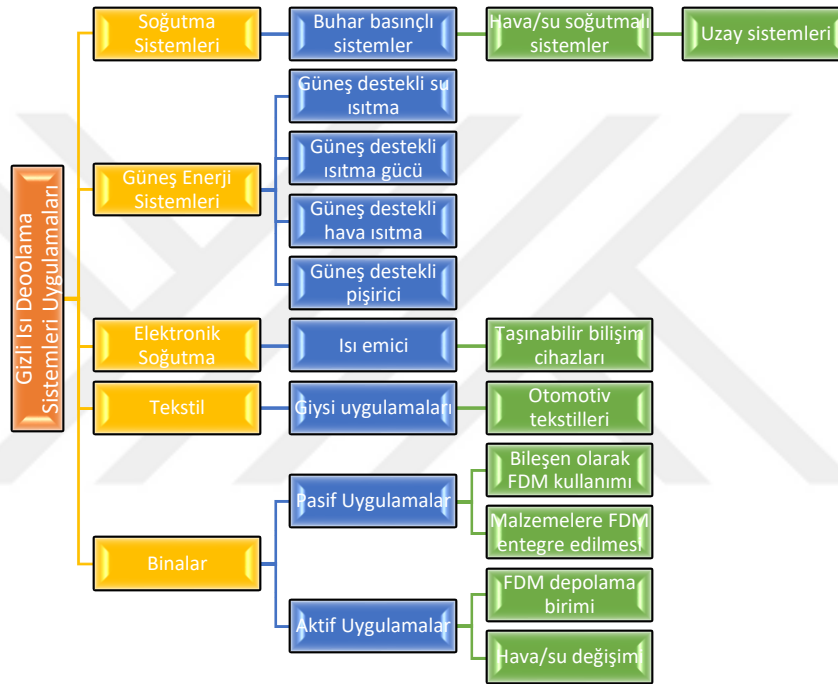
enerji depolama süreci çok daha dar bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu durum, sistemin enerji depolama yoğunluğunu önemli ölçüde artırarak, geleneksel duylur ısı depolama sistemleriyle kıyaslandığında daha küçük hacimlerde çok daha fazla ısı depolamayı mümkün kılar. Bu tür sistemlerde kullanılan malzemeler FDM olarak adlandırılmaktadır. Genel bir sınıflandırmaya göre, FDM'ler katı-katı ve katı-sıvı faz değişim malzemeleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Katı-katı FDM'lerde, malzeme hala katı fazda kalırken, kristal yapısı ve şekli ısıyı absorbe ederek değişir ve yeni bir kristal yapı oluşur. Buna karşılık, katı-sıvı FDM'lerde, ısıyı absorbe etme sürecinde moleküller arası bağlar koparak faz değişimi gerçekleşir. Bu süreç, sistemin enerji depolama yoğunluğunu artıran temel bir mekanizma oluşturmaktadır [37]. FDM kullanan gizli ısı depolama (GID) sistemleri, üç temel enerji depolama teknolojisi arasında belirli bir sıcaklık aralığında enerji depolama ve salımını yüksek verimlilikle gerçekleştirme kapasitesi nedeniyle en uygulanabilir seçenek olarak öne çıkmaktadır [38,39]. FDM'ler, enerji tasarrufu sağlayan etkin bir çözüm olarak binalarda geniş çapta ilgi görmüş ve enerji arz-talep dengesizliğini gidermede önemli bir rol üstlenmiştir [40].

Katı-sıvı FDM'ler, şarj ve deşarj aşamalarında endotermik ve ekzotermik süreçler aracılığıyla ısı enerjisini absorbe edebilir ve geri salabilir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, bu faz değişimi yüksek entalpi değerine sahip olup, hacimde minimum değişiklikle gerçekleşmektedir [41]. Bu özellikleri sayesinde FDM'ler, kolay kullanılabilir ve yüksek verimli bir TES çözümü sunmaktadır.



Şekil 2.11. FDM'lerde faz değişim süreçleri

FDM kullanılan binalar, FDM içermeyen binalara kıyasla daha düşük sıcaklık dalgalanmalarına ve daha kısa zaman gecikmelerine maruz kalarak termal konforu önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 2.12’de, GID sistemlerinin çeşitli uygulama alanlarını özetlemektedir. FDM’lerin termofiziksel özelliklerine bağlı olarak iç mekan konfor sıcaklığına uygun erime noktalarına sahip malzemelerin seçimiyle, soğutma ve ısıtma yükleri azaltılabilir, fazla ısının düşük talep saatlerinde absorbe edilmesi sağlanabilir ve konforlu iç mekan sıcaklık koşulları sürdürülebilir hale getirilebilir [42].

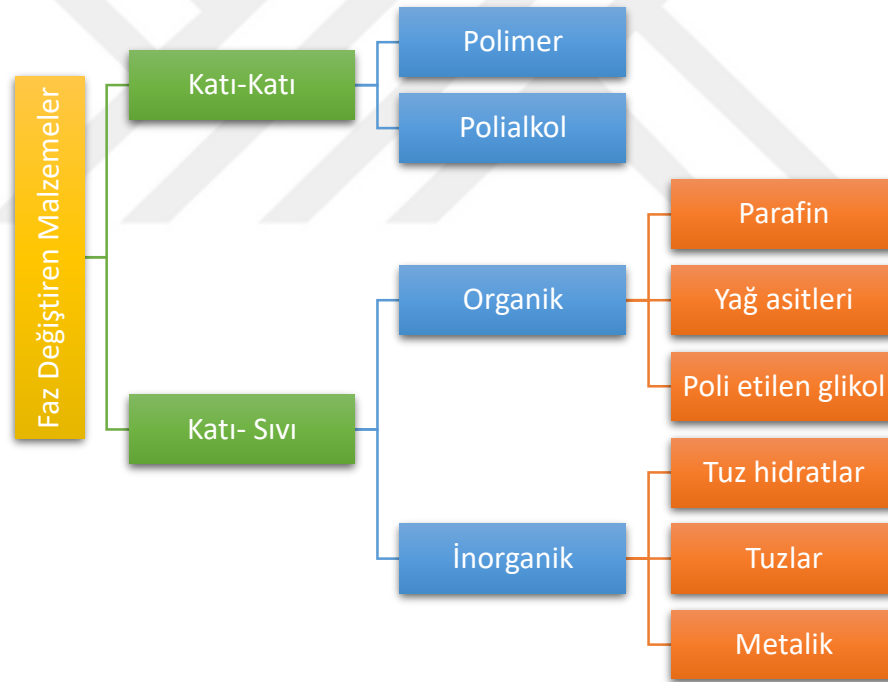


Şekil 2.12. FDM’lerin uygulama alanları

2.4.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel bir sınıflandırma kapsamında, FDM’ler katı-katı ve katı-sıvı türleri olarak iki ana gruba ayrılabilir. Katı-katı FDM’lerde, ısı enerjisi absorbe edildiğinde malzemenin kristal yapısı ve şekli değişerek yeni bir kristal yapı oluşur; ancak malzeme hâlâ katı fazda kalır. Öte yandan, katı-sıvı FDM’lerde ısı absorpsiyonu sonucunda moleküler arası bağlar kırılır ve bu süreçte bir faz geçişi meydana gelir. Katı-katı FDM’lerin enerji depolama yoğunluğu, katı-sıvı olanlara kıyasla çok daha düşüktür. Katı-sıvı FDM’ler ise kendi içinde organik, inorganik ve ötektik sınıflara ayrılır. Organik FDM’ler başlıca parafin mumları, yağ asitleri ve polietilen glikol gibi malzemeleri içerirken; inorganik FDM’ler arasında tuz hidratları, tuzlar ve metalik FDM’ler yer alır. Ötektik FDM’ler ise organik ve/veya inorganik FDM’lerin karışımından oluşan bileşik sistemlerdir [43].

Bina uygulamalarında kullanılacak uygun FDM türünün seçimi için belirli teknik özellikler dikkate alınmalıdır. Uygun bir FDM, yüksek erime ısıya sahip olmalı ve erime sıcaklığı, binanın bulunduğu iklim koşullarına uygun bir aralıkta bulunmalıdır. Ayrıca, iyi bir termal iletkenlik özelliğine sahip olması gerekir ki ısı depolama ve salım süreçleri etkin bir şekilde gerçekleşebilsin. Binalarda yapısal değişikliklerin yüksek maliyetli ve uygulanması zor olabileceği göz önünde bulundurulduğunda, FDM'nin faz değişim döngülerine karşı yapısal kararlılığı, ideal olarak günde en az iki kez tekrarlanan erime/donma döngüsüne karşı yıllar boyunca dayanıklı olmalıdır. Bunun yanında, malzemenin erişilebilir, ekonomik, kullanımı kolay ve güvenli olması da önem arz eder. Ayrıca, malzemenin güvenlik karakteristikleri açısından da belirli kriterleri karşılaması gerekir: Alevlenebilirliğe karşı dirençli, toksik olmayan ve insan sağlığına zararlı olmayan bir yapıda olmalıdır; zira kullanım ömrü boyunca malzemenin dış ortama salınma riski mevcuttur. Aynı şekilde, kap konteyner sistemlerine karşı korozif olmaması da gereklidir [44]. Şekil 2.13, FDM'lerin sınıflandırma şemasını göstermektedir [43].



Şekil 2.13. FDM'lerin sınıflandırılması

İnorganik FDM'lerin önemli bir kısmını oluşturan tuz hidratları, genel olarak $AB \cdot nH_2O$ kimyasal yapısına sahiptir. Burada AB, tuzun baz bileşenini, nH_2O ise kristal yapı içerisinde bulunan belirli sayıda su molekülünü ifade eder. Tuz hidratları, organik FDM'lere kıyasla çok daha yüksek erime ısıya yoğunluğuna ve termal iletkenliğe sahiptir. Bu özellikleri sayesinde SEB

uygulamalarında pasif ısı enerjisi depolama çözümü olarak kullanılma potansiyelleri oldukça yüksektir. Ancak, bu malzemelerin bazı doğal sınırlılıkları mevcuttur.

Tuz hidratlarının başlıca iki temel dezavantajı aşırı soğuma ve uyumsuz erimedir. Aşırı soğuma durumunda, sıvı fazdaki madde erime sıcaklığına kadar soğutulduğunda katılaşma süreci başlamayabilir, bu da aşırı soğuma etkisine yol açar. Tuz hidratlarının büyük bir kısmı, erime/donma döngüsü sırasında belirli derecede bu etkiyi gösterir. Bu gibi durumlarda, mekanik veya kimyasal kristalleştirme yöntemleri uygulanmalıdır. Ayrıca tuz hidrat kristalleri erime/donma işlemi esnasında bir miktar su içeriğini kaybedebilir. Bu durumda daha az su içeren moleküllerin yoğunlukları da daha düşük olacağından, bu moleküller ana maddeden ayrılır. Süreç tekrarlandıkça, bu ayrışma artarak faz ayrışmasına ve sonuç olarak uyumsuz erimeye neden olur. Aşırı soğuma ve uyumsuz erime, uzun vadede sistem kararlılığı açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır. Buna karşılık, organik FDM'ler özellikle parafin mumları ve yağ asitleri uzun süreli erime/donma döngüleri boyunca istenen düzeyde termal kararlılık sergiler. Bu nedenle, literatürde ve endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan FDM türü organik olanlardır. Ancak, bu malzemeler tuz hidratlarına göre daha düşük enerji depolama yoğunluğuna sahiptir. Dahası, termal iletkenlikleri genellikle oldukça düşüktür [45].

2.5. Binaya Entegre Fotovoltaik Sistemler

Binaya entegre fotovoltaik sistemler (BIPV), küresel PV pazarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır ve güneş enerjisi teknolojisi segmentinde en hızlı büyüyen alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Yapılan tahminlere göre, BIPV kapasitesi 2011 ile 2017 yılları arasında %50 oranında artış göstermiştir. Aslında, BIPV teknolojisi, verimli SEB tasarımı yolunda en kritik güneş enerjisi teknolojisi olarak kabul edilmektedir. BIPV sistemleri; binaları iklimsel dış etkenlere karşı koruma, ısı yalıtımı ve ses yalıtımı sağlama, hatta yapısal dayanım kazandırma gibi çok yönlü işlevlere sahiptir. Bununla birlikte, estetik açıdan da bina tasarımını geliştirme potansiyeli sunar. Özellikle saydam ve yarı saydam PV modüller, gün ışığının iç mekâna girmesine olanak tanıırken aynı anda elektrik üretimi de sağlar. Tüm bu avantajlar, enerji üretimi ile birlikte sağlanmakta olup; aynı zamanda geleneksel yapı malzemeleri yerine BIPV ürünlerinin kullanılması, klasik PV sistemlerinde ihtiyaç duyulan montaj altyapısı (örneğin raylar ve bağlantı braketleri gibi) gereksinimini ortadan kaldırarak ek kurulum maliyetlerini azaltmaktadır. Dünya genelinde birçok tanınmış firma BIPV ürünleri üretmektedir [46].

2.5.1. Fotovoltaik Teknoloji

Birinci nesil güneş hücreleri, iyi bilinen kristal silikon (c-Si) hücrelerdir. Yaklaşık 50 yıllık bir uygulama geçmişine sahip bu hücrelerin çalışma prensipleri son derece iyi anlaşılmış olup,

zengin ve tamamlanmış bir veri tabanına dayanmaktadır. Wafer (ince levha) bazlı olarak üretilen bu hücreler günümüzde tamamen sanayileşmiş durumdadır. Ayrıca üretim, kurulum, işletme, bakım ve tüm yaşam döngüsü boyunca performansla ilgili tüm gerekli teknik bilgi ve süreçler sağlam bir şekilde oluşturulmuştur. Bu durum, c-Si hücrelerinin 2014 yılı itibarıyla küresel PV pazarında %90 gibi büyük bir üretim payına sahip olmasını sağlamıştır.

Kristal silikon hücreler iki ana varyantta üretilmektedir: tek kristalli (monokristal c-Si) ve çok kristalli (polikristal c-Si). 2014 yılı itibarıyla, monokristal hücreler yaklaşık %35, polikristal olanlar ise %55 oranında pazar payına sahiptir. Monokristal c-Si hücreler genellikle Czochralski yöntemi, float-zone ya da Bridgman teknikleriyle üretilir; bu yöntemler aynı zamanda entegre devre üretiminde kullanılan wafer üretiminde de yaygındır. Bu hücreler, daha düzenli silikon kristal yapısına sahip olduklarından dolayı daha yüksek elektriksel verimlilik sunarlar. Buna karşın, polikristal c-Si hücreler, silikon hammaddesinin döküm teknolojisiyle üretilir. Üretim süreci daha basit ve ekonomiktir; ancak düzensiz kristal yapı nedeniyle elektron-delik çiftlerinin rekombinasyon ihtimali artar, bu da elektrik akışını zorlaştırır ve şarj taşıyıcılarının toplanmasını engeller. Bu nedenle, performansları monokristal hücrelere kıyasla daha düşüktür. Laboratuvar ölçeğinde, monokristal c-Si hücreler %25,6, polikristal olanlar ise %20,4 verimlilik göstermektedir. Geniş alan uygulamalarında ise bu değerler sırasıyla %20,8 ve %18,5 olarak raporlanmıştır. Silikon temelli güneş hücreleri, yaygın kullanımına rağmen çeşitli teknik sınırlamalara da sahiptir. Bu durum, yeni nesil PV teknolojilerine olan ilgiyi artırmış ve ikinci ile üçüncü nesil hücre teknolojilerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Silikon hücrelerin temel sorunlarından biri, dolaylı bant aralığına (1,1 eV) sahip olmalarıdır. Bu nedenle, gelen ışığın büyük kısmını absorbe edebilmek için kalın silikon levhalara ihtiyaç duyulur ya da ışık yoğunlaştırıcı sistemler kullanılır. Ancak bu çözümler, toplam sistem maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca bu hücreler, düşük güç/ağırlık oranına ve sınırlı esnekliğe sahiptir, bu da sistem tasarımında çeşitli kısıtlamalara yol açmaktadır.

Silikon dışında, III-V grubu elementlerin oluşturduğu yarı iletken birleşimler de (tek ya da çoklu eklemli yapılar halinde) PV uygulamalara uygun fotoelektrik özellikler sergileyebilmektedir. Bu malzemeler arasında, özellikle tek kristalli galyum arsenür (GaAs) wafer'lar, silikon hücrelere kıyasla son derece üstün PV performansı sunmaktadır. GaAs hücreleri, laboratuvar ortamında %28,8, modül düzeyinde ise %24,1 verimliliğe ulaşarak oldukça yüksek güç dönüşüm oranları sergilemiştir. Kristal yapısı, elektronların daha hızlı hareket etmesine olanak tanır; ayrıca yüksek ışık absorpsiyon katsayısına, çok düşük radyatif olmayan enerji kaybına, uzun taşıyıcı ömrüne ve yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahiptir. GaAs wafer'lar, Czochralski veya Bridgman teknikleriyle üretilmektedir. Ancak bu malzemenin en büyük dezavantajı, istenen kristal saflık seviyesine ulaşmak için oldukça yüksek maliyetli üretim süreçlerine ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca GaAs hammaddesi oldukça pahalıdır; bu nedenle bir GaAs wafer üretimi, silikon wafer üretimine göre

yaklaşık 1000 kat daha maliyetlidir. Bu yüksek maliyet, GaAs hücrelerin yaygın kullanıma sunulmasını engellemiş ve yalnızca uzay gibi özel uygulamalarla sınırlı kalmasına neden olmuştur. Birden fazla III-V grup elementi, farklı bant aralığı enerjileriyle birleştirilerek daha geniş bir güneş spektrumu kapsanabilir ve bu sayede çok daha yüksek dönüşüm verimlilikleri elde edilebilir. Tek eklemlili cihazlarda, sadece belirli bir bant aralığının üzerindeki fotonlar elektron geçişini başlatabilir; bant aralığından daha düşük enerjili fotonlar ise ısıya dönüşerek hücre verimliliğini düşürür. Ancak birden fazla III-V malzeme eklemlili içeren yapılar bu sınırlamayı aşabilir. Örneğin, 1,42 eV bant aralığına sahip GaAs üst hücresi ile 0,72 eV bant aralığına sahip galyum antimonid (GaSb) alt hücresinden oluşan bir güneş hücresi %30'un üzerinde verimlilik sağlayabilir. Ancak, GaAs örneğinde olduğu gibi, bu hücrelerin üretim süreci ve kullanılan malzemeler oldukça pahalıdır. Bu nedenle, III-V çok eklemlili hücrelerin uygulamaları yalnızca uzay gibi özel alanlarla sınırlı kalmaktadır.

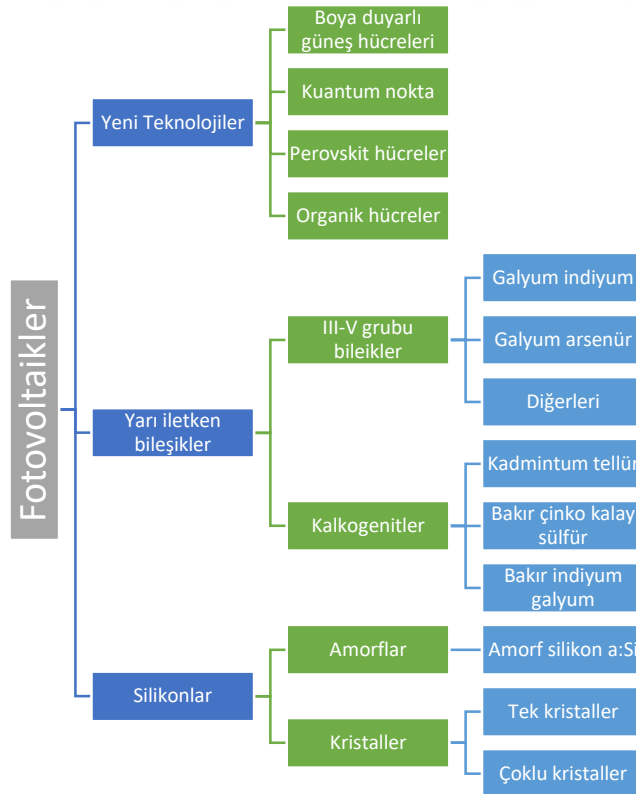
İnce film güneş hücreleri, silikon ve GaAs gibi wafer tabanlı hücrelerin aksine, daha yeni bir teknolojiyi temsil etmektedir. Bu teknoloji kapsamında, ışığı silikon hücrelere göre çok daha yüksek oranlarda absorbe edebilen malzemeler kullanılmakta, bu sayede mikron seviyesine kadar ince hücreler üretilmektedir. İnce film hücreleri, ticari ve gelişmekte olan teknolojiler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Ticari olanlar literatürde genellikle ikinci nesil PV hücreler olarak anılırken, gelişmekte olanlar üçüncü nesil teknolojilere karşılık gelmektedir. En gelişmiş ticari ince film teknolojileri arasında hidrojenlenmiş amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır-indiyum-galyum-diselenid (CIGS) yer almaktadır. Bu hücrelerin üretimi daha otomatik ve basitleştirilmiş biçimde gerçekleştirilebildiğinden, birim watt başına üretim maliyeti düşüktür. Ayrıca belirli BIPV uygulamalarında faydalı olabilecek şekilde esneklik de sağlayabilirler. Ancak, bu hücrelerin çoğunun verimliliği silikon hücrelere göre daha düşüktür ve genellikle %12–15 aralığında kalmaktadır. Ayrıca, özellikle CIGS gibi karmaşık element bileşimlerine sahip teknolojilerde, doğru oranlarda malzeme birleştirmek büyük ölçekli üretimde zorluk yaratmaktadır. Buna ek olarak, kullanılan bazı elementler (örneğin tellür ve indiyum) nadir ve pahalıdır; kadmiyum gibi bazıları ise toksiktir. Ayrıca, uzun vadeli güvenilirlik konusunda da bazı soru işaretleri bulunmaktadır.

Amorf silikon (a-Si) ince film ürünleri üreten ilk firmalardan biri Uni-Solar'dır. Bu teknolojiye, yaklaşık 1 mikron kalınlığında ince bir silikon tabakası, buhar fazı biriktirme (vapor deposition) gibi yöntemlerle bir alt tabaka üzerine kaplanır. a-Si'nin diğer ince film teknolojilerine kıyasla (CdTe, CIGS gibi) daha düşük sıcaklıklarda biriktirilebilmesi sayesinde, plastik alt tabakalar üzerinde bile üretim mümkündür. Biriktirme sıcaklığı yaklaşık 75 °C'ye kadar indirilebilir. Ancak, tek eklemlili a-Si ince film ürünlerinde "Staebler-Wronski etkisi" olarak bilinen bir mekanizma nedeniyle güneş ışığına maruz kaldıklarında ciddi performans kaybı yaşanır. Üst

üste birden fazla a-Si tabakası kullanılarak daha geniş bir güneş spektrumu absorbe edilebilir ve bu şekilde hem verimlilik hem de stabilite artırılabilir.

CdTe güneş hücreleri, kristal silikon hücrelerden sonra en yaygın ikinci PV ürünüdür ve 2014 itibarıyla küresel PV pazarının %7'sini oluşturmuştur. Bu hücrelerde yarı iletken kadmiyum tellür ile kadmiyum sülfür (CdS) arasında bir bağlantı katmanı bulunur; üst katman ise genellikle kalay oksit (SnO_2) veya kadmiyum bazlı stannoz oksit (Cd_2SnO_4) ile kaplanır. Alt elektrot ise bakır katkılı karbon macunundan oluşur. CdTe hücreler PV endüstrisinde en düşük üretim maliyetine sahip olmakla birlikte, kabul edilebilir verimlilikler sunar. Ancak temel dezavantajı, kadmiyumun toksik olması ve üretim için yüksek sıcaklıklar gerektirmesi nedeniyle bazı alt tabakalara uygulanamamasıdır.

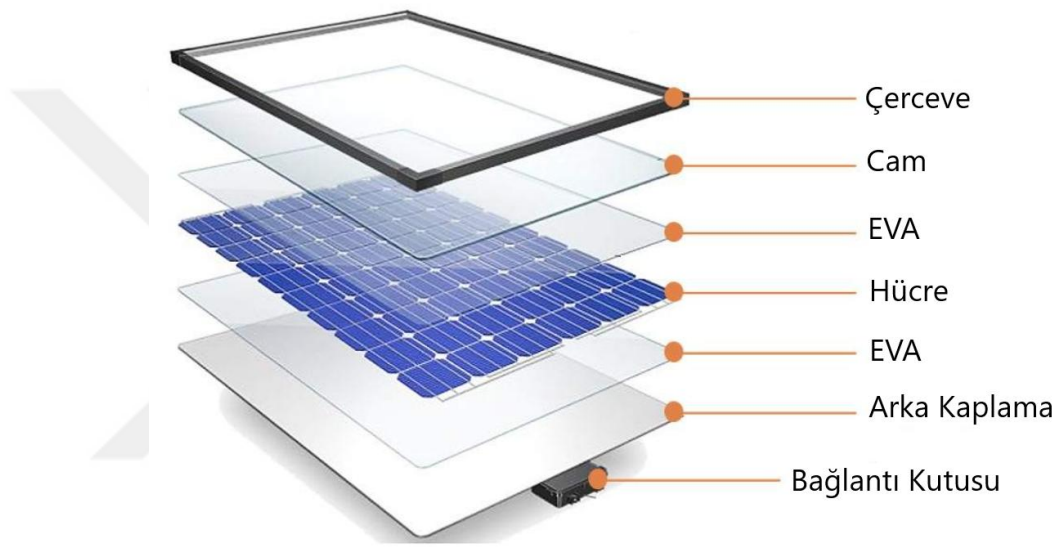
Üçüncü nesil güneş hücreleri, toksik olmayan ve bol bulunan malzemelerle, ikinci nesil ince film teknolojilerinde olduğu gibi çok ince tabakalar hâlinde üretim fikriyle geliştirilmiştir. Bu kategoriye dahil olan başlıca teknolojiler; bakır-çinko-kalay sülfür (CZTS), boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC), organik fotovoltaiik hücreler (OPV), perovskit hücreler ve kuantum nokta (quantum dot) güneş hücreleridir. Bu hücrelerin büyük bir kısmı hâlen araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) aşamasında olup, henüz sanayileşmemiştir. Ancak bazı benzersiz özellikleri sayesinde özellikle BIPV ve SEB uygulamaları için gelecekte büyük potansiyel vadetmektedirler [47,48]. Şekil 2.14'te PV'lerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.14. PV teknolojilerinin sınıflandırılması

2.5.2. Fotovoltaik Sistemlerde Sıcaklık Etkisi

Piyasada bulunan tipik bir silikon güneş hücresi, dört katmandan oluşmaktadır. İlk katman, genellikle sıradan camlara kıyasla en az beş kat daha dayanıklı olan ve %95'e varan geçirgenliğe sahip koruyucu cam tabakasıdır. Bu tabakanın hemen altında, ultraviyole (UV) koruma işlevi gören etilen vinil asetat (EVA) adlı kopolimer yer alır. Üçüncü katman ise ön yüzeyinde metal şerit temas noktaları bulunan kristal silikon PV tabakadır. Son katman, üretilen elektrik yükünü toplamak ve dışarı aktarmak amacıyla kullanılan metal arka yüzey tabakasıdır. Şekil 2.15'de örnek bir PV sisteminin detayları gösterilmiştir [49].



Şekil 2.15. PV paneli oluşturan katmanların gösterimi

Sürekli artan sıcaklık ve ısı yayılımı, sadece PV tabakasının verimliliğini düşürmekle kalmaz; aynı zamanda UV koruma katmanını da tahrip ederek, silikon hücrenin genel performansını daha da bozucu bir etki yaratır [50]. PV çalışma prensibine göre, yalnızca yarı iletken malzemenin bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonlar, PV katman tarafından absorbe edilir. Bu fotonlardan, bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip olanların fazla enerjisi, kristal örgü yapısı içerisinde ısıya dönüşerek dağıtılır. Öte yandan, bant aralığından daha düşük enerjiye sahip fotonlar ise PV katman tarafından soğurulmaz ve modülün arka yüzeyine ulaşarak ek ısınma ve sıcaklık artışına neden olur. Tüm bu mekanizmalar, güneş hücresinin verimliliğini düşürür ve performansını bozar. Sıcaklığın PV performansı üzerindeki etkisi nedeniyle, üretici firmaların BIPV modül etiketlerinde verdiği veriler, sistem performansının nihai değerlendirilmesi için güvenilir referanslar olarak kabul edilmemelidir. Modül dizisinin doğru performans tahmini yapılabilmesi için hücrelerdeki sıcaklık değişimi dikkate alınmalıdır. Hücre verimliliği ($\eta_{hücre}$) üzerindeki sıcaklık etkisi Denklem 2.15'te verilmiştir [51]:

$$\eta_{hücre} = \eta_{T_{ref}} [1 - \zeta_{ref}(T_{hücre} - T_{ref}) + \mu \log_{10} G] \quad (2.15)$$

Burada $\eta_{T_{ref}}$ modülün referans sıcaklığı T_{ref} ve 1000 W/m^2 güneş ışınlamı altında gösterdiği elektriksel verimliliği temsil eder. Ayrıca, $T_{hücre}$ hücre sıcaklığını, G ise güneş ışınlamı akısını ifade eder. Sıcaklık katsayısı ζ_{ref} ve ışınlam katsayısı (μ), hücreyi oluşturan malzemeye bağlıdır.

2.6. Binaya Entegre Fotovoltaik Ürünler

BIPV modüllerinin ilk uygulamaları 1970'li yıllara kadar uzanır. Bu dönemde, şebeke bağlantısı olmayan uzak bölgelerdeki bazı binalara, alüminyum çerçeveli PV paneller monte edilmiştir. Ancak, BIPV sistemlerinin yapı sektöründe yaygın biçimde uygulanması, hem Avrupa Birliği'nin hedeflediği sıfır enerji hedeflerine ulaşılması hem de Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından belirlenen sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından zorunlu hale gelmiştir. Bu bağlamda, dünya genelinde birçok firma BIPV modülleri tasarlamakta ve üretmektedir. BIPV sistemleri özellikle yeşil enerjiye yönelik devlet desteklerinin uygulandığı ülkelerde giderek daha fazla yaygınlık kazanmaktadır. Son yirmi yılda, BIPV pazarının büyük bölümü, çatı ya da duvarlara entegre edilen rijit PV ürünlere ayrılmıştır. Bu ürünler, kiremit ya da arduvaz biçiminde entegre edilebilmekte ve uygun durumlarda geleneksel yapı malzemelerinin yerini alarak tüm çatı yüzeyini kaplayabilmektedir. Bununla birlikte, son birkaç yılda esnek ince film BIPV ürünlerinin kullanımına yönelik belirgin bir pazar eğilimi oluşmuştur. Bu ürünler, şingil, metal çatı kaplaması ve membran çatı sistemleri gibi geleneksel esnek çatı kaplama malzemeleriyle entegre edilebilmektedir. Ayrıca, son dönemde şeffaf ve yarı şeffaf BIPV modüllerine yönelik ilgi artmaktadır; bu tür ürünler, özellikle SEB inşasında oldukça işlevseldir [48].

BIPV sistemlerinin en büyük pazarı Batı Avrupa'dadır. 2017 yılı itibarıyla, dünya genelinde kurulu toplam BIPV kapasitesi 2000 MW 'a ulaşmıştır. Günümüzde bu ürünlerin kullanımı daha da yaygınlaşmaktadır; çünkü hem daha maliyet etkin üretim süreçleri hem de yapısal olarak daha avantajlı malzemeler geliştirilmiş ve endüstriyel ölçeğe taşınmıştır. Küresel BIPV pazarının yaklaşık %80'i çatıya monte edilen ürünlerden, %20'si ise cepheye monte edilen ürünlerden oluşmaktadır. Bu dağılımın başlıca nedeni, çatılarda gölgelenme etkisinin cephelere göre daha az olmasıdır; bu da kristal silikon hücrelerin performansı açısından önemli bir avantaj sağlar. Öte yandan, ince film modüllerin gölgelenmeye karşı daha az duyarlı olması, onları cephe uygulamaları için daha uygun bir seçenek haline getirmektedir. Bunlara ek olarak, yapıya sonradan eklenen fotovoltaik sistemler (BAPV) de mevcuttur; bu ürünler hem çatı hem de cephe uygulamaları için kullanılabilir [52]. BIPV folyo ürünleri, esnek ince film hücrelerinden

çabanın temelinde, doğrudan gelen güneş kaynaklı ısı yükü yer almaktadır. Ancak, binaya çarpan bu güneş ısısı toplanarak belirli amaçlar için kullanılabilir. Bu şekilde yalnızca binanın kazandığı ısı miktarı azaltılmakla kalmaz, aynı zamanda binanın ihtiyaç duyduğu enerjinin bir kısmı da güneşten sağlanmış olur; bu da genellikle fosil yakıtlarla karşılanan enerji gereksiniminin azaltılmasına olanak tanır.

Güneş termal modülleri, gelen güneş radyasyonunu ısı enerjisi (duyulur veya gizli ısı formunda) olarak toplayan ve bu enerjiyi ısı ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanan sistemlerdir. Her ne kadar büyük optik yoğunlaştırma sistemleri olmaksızın güneş enerjisi yalnızca düşük dereceli ısı üretebilse de, özellikle sıcak iklim bölgelerinde binaların çoğu ısı enerjisi ihtiyacı bu tür düşük dereceli ısı ile karşılanabilir durumdadır. Binalarda farklı uygulamalar, güneşten sağlanabilecek ısı enerjisi ihtiyacı duyar. Bunlar arasında mekân ısıtması, kullanma sıcak suyu, hava nem alma ve bazı durumlarda kurutma işlemleri yer alabilir. Güneş ısısının seviyesi belirli bir uygulama için yeterli sıcaklığa ulaşmasa bile, bu enerji kısmen de olsa ilgili yükü karşılayarak, diğer enerji kaynaklarından (çoğunlukla fosil yakıtlardan) sağlanması gereken enerji miktarını azaltır ve böylece binanın dış enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltılmış olur. Bu bağlamda, güneş termal sistemleri, SEB enerji sistemi tasarımında vazgeçilmez bir bileşen olarak kabul edilmektedir [53].

Güneş ısısının toplanması ve binanın enerji ihtiyacına aktarılması için farklı cihaz konfigürasyonları ve yöntemler kullanılabilir. Bu enerji sistemleri kategorisinde öne çıkan iki temel cihaz türü [53]:

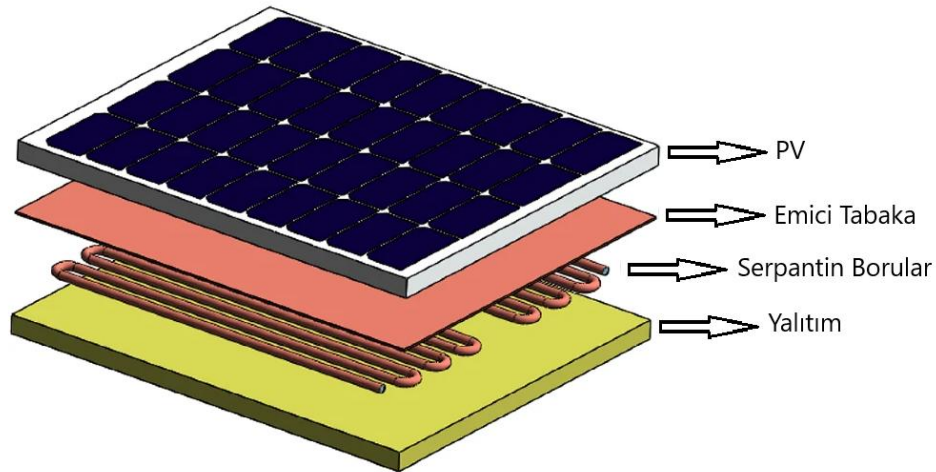
- PV/T sistemler,
- Güneş termal kolektörleridir.

Her ne kadar farklı tipte güneş termal cihazlar da mevcut olsa da, ticari olarak piyasada bulunan modüllerin büyük çoğunluğu bu iki kategori altında sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, güneş termal sistemlere dair pazar yapısı ve araştırma literatürü, güneş elektrikli sistemlerine kıyasla çok daha eski ve dolayısıyla daha gelişmiş ve sanayileşmiş bir durumdadır.

2.7.1. PV/T Sistemler

Güneş hücresine çarpan güneş enerjisinin %20'den daha azı elektrik enerjisine dönüştürülmekte, geri kalan büyük kısmı ise cihaz içerisinde ısıya dönüşerek kaybedilmektedir. Bu durum, güneş hücresinin dönüşüm verimliliğini ciddi biçimde düşürebilir. Ancak, ısı dağılımını sağlayacak tekniklerin ve ekipmanların entegre edilmesi sayesinde, PV sistemlerin genel performansının önemli ölçüde artırılacağı da vurgulanmıştır. Toplanan bu ısı, aynı zamanda binalarda ya da sanayi uygulamalarında düşük dereceli ısı işlemleri için kullanılabilir. Aynı anda hem PV elektrik üretimi hem de ısı enerjisi üretimi gerçekleştiren bu tür sistemler, PV/T sistemler olarak adlandırılmaktadır. Her ne kadar bu sistemler birleşik ısı ve güç üretim cihazları kapsamında

değerlendirilebilse de, genellikle literatürde ayrı bir kategori olarak ele alınırlar [53]. Düşük dereceli ısı enerjisinin pek çok kullanım alanı vardır. Bunlar arasında binalarda mekân ısıtması, sanayide proses ısıtması, evsel ya da endüstriyel amaçlarla su (ya da diğer akışkan) ısıtma, ürün kurutma, nem alma gibi uygulamalar yer almaktadır. PV/T sistemleri, ayrı ayrı kurulan FV veya güneş termal sistemlerle benzer maliyetlerde kurulabilmekte, üstelik ticari PV/T modülleri genellikle kompakt gövdelerde ve entegre kasalarla sunulmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, PV/T sistemleri özellikle SEB uygulanması için son derece uygun seçenekler olarak öne çıkmaktadır. FV etkisiyle üretilen elektrik enerjisine ek olarak güneş ısısından da yararlanılması sayesinde, PV/T sistemler yalnızca elektrik üreten FV panellere kıyasla çok daha yüksek toplam dönüşüm verimliliklerine ulaşabilmektedir [54]. Tipik bir PV/T modülünün detaylı görünümü Şekil 2.17’de gösterilmiş olup, PV panelin arka yüzeyine bitişik şekilde yerleştirilen ve ısı transfer akışkanının dolaştığı ya da depolandığı kanallardan oluşmaktadır. Buna bağlı olarak, PV/T sistemleri öncelikle kullanılan ısı transfer akışkanına göre sınıflandırılmaktadır. Son 30 – 40 yıl boyunca, PV/T modüllerinde ısıyı PV panelin arkasından toplamak amacıyla en yaygın kullanılan ısı transfer akışkanları hava ve su olmuştur. Ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, nanoakışkanlar, soğutucu akışkanlar gibi farklı malzemelerin kullanımını önermektedir. Ayrıca, yalnızca ısı transfer akışkanının dolaşımına dayanan basit yapıların ötesinde, yeni cihaz konfigürasyonları da önerilmeye başlanmıştır. Bunlar arasında, ısı boruları, ısı pompaları ve FDM ısı depolama üniteleriyle PV/T modüllerin eşleştirilmesi gibi yöntemler bulunmaktadır.

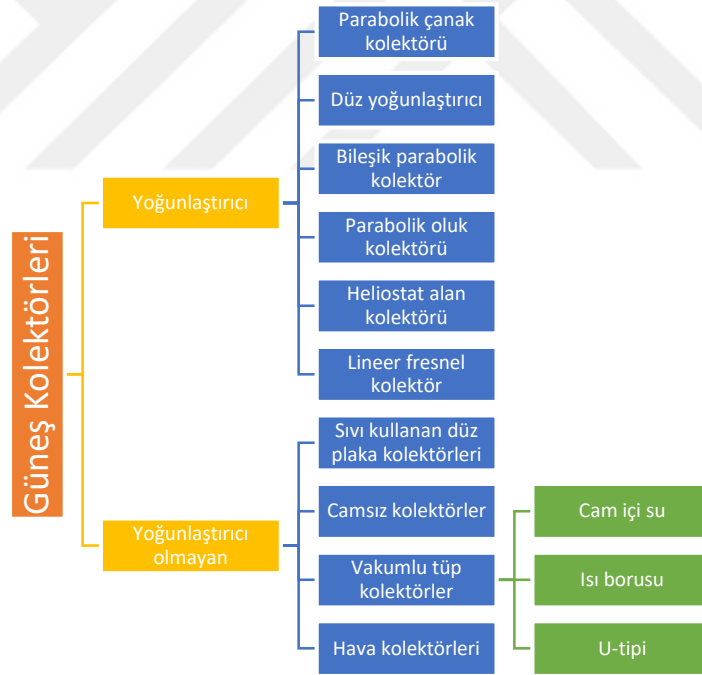


Şekil 2.17. PV/T sisteminin detaylı görünümü

2.7.2. Güneş Kolektörleri

Güneş kolektörleri, güneş radyasyonunu ısı enerjisi olarak absorbe eden ve toplayan, ardından bu enerjiyi doğrudan kullanıma ya da ısı depolama birimine yönlendiren

cihazlardır. Binalarda mekân ısıtması veya sıcak su üretimi gibi birden fazla ısı enerji ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaçların güneş enerjisi ile karşılanması durumunda, binanın dış enerji kaynaklarına özellikle fosil yakıtlara olan bağımlılığı önemli ölçüde azaltılabilir ve böylece binanın enerji profili SEB statüsüne daha yakın hale getirilebilir. Genel bir sınıflandırma çerçevesinde, güneş kolektörleri yoğunlaştırıcı olmayan ve yoğunlaştırıcı kolektörler olarak Şekil 2.18’de gösterildiği gibi iki ana gruba ayrılabilir. Bazı kolektör türleri özellikle yoğunlaştırıcı olmayanlar mimari olarak binaya entegre edilebilir ve bu durumda yapıya entegre güneş termal sistemler (BIST) oluştururlar. Yoğunlaştırıcı olmayan kolektörler arasında sıvı bazlı düz plaka kolektörler ve hava ısıtıcıları, yoğunlaştırıcı kolektörler arasında ise bileşik parabolik Fresnel kolektörleri, konut ve ticari binalarda entegre edilebilir sistemler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık, yüksek yoğunlaştırma katsayısına sahip kolektörler örneğin heliostat sistemleri, parabolik oluk ve parabolik çanak kolektörler genellikle daha yüksek sıcaklık gereksinimi olan enerji santrallerinde ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir; bu tür sistemler, bina uygulamaları için genellikle uygun değildir [55].



Şekil 2.18. Güneş kolektörlerinin genel sınıflandırması

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, nSEB hedefi doğrultusunda, binanın tüm enerji ihtiyacını kendi üretimiyle karşılayabilen, yüksek enerji verimliliğine sahip entegre bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, çatı üstü PV/T paneller, bina cephelerine entegre yarı saydam PV paneller, yerden ısıtma sistemi, FDM destekli ısıl enerji depolama ve akıllı enerji yönetim sistemlerini bütünleştirerek, binanın hem ısı hem de elektrik ihtiyacını optimize etmektir. Sistem bileşenleri büyük ölçüde saha ortamında el işçiliğiyle üretilmiş ve birleştirilmiştir. Tüm sistemin performansı, sıcaklık, ışıınım ve elektrik enerjisi ölçümleri bir yıl boyunca beş dakika aralıklarla alınan veriler ile detaylı şekilde izlenmiş ve analiz edilmiştir. Deneysel çalışmanın yapıldığı bölgenin koordinatları 38°41'05" Kuzey paraleli, 39°11'49" Doğu meridyenidir. Deneysel çalışmanın yapıldığı bölgenin harita üzerindeki konumu Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmanın yapıldığı bölgenin konumu

3.1. Kullanılan Sistemler ve Malzemeler

Sistemde kullanılan tüm materyaller ve üretim ve sisteme entegre metotları aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Çatı Üzeri PV/T Panel Sistemi

Binanın çatı alanının, hem elektrik hem de sıcak su üretimi için etkin şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tek bir yüzeyden çift enerji üretimi sağlayarak çatı kullanım verimliliğini artırmak ve binanın enerji bağımsızlığını desteklemek hedeflenmiştir. Elektrik enerjisi ile ısı enerjisinin birlikte üretilmesi, SEB konseptinin temel gereklerinden biridir. Tasarım sürecinde, piyasada hazır PV/T panellerin temin edilememesi ve yüksek maliyetli olması nedeniyle saha ortamında modifiye edilmiş bir çözüm geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, 550 W gücünde monokristal hücre yapısına sahip standart PV paneller tercih edilmiştir. Panel gücü seçiminde yüksek verimlilik, saha kurulum alanının sınırlı olması ve enerji üretim kapasitesinin maksimize edilmesi etkili olmuştur. 550 W panel kullanımı, hem çatıda daha az panel kullanarak daha fazla enerji elde edilmesini sağlamış, hem de yapısal yük optimizasyonu açısından uygun bulunmuştur.

Panellerin termal enerji üretimini sağlamak amacıyla, arka yüzeylerine yüksek ısı iletkenliğe sahip bakır borular entegre edilmiştir. Bakır boruların seçilme nedeni, bakırın diğer metallerden çok daha yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip olması ve saha koşullarında kolay şekillendirilebilmesidir. Borular ile panel arka yüzeyi arasına özel termal iletken macun uygulanmış, böylece ısı transfer verimliliği artırılmıştır. Bakır borular izolasyon malzemeleriyle kaplanarak dış ortamdan kaynaklı ısı kayıpları minimize edilmiştir. Çatı hazırlığı aşamasında, ilk olarak taşıyıcı yüzeye 5 cm kalınlığında taş yünü izolasyonu serilmiştir. Taşıyıcı sistem olarak galvanizli çelik profiller kullanılmış, bunların üzerine PV/T paneller güney yönüne ve 30° eğim açısına sahip olacak şekilde monte edilmiştir. Panel eğimi, bölgenin yıllık ortalama güneşlenme verileri dikkate alınarak optimize edilmiştir; böylece maksimum yıllık enerji üretimi hedeflenmiştir. Sistemde sıcak suyun dolaşımını sağlamak amacıyla biri çatıdaki PV/T çıkış hattında, diğeri bina içindeki yerden ısıtma devresinde olmak üzere iki adet Grundfos UPA 15-90 sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Her iki pompa da 230V gerilimle çalışmakta, 50 Hz frekansında ve maksimum 1.0 MPa basınç altında güvenli şekilde işlemektedir. 0.48–0.65 A arasında düşük akım çekişine sahip bu model, otomatik ve manuel çalışma modları ile sistemin sıcaklık ihtiyacına göre devreye girecek şekilde konumlandırılmıştır. Çatıdaki pompa, PV/T panelden gelen sıcak suyun depoya ve yerden ısıtma sistemine taşınmasını sağlarken; iç mekandaki pompa, yerden ısıtma sisteminde ki sirkülasyonu desteklemek amacıyla kurulmuştur. PV/T panellerin sıcak su çıkışları, elastomerik izolasyonla kaplanmış bakır borularla bina içerisine alınarak, su deposuna ve yerden ısıtma sistemine entegre edilmiştir.

Elektrik üretimi için PV panellerden çıkan DC kablolar, UV dayanımlı ve dış ortam koşullarına uygun izolasyonlu kanallar kullanılarak inverter sistemine güvenli bir şekilde taşınmıştır. Kurulum sonrası sistemde su sızdırmazlık testleri gerçekleştirilmiş, tüm sıcak su hatları ve elektriksel bağlantılar işlevsellik testlerine tabi tutulmuştur. Panel taşıyıcı profillerin statik dayanımı ve bağlantı noktalarının güvenliği kontrol edilmiştir. Son aşamada sistem, tam yükte test edilerek devreye alınmıştır. Şekil 3.2’de PV/T panel sisteminin kurulum aşaması gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çatı üstü modifiye edilmiş PV/T panel sistemi ve bağlantı detayları

3.1.2. FDM Destekli Yerden Isıtma Sistemi

İç mekânın ısı konforunu sağlamak ve PV/T sisteminden elde edilen sıcak suyun verimli bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla yerden ısıtılmalı bir sistem tasarlanmıştır. Yerden ısıtma yöntemi, düşük sıcaklıklarda çalışarak yüksek ısı konfor sağlaması, homojen sıcaklık dağılımı oluşturması ve enerji verimliliği sunması açısından tercih edilmiştir. Ayrıca gece saatlerinde sıcaklık düşüşlerini dengelemek amacıyla, FDM destekli pasif bir ısı enerji depolama sistemi de entegre edilmiştir. Bu sayede gündüz saatlerinde elde edilen fazla ısı enerji FDM içinde depolanmış ve gece boyunca salınım yaparak mekân sıcaklığının sabit kalması sağlanmıştır. Tasarım aşamasında bakır borular seçilmiştir; çünkü bakırın yüksek ısı iletkenlik katsayısı sayesinde zeminde hızlı ve homojen bir ısı dağılımı sağlanmıştır. Isı kayıplarını minimize etmek amacıyla yerden ısıtma sisteminin altına 5 cm kalınlığında cam yünü yalıtımı uygulanmıştır. Cam yünü, hem yüksek ısı yalıtım katsayısı hem de yangına dayanıklılığı nedeniyle tercih edilmiştir. FDM hattında kullanılmak üzere FDM olarak RT22HC seçilmiştir; bu malzemenin termofiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir [56–58]. Uygulama sırasında ilk olarak zemin üzerine düzgün bir şekilde 10 cm kalınlığında cam yünü tabakası serilmiş ve tüm yüzey izolasyonu tamamlanmıştır. Ardından, yerden ısıtma devresi için bakır borular 20 cm aralıklarla serpantin formunda döşenmiş ve bağlantıları gazaltı kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Yapılan kaynak işlemlerinin ardından sistem sızdırmazlık testine tabi tutulmuş, her bir devrede su basınç testi yapılarak kaçak kontrolü gerçekleştirilmiştir. FDM boruları da aynı şekilde bakırdan yapılmış ve içerisine RT22HC FDM malzemesi doldurulmuştur. Sistemin çalışmasını değerlendirmek üzere ısıtma testi yapılmış, borular içerisindeki suyun dolaşımı ve FDM hattının gizli ısı salımı işlevselliği kontrol edilmiştir. Yerden ısıtma sistemi ve yapım aşaması Şekil 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.1. RT22HC FDM’nin termofiziksel özellikleri

Özellik	RT22HC
Katı sıcaklığı K	293,15
Sıvı sıcaklığı K	296,15
Gizli füzyon ısısı kJ/kg	190,00
Özkütle (katı) kg/m ³	760,00
Özkütle (sıvı) kg/m ³	700,00
Isıl genleşme katsayısı 1/K	1x10 ⁻³
Özgül ısı (katı) kJ/kg.K	2,00
Özgül ısı (sıvı) kJ/kg.K	2,00
Isıl iletkenlik (katı) W/m.K	0,2
Isıl iletkenlik (sıvı) W/m.K	0,2
Dinamik viskozite mPa.s	3,63



Şekil 3.3. Yerden ısıtma ve FDM destekli ısı depolama sisteminin uygulama aşamaları

3.1.3. Cephe Kaplama (Façade) Sistemi

Binanın dış cephesinin korunması, enerji verimliliğinin artırılması ve cephe PV panellerinin ömrünün uzatılması amacıyla ilave bir cephe kaplama sistemi uygulanmıştır. Cephe kaplama sistemi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Cephe kaplama sisteminin temel fonksiyonu, binayı yağmur, rüzgar, UV ışınları ve yaz ve kış mevsimlerinde sıcaklık dalgalanmalarına karşı korumak, aynı zamanda binanın estetik görünümünü iyileştirmek ve cephe PV panellerinin performans kaybını azaltmaktır. Özellikle PV panellerin arkasında oluşabilecek aşırı ısınma ve soğutmayı önlemek amacıyla, façade ile PV paneller arasında havalandırmalı bir boşluk bırakılmış ve doğal soğutma ve ısıtma sağlanmıştır. Kış mevsiminde menfezler kapatılmış içeride ısınan havanın dışarı çıkmasını engellenmiş ayrıca yaz aylarında ise menfezler açılarak içeride ısınan havayı dışarıya tahliye ederek ara havanın ısınmasını engellemek amaçlanmıştır.

Tasarım aşamasında hafif, dayanıklı ve dış ortam koşullarına uzun süre dayanabilecek bir malzeme seçimi ön planda tutulmuştur. Bu nedenle PVC bazlı profiller kullanılmıştır. PVC malzemesi; suya, UV ışınlarına ve sıcaklık değişimlerine karşı yüksek dayanıklılık göstermesi, hafifliği ve kolay işlenebilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Aynı zamanda estetik görünüm ve düşük bakım maliyetleri açısından avantaj sunmuştur. Sistemin kurulumu sırasında öncelikle bina cephesi boyunca taşıyıcı karkas sistemi oluşturulmuştur. PVC profiller yatay ve düşey eksenlerde sabitlenerek tam kaplama sağlanmıştır. Façade ile PV paneller arasında yaklaşık 10–15 cm'lik bir havalandırma boşluğu bırakılmıştır. Bu boşluk, doğal hava akımıyla PV panellerin aşırı ısınmasını ve binaya etki eden sıcak veya soğuk havanın direkt binaya temasını engellemek amacıyla yapılmıştır. Tüm sistemin kurulumunun ardından görsel bütünlük sağlanmış ve cephe sisteminin estetik uyumu binanın genel mimari yapısına entegre edilmiştir. Son kontroller sırasında façade sisteminde su geçirmezlik testi yapılmış, ayrıca cephe panellerinin ve façade birleşim noktalarının UV dayanımı ve yapısal stabilitesi kontrol edilmiştir.

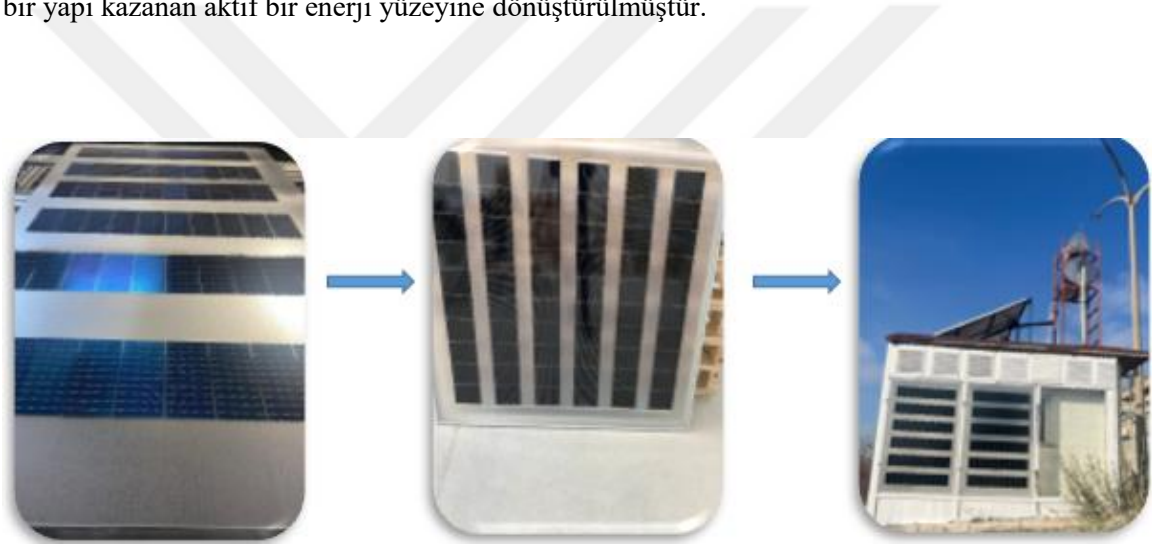


Şekil 3.4. PVC profillerden oluşturulan façade kaplama sistemi ve PV panellerle bütünleşik görünümü.

3.1.4. Binaya Entegre Yarı Saydam PV Panel Sistemi

Binanın doğu, güney ve batı cephelerine yarı saydam PV paneller entegre edilerek hem elektrik üretiminin artırılması hem de i mekânda doğal aydınlatmanın desteklenmesi hedeflenmiştir. Bu uygulama sayesinde, bina cephesi sadece pasif bir yüzey olmaktan çıkmış, aktif bir enerji üretim alanına dnştrlmştir. Ayrıca, yarı saydam paneller sayesinde gün ışığı içeri alınarak yapay aydınlatma ihtiyaı azaltılmış, böylece enerji tasarrufu da sağlanmıştır. Yarı saydam PV panellerin görüntüsü Şekil 3.5’te gsterilmifitir. Sistem tasarımında, her biri 350 W gücünde yarı saydam monokristal PV paneller tercih edilmiştir. Panellerin yarı geçirgen yapısı, doğal ışığın i mekâna ulaşmasını sağlarken aynı zamanda yüksek elektrik verimi sunmuştur. Cephe entegrasyonunda hafiflik, mekanik dayanım ve estetik görünüm gibi kriterler göz önünde bulundurularak, panellerin taşıyıcı yapıya kolay monte edilebilmesi ve cephe bütünlüğünü bozmaması hedeflenmiştir. Panellerin elektriksel bağlantıları dış ortam koşullarına dayanıklı, UV

korumalı kablolarla yapılmış ve dış yüzeyde estetik açıdan görünmez hale getirilmiştir. Uygulama sırasında öncelikle bina cephesi boyunca profiller kullanılarak taşıyıcı karkas sistemi kurulmuştur. Bu karkaslar, hem PV panellerin ağırlığını taşıyacak şekilde statik hesaplamalara uygun tasarlanmış hem de cephede estetik bir görünüm sağlamak amacıyla yerleştirilmiştir. Karkas üzerine, her biri 350 W kapasiteli yarı saydam PV paneller özel montaj aparatları kullanılarak sabitlenmiştir. Doğu ve batı cephelerine ikişer adet, güney cephesine ise üç adet panel monte edilmiştir. Paneller arasındaki boşluklar, havalandırmayı sağlamak ve sıcak hava birikmesini önlemek amacıyla belirli oranlarda bırakılmıştır. Elektrik çıkış kabloları, UV dayanımlı ve su sızdırmaz koruma kanallarına alınarak inverter sistemine yönlendirilmiştir. Elektrik bağlantıları tamamlandıktan sonra, tüm sistemde gerilim testi ve yük testi yapılarak elektriksel süreklilik doğrulanmıştır. Bu sayede bina cephesi hem elektrik üretimi sağlayan hem de estetik açıdan modern bir yapı kazanan aktif bir enerji yüzeyine dönüştürülmüştür.



Şekil 3.5. Binaya entegre edilen yarı saydam PV paneller

3.1.5. Enerji Depolama ve Yönetim Sistemi

Binada üretilen elektrik enerjisinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi, enerji sürekliliğinin sağlanması ve şebeke bağımlılığının azaltılması amacıyla enerji depolama ve yönetim sistemi kurulmuştur. Sistemin temel fonksiyonu, gündüz saatlerinde PV panellerden elde edilen elektrik enerjisini doğrudan binanın yüklerinde kullanmak, fazla üretilen enerjiyi bataryada depolamak ve gerektiğinde bataryadan kullanım sağlamaktır. Ayrıca şebeke kesintileri durumunda sistemin bağımsız çalışmasını sağlamak amacıyla yedekleme fonksiyonu da oluşturulmuştur.

Tasarım aşamasında, hem şebeke bağlantılı (on-grid) hem de şebekeden bağımsız (off-grid) çalışabilen, akıllı enerji yönetimi özelliklerine sahip bir sistem tercih edilmiştir. Bu doğrultuda Huawei Luna 2000 hibrit inverter ve 5 kWh kapasiteli lityum-iyon batarya sistemi seçilmiştir. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj/deşarj özellikleri

nedeniyle tercih edilmiştir. Sisteme entegre edilen Huawei Backup Box, şebeke kesintilerinde otomatik olarak devreye girerek kritik yüklerin enerjisiz kalmasını önlemiş ve sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamıştır.

Huawei sisteminin yüksek verimli MPPT özelliği sayesinde PV üretimin her zaman optimum noktada tutulması mümkün olmuştur. Uygulama sırasında, inverter ve batarya sisteminin kurulumu için binanın teknik odasında IP65 koruma sınıfına sahip özel bir alan hazırlanmıştır. İlk adımda Huawei Luna 2000 inverter montaj plakası duvara sabitlenmiş ve inverter ünitesi düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Ardından 5 kWh batarya modülü invertere bağlantı kitleri kullanılarak güvenli bir şekilde bağlanmıştır. Batarya ile inverter arasındaki veri ve güç bağlantıları, Huawei'nin özel konektörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şebeke bağlantısı ve şebeke yedekleme fonksiyonu için Huawei Backup Box, inverter sistemine bağlanmıştır. Backup Box; şebeke enerjisinin kesilmesi durumunda sistemin 10 ms gibi kısa bir sürede otomatik olarak batarya ve PV üretimine geçmesini sağlamıştır. Backup Box ile sadece kritik yükler (aydınlatma, temel priz hatları vb.) beslenecek şekilde ayrı bir yük hattı oluşturulmuştur. İnverter ve batarya kurulumundan sonra tüm bağlantılar izolasyon, süreklilik ve kaçak akım testlerinden geçirilmiş, sistemin güvenli çalışması sağlanmıştır. Elektrik üretim ve tüketim ölçümleri için Huawei DDSU666-H enerji ölçüm sensörü inverter çıkışına entegre edilmiş ve veriler Huawei FusionSolar platformu üzerinden online olarak izlenmiştir. Sistemin elektrik bağlantıları Şekil 3.6'da verilmiştir. Böylece sistemin üretim, tüketim, şarj ve deşarj verileri gerçek zamanlı olarak takip edilmiştir.



Şekil 3.6. Elektrik bağlantılarının gösterimi

Konutlardaki elektrik tüketiminin doğru analiz edilmesi; enerji tasarrufu, sürdürülebilirlik stratejileri ve bölgesel enerji politikalarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Elazığ gibi karasal iklime sahip bölgelerde yaz ve kış aylarındaki hava sıcaklıkları önemli dalgalanmalar gösterdiğinden, ısıtma ve soğutma kaynaklı elektrik tüketimi konutlarda belirleyici bir rol oynamaktadır. Elazığ ilinde tipik bir konutun (4 kişilik aile varsayımı) dört mevsimi kapsayan aylık elektrik tüketimini, cihaz bazlı güç (W) ve kullanım süreleri (saat) esas alınarak örnek bir senaryo üzerinden hesaplanmıştır. Veriler akademik ve teknik standartlara (IEC 60456, IEC 62301, ISO 5151 vb.) dayandırılarak modellenmiştir [59–61].

Elektrik tüketimi kWh (kilovat-saat) cinsinden hesaplanırken aşağıdaki formül esas alınmaktadır:

$$Tüketim(kWh) = \frac{Güç(W) \times Kullanım süresi(saat)}{1000} \quad (3.1)$$

Buzdolabı, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın, su ısıtıcısı (kettle), ütü, saç kurutma makinesi, televizyon, bilgisayar ve modem gibi cihazların aylık toplam tüketimi “baz yük” olarak adlandırılacaktır. Aydınlatma (LED ampuller) ve kombi (pompa + elektronik) tüketimi mevsime göre değişiklik gösterecektir. Klima (AC) yalnızca yaz aylarında devreye girecektir.

- **Aydınlatma:** Kışın günde 8 saate kadar çıkarken yazın yaklaşık olarak 4 saate düşmektedir.
- **Kombi (doğalgaz):** Sadece cihazın pompa ve kontrol ünitesi elektrik çektiği için kışın (ısıtma döneminde) daha uzun süre çalışır; yazın sadece sıcak su ihtiyacında devreye girer.
- **Klima:** Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında, dış sıcaklıkların arttığı dönemlerde kullanılır.

Cihaz güç değerleri ortalama piyasa verilerinden (A+ veya A++ sınıfı örnek cihazlar) ve ilgili standartlardan (IEC 60456, IEC 62301 vb.) alınmıştır. Her ay 30 gün olarak kabul edilmiştir. Türkiye’de 2025 yılında mesken aboneleri için 240 kWh’a kadar 1 kWh enerji bedeli 2.59 TL (0.07 USD), 240 kWh üstü 1 kWh enerji bedeli ise 3.92 TL(0.1060 USD)’dir.

Aşağıdaki tablo 3.2’de, ısıtma/soğutma (kombi-klima) ve aydınlatma hariç tutulduğunda, tipik cihazların aylık toplam tüketimini göstermektedir:

Tablo 3.2. Baz yüklerin hesaplanması ve tüketim değerleri

Cihaz	Aylık Tüketim (kWh)	Açıklama (Güç ve Kullanım)
Buzdolabı	30	Günde ortalama 1 kWh (A++ sınıf 300 kWh/yıl)
Televizyon	9	100 W, günde 3 saat
Çamaşır Makinesi	32	2000 W, haftada 2 kez (2 saat/program)

Bulaşık Makinesi	43,2	1800 W, haftada 3 kez (2 saat/program)
Fırın	16	2000 W, haftada 2 kez (1 saat/program)
Kettle (Su Isıtıcı)	30	2000 W, günde 3 kez (10 dakika kullanım)
Ütü	8	2000 W, haftada 1 saat
Saç Kurutma	11	1500 W, günde 15 dakika
Bilgisayar + Modem	16	PC: 150 W, 2 saat/gün; Modem: 10 W, 24 saat x 30 gün (7,2 kWh/ay)

Bu 195 kWh/ay, aydınlatma ve kombi/klima hariç konutun sabit (“baz”) tüketimidir. Mevsime bağlı olarak altı adet LED ampul (her biri 10 W) kullanıldığı, kışın günde 8 saate kadar, yazın 4 saat yandığı varsayılmıştır. Kombi sadece pompa ve kontrol ünitesi için elektrik tüketir. Kışın (ısınma dönemi) pompa daha uzun süre çalışır, yazın (sadece sıcak su) çalışma süresi düşer. Inverter özellikli bir klima (1,2 kW) kullanıldığı, sadece Haziran-Eylül arasında devrede olduğu varsayılmıştır. Haziran ve Eylül’de günde 2 saat; Temmuz ve Ağustos’ta 4 saat çalıştığı kabul edilmiştir. Aşağıdaki tabloda, her ay için baz yük (195 kWh) üzerine aydınlatma, kombi ve klima tüketimi eklenerek aylık toplam tüketim hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda deney setine aylık olarak hesaplanan tüketim değerleri üzerinden direnç bağlanmıştır. Tablo 3.3’te ortalama bir konutun aylara göre elektrik tüketim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Aylara göre toplam elektrik tüketiminin dağılımı

Ay	Baz yük (kWh)	Ek yük (kWh)	Toplam (kWh/ay)
Ocak	195	38.8	233.8
Şubat	195	31.5	226.5
Mart	195	24.6	219.6
Nisan	195	16.8	211.8
Mayıs	195	12	207
Haziran	195	82.2	277.2
Temmuz	195	154.2	349.2
Ağustos	195	154.2	349.2
Eylül	195	87	282
Ekim	195	22.8	217.8
Kasım	195	30.6	225.6
Aralık	195	38.8	233.8
Toplam	2340	693.5	3033.5

3.2. Kullanılan Ölçüm Ekipmanları

Bu çalışmada sistemin performansını izleyebilmek için sıcaklık, güneş ışınımı ve enerji üretim-tüketim verileri detaylı bir şekilde ölçülmüştür. Ölçüm sistemleri doğru, güvenilir ve uzun süreli veri toplama sağlayacak şekilde seçilmiş ve sahada dikkatli bir montaj ve kalibrasyon süreci ile devreye alınmıştır.

3.2.1. Veri Derleyici

Sistem genelinde sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesi ve çok sayıda sensörden gelen verilerin eş zamanlı olarak toplanabilmesi amacıyla veri toplama ünitesi olarak Keithley 2701 veri derleyici kullanılmıştır. Sistem üzerindeki sıcaklık değişimlerini sürekli izlemek, PV/T sisteminin ve yerden ısıtma-FDM hattının performansını değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Keithley 2701 seçilmesinin nedeni, cihazın yüksek kanal kapasitesi, düşük ölçüm hatası ve Ethernet ağı üzerinden uzaktan veri erişimi sağlamasıdır. Cihazın teknik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Bu özellikler sayesinde hem yerinde hem de uzaktan veri takibi yapılabilmektedir. Veri derleyici bina içerisindeki odaya yerleştirilmiş ve Ethernet ağı üzerinden sisteme entegre edilmiştir. Cihaza 17 adet T-Tip ısı çift sıcaklık sensörü bağlanmıştır. Ölçümler 5 dakikalık zaman aralıklarıyla otomatik olarak kaydedilmiş ve 24 saat boyunca sürekli veri toplanmıştır. Cihazın veri saklama ve uzaktan erişim özellikleri kullanılarak ölçümler düzenli olarak arşivlenmiştir. Sistemde kullanılan veri derleyicinin görüntüleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Keithley 2701 veri derleyici teknik özellikleri

Diferansiyel giriş kanalı sayısı	80
Slot sayısı	2
İletişim	Ethernet, RS-232
Tarama hızı(bellek)	500/sn
Tarama hızı (veri yolu)	440/sn
Ohm çözünürlük	100 $\mu\Omega$
Tampon bellek	450000rdgs
Matris çapraz noktaları	96



Şekil 3.7. Veri derleyici (Datalogger)

3.2.2. Isıl Çiftler

Çatıdaki PV/T paneller, cephe PV panellerinin yüzeyleri, yerden ısıtma hattı, FDM boruları, iç/dış ortam sıcaklıkları ve cephe ile bina arasında kalan ara hava katmanının sıcaklıklarının izlenebilmesi amacıyla toplam 17 noktaya T-Tip ısıl çiftler yerleştirilmiştir. T-Tip ısıl çiftler düşük sıcaklık aralıklarında yüksek hassasiyet sağladığı için tercih edilmiştir. T tipi ısıl çiftler 3 - 5 m uzunlukları aralığında IEC60584-1 standardına uygun olarak seçilmiştir. Algılayıcının ölçüm ucunda Cu-CuNi alaşımı bulunmaktadır. Isıl çiftlerin dış kılıfı flor etilen propilendir. Ayrıca bu sensörler saha koşullarına (nem, sıcaklık değişimi) dayanıklı yapıları sayesinde uzun süreli kullanım imkânı sunmuştur. Aşağıda Tablo 3.5'te ısıl çiftlerin yerleştirildikleri yerler verilmiş olup Şekil 3.8'de ise ısıl çiftlerin görüntüleri verilmiştir.

Tablo 3.5. Sistemde bulunan ısıl çiftlerin yerleştirildikleri yerler

Isıl Çift numarası	Bulunduğu yer
T1	İç ortam alt
T2	İç ortam üst
T3	Dış ortam
T4	PV/T giren su
T5	PV/T çıkan su
T6	Güney cephe ara hava üst taraf
T7	Güney cephe ara hava alt taraf
T8	Güney yarı saydam PV panel
T9	Batı cephe ara hava üst taraf

T10	Batı cephe ara hava alt taraf
T11	Batı yarı saydam PV panel
T12	Doğu cephe ara hava üst taraf
T13	Doğu cephe ara hava alt taraf
T14	Doğu yarı saydam PV panel
T15	Yerden ısıtma giriş
T16	Yerden ısıtma çıkış
G1	Işınım ölçer



Şekil 3.8. Isıl çiftlerin görüntüleri

3.2.3. Işınım Ölçer

PV/T ve PV sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesi için çatı üzerine bir adet ışıınım ölçer monte edilmiştir. Işınım ölçer, yatay düzleme paralel şekilde konumlandırılmış ve çevresinde gölge oluşturabilecek yapılardan uzak bir noktaya yerleştirilmiştir. Böylece doğrudan gelen ve difüz güneş ışıınımı doğru bir şekilde ölçülmüştür. Kullanılan ışıınım ölçer cihazı geniş bir spektral aralıkta (285–3000 nm) çalışmakta olup, 0–2000 W/m² aralığında hassas ölçüm yapabilmektedir. Veri çözümleyiciden elde edilen voltaj değeri ışıınım ölçerin kendine ait bir özelliğı olan salımlılık (emissivity) değeri (11,88x10⁻⁶) bölünerek W/m² cinsinden birim alana düşen ışıınım şiddeti bulunmuştur. Şekil 3.9’da kullanılan ışıınım ölçer görülmektedir. Cihaz seçimi, yüksek hassasiyet ve saha dayanıklılığı kriterlerine göre yapılmıştır. Ölçümler 5 dakikalık aralıklarla kaydedilmiş ve sistemin anlık güneşlenme değeri sürekli izlenmiştir.



Şekil 3.9. Işınım ölçer

3.2.4. Akıllı Enerji Ölçüm Sensörü

Bina genelinde üretilen ve tüketilen elektrik enerjisinin izlenebilmesi amacıyla Huawei'nin DDSU666-H model akıllı enerji ölçüm sensörü kullanılmıştır. Bu sensör, inverter çıkışına bağlanarak anlık güç, günlük toplam enerji üretimi ve tüketim bilgilerini kaydetmiştir. Şekil 3.10'da akıllı enerji ölçüm sensörünün görüntüsü verilmiştir. Ayrıca bataryanın şarj ve deşarj döngüleri de bu sensör üzerinden izlenmiştir. DDSU666-H sensörünün tercih edilme nedeni; yüksek hassasiyetli ölçüm yapabilmesi (%0.5 hata oranı), RS485 Modbus RTU protokolü ile veri iletişimi kurabilmesi ve Huawei FusionSolar platformuna tam uyum sağlamasıdır. Saha uygulamasında sensör inverter çıkış hattına bağlanmış, iletişim kabloları çekilerek sistem yazılımına entegre edilmiştir. Böylece hem yerinde ekran görüntüsü alınmış, hem de bulut tabanlı izleme sistemi üzerinden veriler uzaktan erişilebilir hale getirilmiştir.



Şekil 3.10. Akıllı enerji ölçüm sensörü

3.2.5. Inverter ve Batarya Sistemi

Kurulan sistemde, PV ve PV/T panellerden üretilen elektrik enerjisinin bina içerisinde doğru biçimde kullanılabilmesi, fazla enerjinin depolanarak gerektiğinde tekrar kullanılabilmesi ve şebekeyle çift yönlü etkileşim sağlanabilmesi için Huawei Luna 2000 hibrit inverter ve 5 kWh kapasiteli lityum-iyon batarya modülü kullanılmıştır. Bu sistem sayesinde, bina hem kendi elektrik ihtiyacını karşılamış hem de şebekeye bağımlılığı azaltılmıştır. Huawei Luna 2000 inverter sistemi; PV panellerden gelen doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) çevirerek binadaki elektrikli cihazlara enerji sağlamıştır. Aynı zamanda çift yönlü çalışabilen bu inverter, batarya ile

haberleşerek fazla enerjiyi bataryada depolamış, enerjiye ihtiyaç duyulduğunda ise bataryadan enerji çekimini otomatik olarak gerçekleştirmiştir. Sistem aynı zamanda MPPT özelliği sayesinde anlık olarak en verimli enerji üretim noktasını takip ederek PV performansını maksimize etmiştir. Sistemin elektrik üretim ve tüketim değerleri uzaktan olarak izlenebilen Fusion Solar sistemi ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca binanın ortalama enerji tüketim değerleri hesaplanarak binaya bu değerlerde direnç bağlanmıştır.

Huawei inverter ve bataryanın seçilme nedenleri şunlardır:

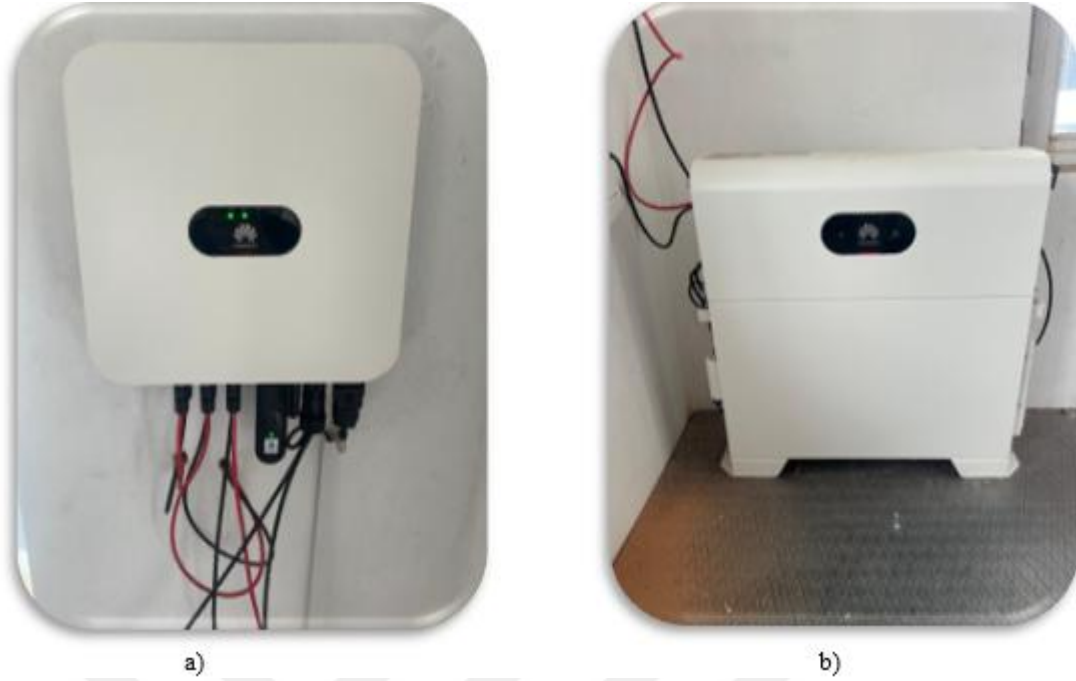
- **Modüler yapı:** Huawei Luna 2000 batarya sistemi 5 kWh'lik modüllerle başlayıp 30 kWh'ye kadar ölçeklenebilir.
- **Yüksek verim:** %97,6 inverter verimi ile düşük kayıplı sistem çalışması.
- **Kolay izleme:** FusionSolar uygulaması üzerinden tüm sistemin gerçek zamanlı izlenebilmesi.
- **Hızlı tepki süresi:** Anlık yük değişimlerine milisaniyeler seviyesinde tepki verebilme.
- **Yüksek güvenlik:** LFP (Lityum Demir Fosfat) hücre teknolojisi ile uzun ömür ve düşük yangın riski.

Kurulum sırasında inverter ve batarya, binanın içindeki IP65 koruma sınıfına uygun, nem ve tozdan arındırılmış teknik odaya monte edilmiştir. İlk olarak duvara inverter montaj plakası sabitlenmiş, ardından inverter birimi bu plakaya sabitlenmiştir. Batarya modülü, inverterin altına konumlandırılmış ve özel DC bağlantı kabloları ile birbirine bağlanmıştır. Veri iletimi için RS485 haberleşme hattı kullanılmış, bu sayede inverter ve batarya arasında sürekli bilgi alışverişi sağlanmıştır. Batarya ünitesi, PV panellerden gelen fazla enerjiyi depolayarak akşam saatlerinde tüketimin karşılanmasını sağlamış ve gerektiğinde şebekeden destek almıştır. Sistem, Huawei Backup Box ile birlikte çalıştığından şebeke kesintisi durumlarında otomatik olarak ada moduna (off-grid) geçerek kritik yüklerin kesintisiz enerji ihtiyacını karşılamıştır.

Kurulum sonrasında inverter ve batarya sisteminin:

- DC/AC bağlantıları,
- Topraklama hattı,
- Haberleşme kabloları,
- Şebeke senkronizasyonu

kontrolleri yapılmış, tüm sistem elektriksel ve yazılımsal testlerden geçirilerek devreye alınmıştır. Şekil 3.11'de kullanılan bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 3.11. a) Inverter ve b) bataryanın görüntüleri

3.3. Sayısal Çalışma

Bu çalışmada, güneş destekli PV/T kolektörlerinden elde edilen sıcak su ile beslenen yerden ısıtma sisteminin, bina iç ortam sıcaklığı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sistem, FDM entegreli yerden ısıtma borularından oluşmakta olup, gündüz saatlerinde PV/T sisteminden gelen sıcak suyla beslenmekte, gece ise FDM'nin depoladığı gizli ısıyı odaya salarak pasif bir ısıtma sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, sistemin birebir modeli SolidWorks yazılımı ile oluşturulmuş ve ANSYS Fluent ortamında analiz edilmiştir. 3 boyutlu modelde, yerden ısıtma sistemine ait bakır boruların etrafında belirli kalınlıkta RT22HC FDM tanımlanmış ve suyun FDM içerisindeki dolaşımı eşlenik ısı transferi modeli ile çözülmüştür. İlk olarak deneyin yapıldığı güne ait veriler ile PV/T'den elde edilen sıcaklıklar bulunacak olup daha sonra PV/T'den yerden ısıtma sistemine giren akışkan ile FDM'li durumun sayısal analizi yapılmış daha sonra ise deneysel model ile sayısal çalışma doğrulanmıştır. Ardından deneysel sistemde bulunmayan FDM'siz durum için sayısal analizler gerçekleştirilmiş olup FDM'li ve FDM'siz durumun kıyası yapılmıştır. Oda içi duvarlar adyabatik kabul edilmiştir. Çalışma, bir gün boyunca 24 saatlik analiz süresini kapsamaktadır.

3.3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği denklemlerini sayısal yöntemlerle çözmek için yüksek hesaplama gücünden yararlanan bir mühendislik disiplini. Hız,

momentum ve viskozite gibi temel büyüklükler denklemlere dâhil edilse de, karmaşık geometrilere bu büyüklükler için analitik bir çözüm geliştirmek çoğu zaman imkânsızdır. Uygulamalarda genellikle sadeleştirilmiş modeller tercih edilse de, gerçek sistemlerin karmaşık geometrileriyle başa çıkmak için HAD çoğu durumda vazgeçilmezdir. HAD’de akış alanı, ağ (mesh) yapısını oluşturan nokta veya düzenli küçük elemanlara ayrılarak diferansiyel denklemler adım adım iteratif yöntemlerle çözülür. Bu yaklaşım, kararlı ya da geçici akışları, sabit yoğunluklu veya sıkıştırılabilir ortamları, hız-basınç-sıcaklık dağılımlarını ve çok fazlı akışları aynı çatı altında incelemeye olanak tanır [62].

Sayısal çözümler, laboratuvarla tekrarlanması güç konfigürasyonların bilgisayar ortamında hızlıca kurgulanmasını sağlar; böylece prototip üretim maliyeti ve zaman kaybı en aza iner. HAD ile fiziksel sensörlerin erişemediği bölgelerdeki akış davranışları ayrıntılı biçimde analiz edilebilir, sanal prototipler oluşturulup üzerinde benzetimler yapılabilir. Ayrıca, sonuçların istenilen zaman diliminde ve mekânsal noktalarda görselleştirilebilmesi HAD’in önemli bir avantajıdır. Deneysel çalışmalarda kullanılan prob ve sensörler akış alanını bozabilir; sensör sayısının sınırlı olması da her noktadan veri alınmasını güçleştirir ve test süresini uzatır. HAD bu kısıtlamaları ortadan kaldırarak daha bütüncül ve kesintisiz veri elde edilmesine olanak tanır [62].

3.3.2. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY), karmaşık akış alanlarının sayısal çözümünü kolaylaştırmak amacıyla geometrinin küçük kontrol hacimlerine ayrılması ilkesine dayanır. Her bir kontrol hacmi için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri integral biçiminde yazılır; ardından bu denklemler hacim içinde ortalama değerlere indirgenerek cebirsel eşitlikler dizisine dönüştürülür. Doğrusallaştırma adımı sonrasında elde edilen doğrusal denklem sistemi zamana bağlı olarak iteratif bir süreçle çözülür. Sıcaklık, hız ve basınç gibi akışkan alanı değişkenleri, belirlenen yakınsaklık kriterleri sağlanıncaya dek güncellenir.

Aşağıda, SHY tabanlı bir çözüme ulaşırken tipik olarak izlenen adımlar sıralanmıştır [62]:

- **Ön-işlem (Mesh oluşturma)**

İncelenecek geometri, sayısal analizle uyumlu bir ağ (mesh) üretim yazılımı kullanılarak ayrıntılı biçimde discretize edilir. Oluşturulan ağ, akış alanını temsil eden kontrol hacimlerine bölünür.

- **Yönetici Denklemlerin Ayrıklaştırılması**

Süreklilik, momentum ve gerekli ise enerji veya türdeşlik denklemleri kontrol hacimlerinde integral forma göre ayrıklaştırılır. Sayısal akış şemaları (upwind, QUICK vb.) ve uygun sınır koşulları tanımlanır.

- **İteratif Çözüm**

Ortaya çıkan doğrusal denklem takımları, iteratif çözücüler (SIMPLE, PISO, GMRES vb.) ile çözülür. Yakınsaklık, artık (residual) büyüklüklerinin önceden tanımlanmış hata eşiğinin altına inmesiyle değerlendirilir; gerekirse dinamik zaman adımı ayarlamaları yapılır.

- **Sonuçların Doğrulanması ve Görselleştirilmesi**

Elde edilen hız, basınç ve sıcaklık dağılımları görselleştirilir; deneysel veya literatürdeki referans verilerle tutarlılığı kontrol edilir. Gerekli hâldeki ilave iterasyonlarla çözüm rafine edilerek nihai veri seti elde edilir [62].

3.3.3. Ansys Fluent Modülü

ANSYS Fluent, hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz ortamlarda, laminar ve türbülanslı rejimlerde ortaya çıkan geniş bir akış problemleri skalasını sayısal olarak çözümleyebilen gelişmiş bir HAD paketidir. Yazılım, kararlı (steady) ve geçici (transient) analiz modlarını desteklerken; ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar dâhil olmak üzere kapsamlı taşıma olayları modellerini karmaşık geometrileri hassas biçimde temsil edebilen geometri/mesh oluşturma yetenekleriyle bütünleştirir. Uygulama alanları arasında eşlenik ısı transferi, boru içi-dış akışlar ve erime-katılaşma süreçleri yer alır. Fluent'in öne çıkan modüllerinden biri serbest yüzey ve çok fazlı akışların incelenmesine yönelik model kümesidir. Gaz-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı ve gaz-sıvı-katı sistemler; Akışkan Hacmi, Karışım, Eulerian ve Ayrık Faz Modeli yaklaşımlarıyla çözülebilir. Türbülans model kütüphanesi, $k-\epsilon$ ve $k-\omega$ tabanlı RANS modellerinden LES/DES seçeneklerine kadar genişler; kaldırma kuvveti ve sıkıştırılabilirlik gibi ek fiziksel etkileri de hesaba katabilir. Genişletilmiş duvar fonksiyonları ile yerel duvar-yakın bölge modelleri, sınır tabakası içinde yüksek doğruluk sağlar. Doğal, zorlanmış ve karışık taşınımın yanı sıra gözenekli ortam akışları gibi farklı ısı transfer modları da aynı çatı altında analiz edilebilir; böylece mühendislik tasarımlarında güvenilir ve ayrıntılı sonuçlar elde edilir [62].

3.3.4. Fiziksel Model

Bu sayısal çalışma kapsamında, çatıya kurulu PV/T panellerden elde edilen sıcak suyun, bina içerisinde kurulan yerden ısıtma sisteminde kullanılarak iç mekân sıcaklığının sürdürülebilir şekilde kontrol altında tutulması amaçlanmıştır. Sistemde kullanılan su sıcaklıkları, ANSYS Fluent yazılımında “solar yük” modülü yardımıyla, deney düzeneğinin konum ve zaman bilgisine göre tanımlanmıştır. Böylece, gün boyu değişen güneş ışıınımı koşulları altında PV/T panellerden elde edilen sıcaklık değerleri zamana bağlı olarak sayısal modellemeye entegre edilmiştir. Modelleme kapsamında, çatı üstü PV/T sisteminden gelen sıcak su, iç mekânda zemin altına gömülü bakır borularda dolaştırılmıştır. Bu boruların etrafı belirli bir kalınlıkta RT22HC esaslı FDM ile sarılarak,

ısı enerji depolama ve geç saatlerde enerji geri salımı hedeflenmiştir. Deneysel sistemde, boru dış çapı 16 mm, zemin altı toplam FDM kalınlığı ise 28 mm olarak tasarlanmıştır. Yer hacmi yaklaşık 3 m x 2.95 m x 2.2 m olarak kabul edilen test odasında, üst, alt ve yan duvarlar ısı kaybını minimuma indirmek için adyabatik sınır koşulu olarak tanımlanmıştır.

Fluent ortamında modellenen fiziksel alan üç temel bölgeden oluşmaktadır:

1. **Su Akış Alanı (Bakır Boru İçi):** PV/T çıkışından gelen suyun dolaştığı borular.
2. **FDM Alanı (Boruların Çevresi):** RT22HC FDM ile doldurulmuş, gizli ısı depolama sağlayan alan.
3. **Oda Hacmi:** İç ortam hava alanı, sıcaklık dağılımı burada analiz edilmiştir.

Yapılan modelde, gün boyunca güneşten elde edilen ışınlama ile ısıtılan su, zemin altındaki borularda dolaşırken, gündüz saatlerinde FDM tarafından ısı emilmekte ve gece boyunca bu enerji geri salınarak iç mekân sıcaklığının düşmesi engellenmektedir. Sayısal çalışmanın bu bölümü, deneysel sistemin aynısı olacak şekilde SolidWorks programında üç boyutlu olarak modellenmiş ve ANSYS Fluent'e aktarılmıştır. Mesh yapısı oluşturulurken özellikle boru-FDM ara yüzeyinde yüksek hassasiyetli çözüm sağlamak adına hassas çoklu geometriler ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu modelleme yaklaşımı, çatı üstü PV/T sistemi ile yerden ısıtma hattı arasındaki tam zaman eşleştirmeyi mümkün kılarak, su giriş sıcaklıklarının deneysel olarak belirlenmesini ve aynı zaman adımıyla FDM ve hava hacmindeki ısı transferinin eş zamanlı çözülmesini sağlamaktadır. Böylece, gündüz PV/T panellerden alınan ısı enerjisinin, FDM sayesinde gece de etkili şekilde kullanılabilmesi ortaya konmuştur.

Problemin çözümünde kullanılan zamana bağımlı denklemler üç boyutlu (3B) durum için Reynolds ortalaması alınmış Navier–Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak yazılmıştır ve aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır :

1. Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir.
2. Erime sırasında doğal konveksiyonun etkisi, yalnızca yoğunluk değişimine bağlı yükselme kuvvetlerini göz önüne alan Boussinesq yaklaşımı ile çözülmüştür.

- **Süreklilik denklemi**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'de ρ akışın yoğunluğunu, $\mathbf{u}=(u,v,w)$ hız vektörünü gösterir [63].

- **Momentum denklemi**

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho g_x + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial z} + \nabla \cdot \tau \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho g_y + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial z} + \nabla \cdot \tau \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w u) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla w + \nabla w^T)] + \rho g_z + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} + \nabla \cdot \tau \quad (3.5)$$

- **Reynolds gerilme tensörü;**

$$\tau = -2\mu_t \left(S - \frac{2}{3} k I \right) \quad (3.6)$$

Burada $v = (u, v, w)$ hız vektörünü, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi, $g_{x,y,z}$ yöndeki yerçekimi bileşenini ve τ Reynolds gerilme tensörünü temsil etmektedir.

- **Enerji denklemi**

$$\frac{\partial(\rho CT)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho CT u) = \nabla \cdot (k \nabla T - \rho CT u) - \nabla \cdot q_r \quad (3.7)$$

Süreklilik denklemi denklem 3.7’de verilmiş olup bu denklem, kütle korunumu ilkesini ifade etmekte olup akış alanındaki yoğunluk değişimi hem zamana hem de mekâna bağlıdır. Momentum denklemleri, basınç gradyanları, viskoz gerilmeler, yerçekimi kuvvetleri ve hız bileşenlerinin değişimini dikkate alarak momentumun korunumu ilkesini yansıtır. Türbülansın geniş zaman mekân ölçeklerine sahip yapısından ötürü RANS yaklaşımı tercih edilmiş, türbülans gerilmeleri için Reynolds Gerilme Modeli (RSM) ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Enerji denklemi; iletim, taşınım ve $(\nabla \cdot q_r)$ terimiyle ifade edilen ışıyım ısı transferini birlikte çözer [64].

- **FDM’nin toplam entalpisi;**

$$LH = h + \Delta LH \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de, h duyulur entalpi ile gizli ısı (LH) toplamını ifade etmektedir. Burada, h değeri Denklem 3.9 kullanılarak belirlenmiştir [62].

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.9)$$

Burada, h_{ref} referans entalpiyi, C_p sabit basınçtaki özgül ısıyı ve T_{ref} ise referans sıcaklığı ifade etmektedir. ΔLH ise Denklem 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır [62].

$$\Delta LH = BL \quad (3.10)$$

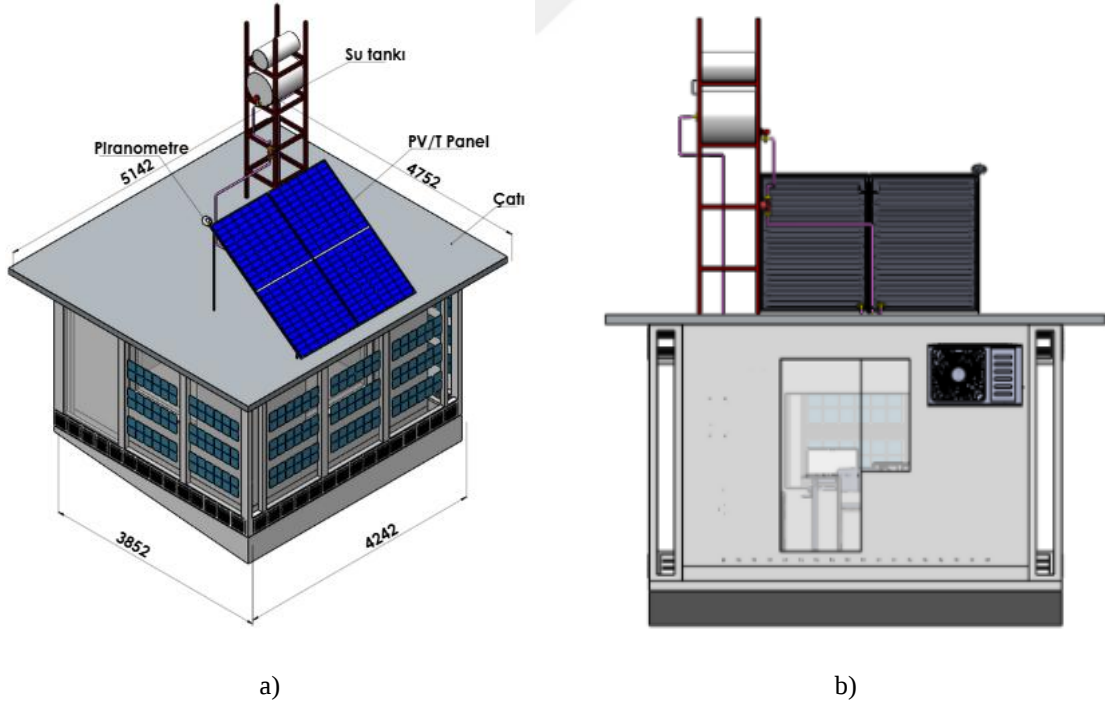
Denklem 3.10’da, B terimi faz değişim malzemesinin sıvı fraksiyonunu simgeler ve Denklem 3.11’deki gibi hesaplanır [62]:

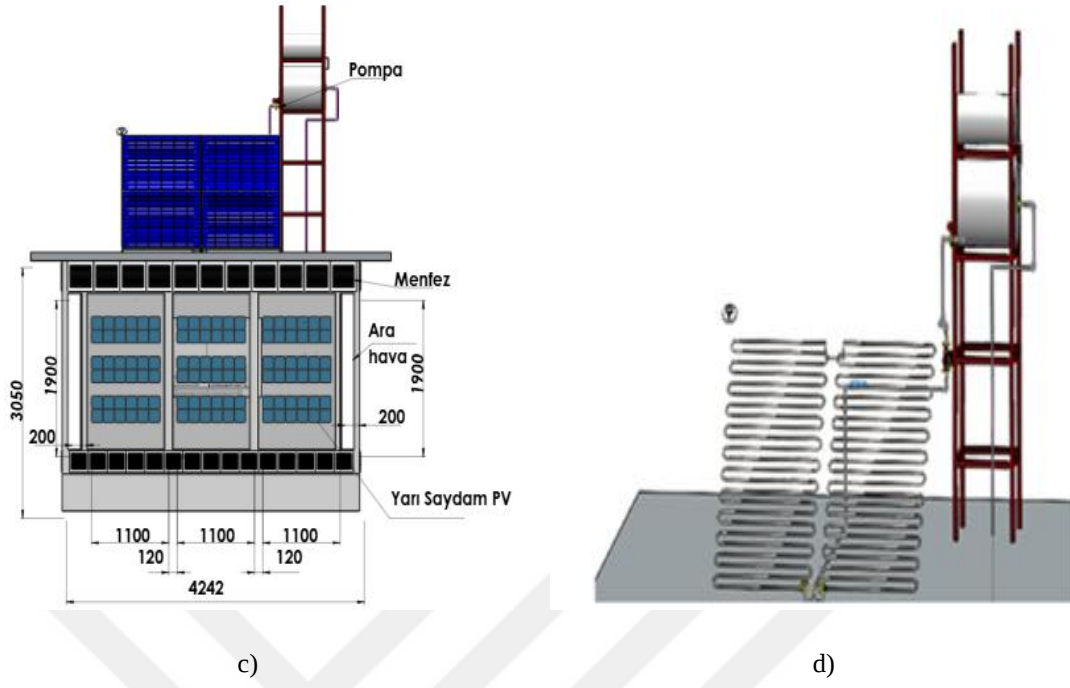
$$B = \begin{cases} 0, & T < T_k \\ \frac{T-T_k}{T_s-T_k}, & T_k \leq T \leq T_s \\ 1, & T > T_k \end{cases} \quad (3.11)$$

Yoğun ışınlıma katılımlı gösteren ortamlarla çalışabilen ve yönsel doğruluğu yüksek olan Ayırık Yönler Modeli, ışınlımlı ile ısı transferinin modellenmesinde kullanılmıştır. Bu model, her bir ayırık katı ağıya bir vektörel yön atayarak, sınırlı sayıdaki katı ağı için Işınlımlı Transfer Denklemi'ni çözmektedir. Küresel Kartezyen sistem kararlı kabul edilmiştir. Işınlımlı enerjisine ilişkin enerji dengesi, Işınlımlı Transfer Denklemi'nin en genel formölasyonu olan Denklem 3.12 ile ifade edilmektedir [62].

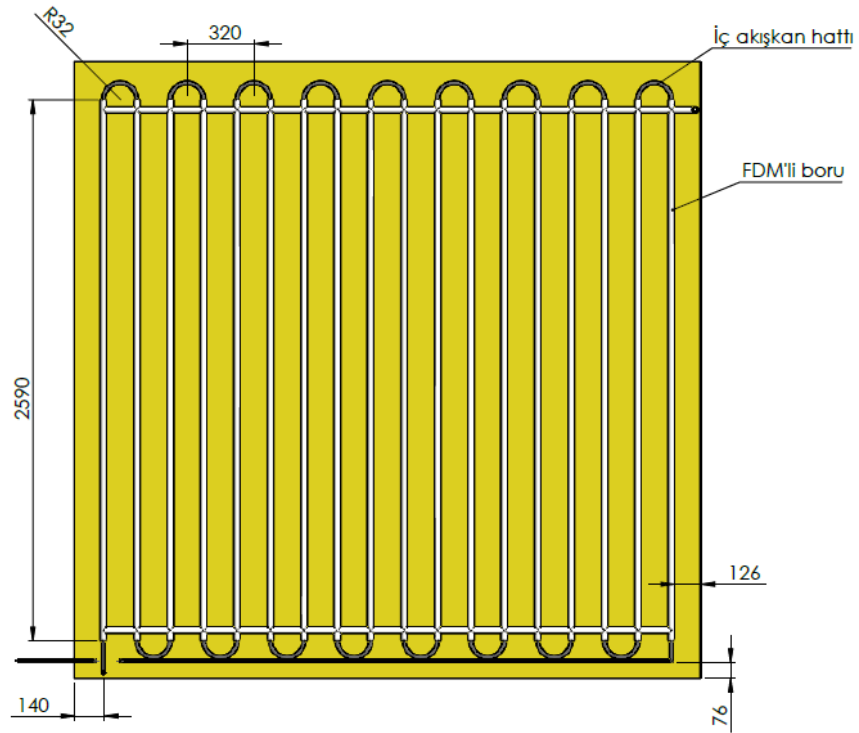
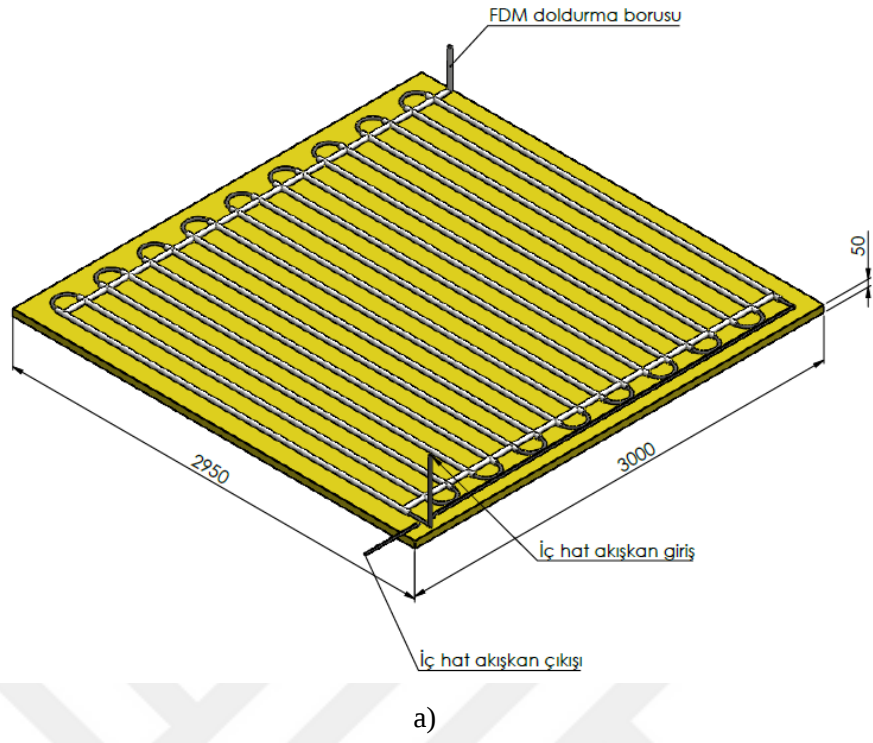
$$I_n(r + dr, s, t + dt) - I_n(r, s, t) + (\alpha + \sigma)I_n(r, s, t)dr = \alpha I_{bn}(r, t)dr + \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_n(r, s)\Phi(s)d\Omega dr \quad (3.12)$$

şekil 3.12'de, sayısal analizlerde kullanılan fiziksel modelin farklı açılardan görünümleri sunulmuştur. (a) izometrik görünüşte, cephelere yerleştirilen yarı saydam PV paneller ile 30° eğimli çatıya monte edilen iki adet PV/T panel ve su tankı birlikte gösterilmektedir. (b) arka görünüşte, PV/T panellerin alt kısmında yer alan bakır borular ve sistemin arka cephesi görünmektedir. (c) ön görünüşte, cephe panellerinin yerleşimi ve ölçüleri yer almakta ve tüm ölçü birimleri mm olarak verilmiştir. (d) PV/T panelin arkasında yer alan bakır boruların detay görünüşü gösterilmiştir. şekil 3.13'te ise, FDM destekli yerden ısıtma sisteminin izometrik ve üstten görünüşü ile sistemin ölçüleri mm cinsinden detaylı olarak gösterilmiştir.





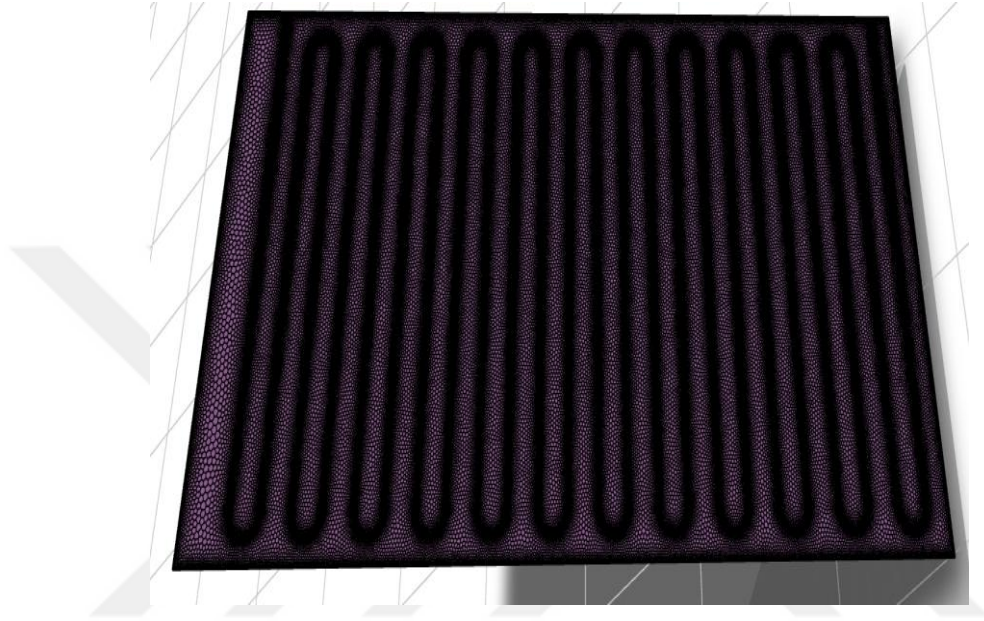
Şekil 3.12. Fiziksel modelin a) izometrik, b) arka, c) ön ve d) PV/T panelin detay önden görünümü



Şekil 3.13. Yerden ısıtma sistemin a) izometrik ve b) üstten görünüşü

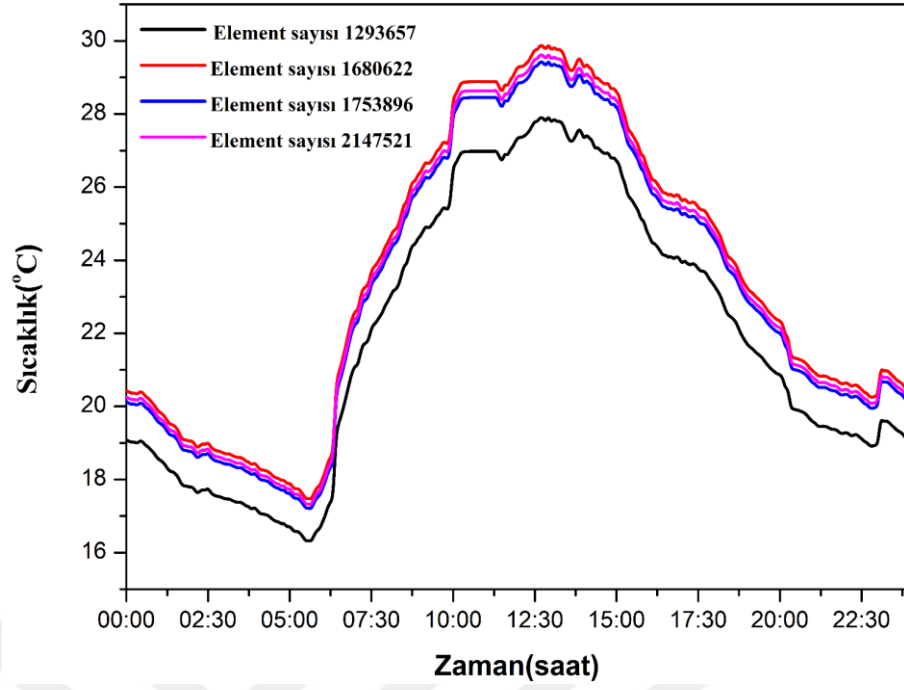
3.3.5. Sayısal Çalışmada Kullanılan Modelin Ağ Yapısı

Ağ bağımsızlık testleri, simülasyon sonuçlarının ağdan bağımsız olduğunu doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ağlar, ticari bir yazılım olan ANSYS Meshing 2024 kullanılarak oluşturulmuştur. PV/T'nin ağ dağılımı Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



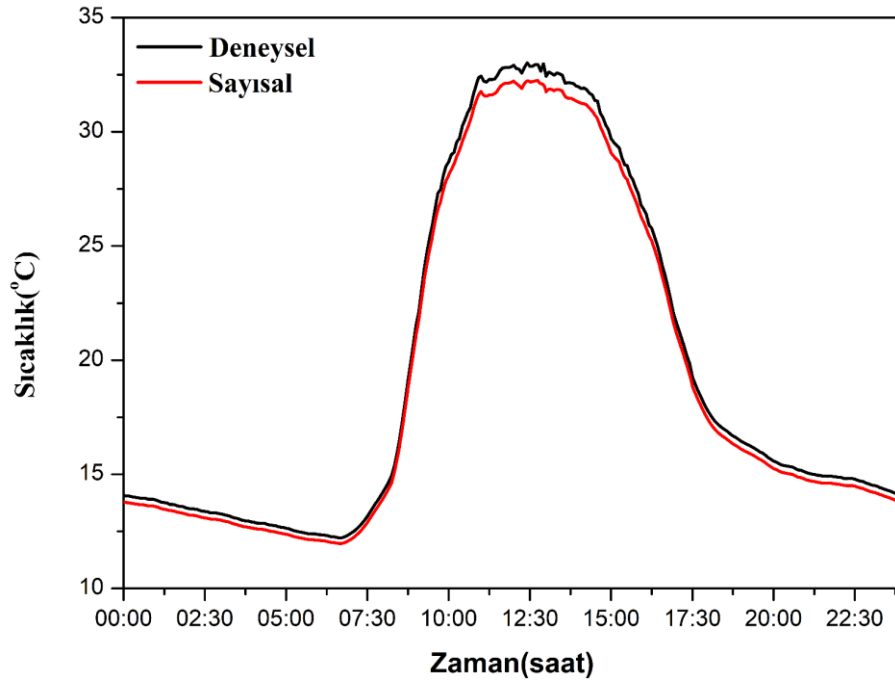
Şekil 3.14. PV/T kolektörün ağ yapısı

Farklı eleman sayısına sahip çeşitli ağ boyutları için yapılan ağ bağımsızlık testi sonuçları Şekil 3.15'te verilmiştir. PV/T modülünde kullanılan eleman sayısı sırasıyla 1.680.622 olarak alınmıştır. Eğrilik (skewness) değeri minimum 2.579×10^{-9} , maksimum 0.241 ve ortalama 4.33×10^{-3} olarak elde edilmiştir. Ayrıca, ortogonal kalite değeri minimum 0.742, maksimum 1 ve ortalama 0.9978 olarak bulunmuştur.



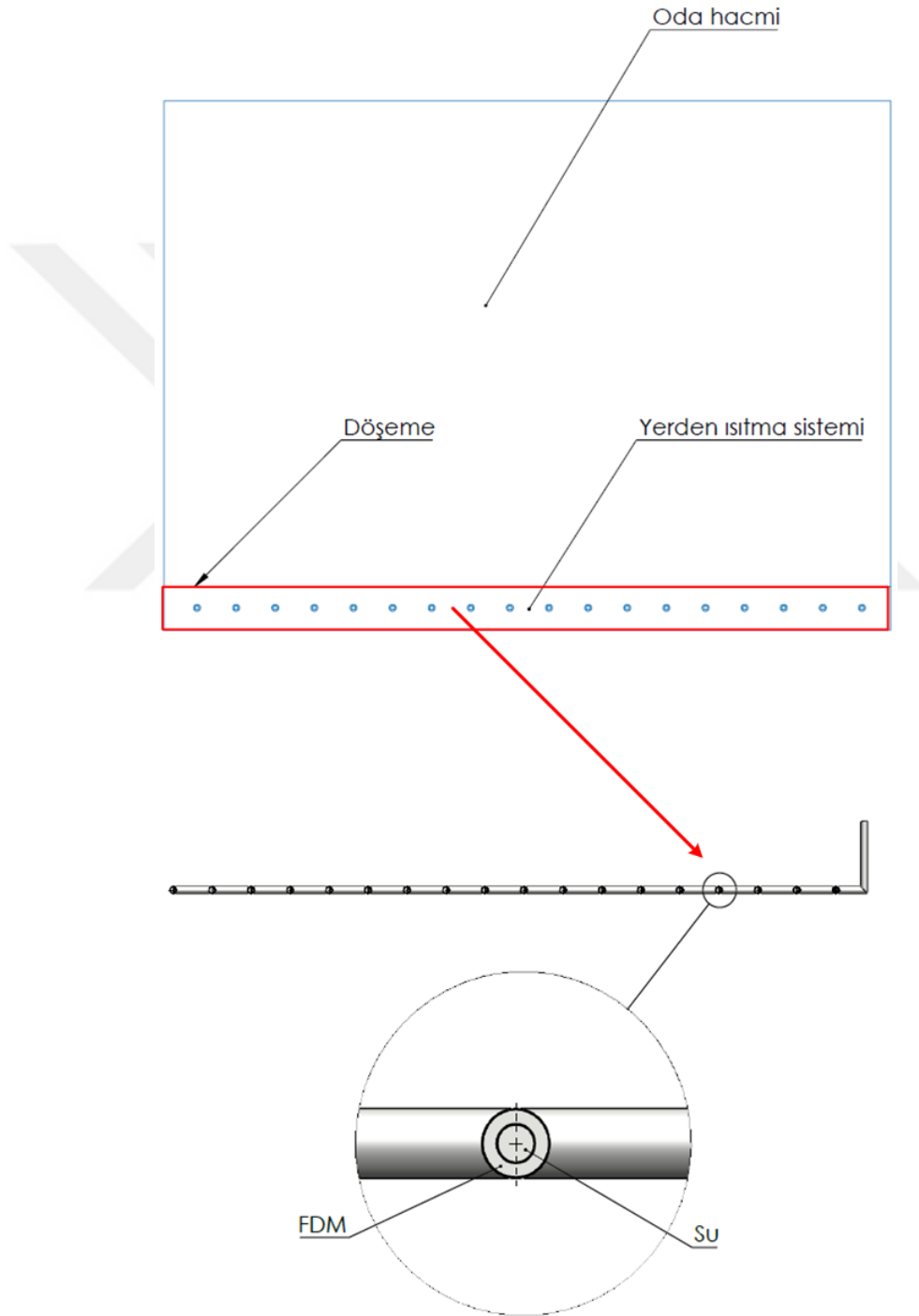
Şekil 3.15. PV/T analizi için ağ kullanılacak ağ yapısının doğrulanması

Sayısal çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için Ekim ayında ölçülen deneysel veriler ile sayısal çalışmadan elde edilen verilerin karşılaştırılması Şekil 3.16’da verilmiş olup sayısal ve deneysel çalışma arasındaki hatanın yüzde 2’den az olduğu görülmüştür.

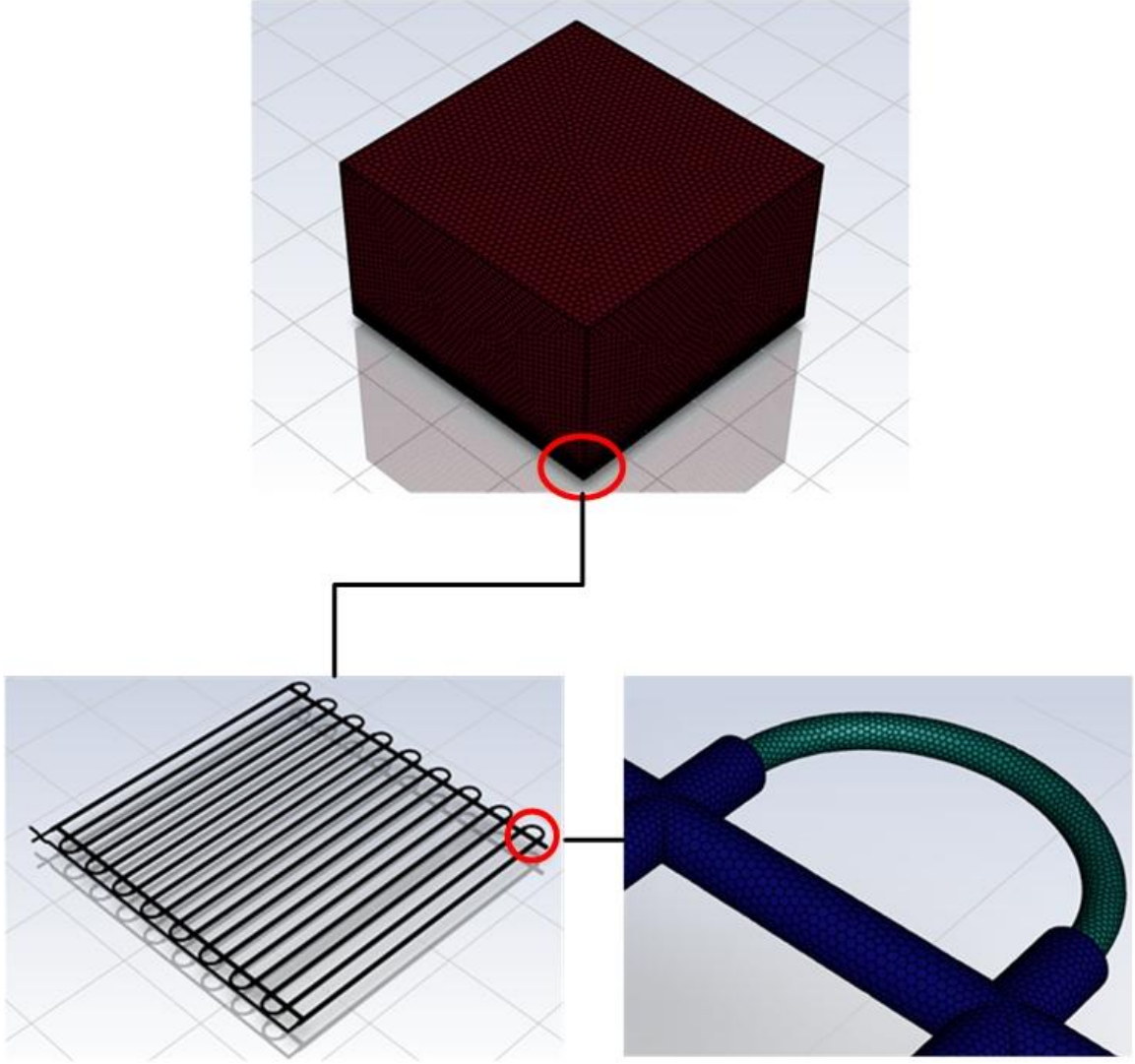


Şekil 3.16. PV/T için sayısal ve deneysel çalışmanın doğrulanması

Şekil 3.17’de oda ve yerden ısıtma ünitesinin iki boyutlu fiziksel model görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.18’de ise oda ve yerden ısıtma sisteminin ağ yapısı görüntüsü verilmiş olup oda ve yerden ısıtma ünitesinde kullanılan eleman sayısı 30.145.778 olarak alınmıştır. Eğrilik değeri minimum 5.15×10^{-5} , maksimum 0.2789 ve ortalama 7.258×10^{-2} olarak elde edilmiştir. Ayrıca, ortogonal kalite değeri minimum 0.681, maksimum 0.9875 ve ortalama 0.9758 olarak bulunmuştur.

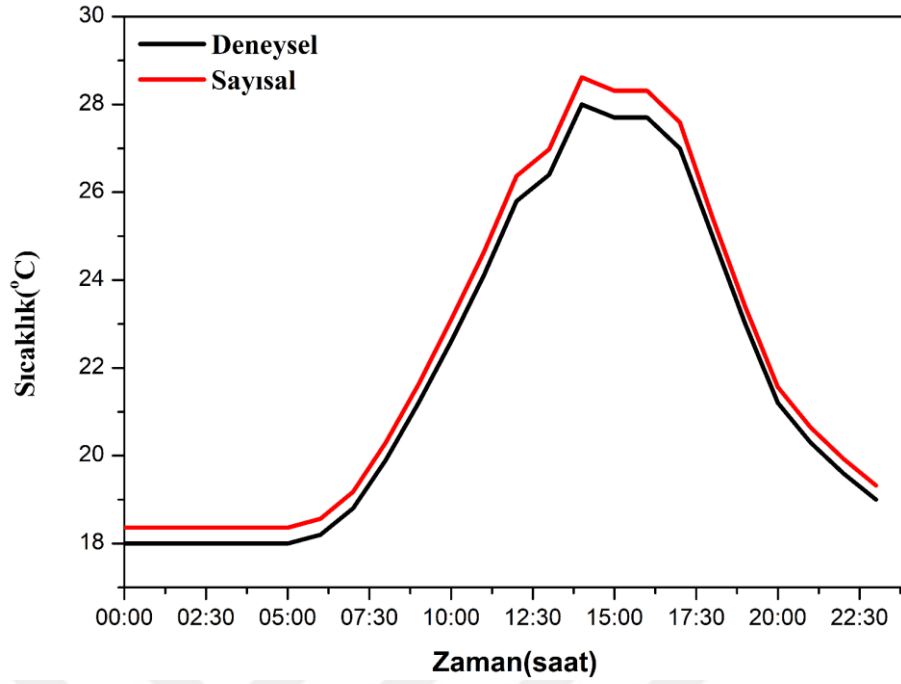


Şekil 3.17. Oda ve yerden ısıtma sisteminin fiziksel model görüntüsü



Şekil 3.18. Oda ve yerden ısıtma sisteminin ağ yapısı

Şekil 3.19’da analizi yapılan oda hacminin tam orta noktasında sayısal ve deneysel çalışmanın doğrulanması yapılmış olup çıkan sonuçlara göre doğrulamanın hata payının yüzde 1.7 civarlarında olduğu görülmüştür.



Şekil 3.19. Oda hacminin tam orta noktasındaki sıcaklık değerleri için sayısal ve deneysel çalışmanın doğrulanması

3.4. Termodinamik Analiz

3.4.1. Enerji Analizi

nSEB uygun olarak tasarlanan sistemde binanın enerji ihtiyacını yerinde karşılamak 7 adet yarı saydam PV panel (toplam 2.45 kW, güney/doğu/batı cephelere entegre) ve 2 adet çatı üstü PV/T panel (toplam 1.10 kW) birlikte çalışarak elektrik ve ısı enerjisi üretir. PV/T panellerden dolaşan su, güneşten aldığı ısıyı bir depolama tankında biriktirir ve Mart, Nisan, Mayıs, Eylül, Ekim ve Kasım aylarında bina yerden ısıtma sisteminde kullanılmaktadır. Bu entegre tasarım sayesinde, güneş enerjisinin hem elektriksel hem de termal bileşeni bina ihtiyaçlarına yönlendirilir; böylece enerji verimliliği önemli ölçüde artar ve binanın şebekeden aldığı enerji azalırken karbon salımı da düşer. Enerji analizi için, gelen güneş ışıınımı gücü G (W/m^2) ve panel alanı A kullanılarak elektriksel ve termal verimler Denklem 3.13'te ki gibi tanımlanır. Elektriksel verim PV modülünün anlık ürettiği elektrik gücünün güneş gücüne oranıdır [65]:

$$\eta = \frac{P_{\text{elektrik}}}{G.A} \quad (3.13)$$

Burada P_{elektrik} panelin ürettiği elektrik gücüdür (W). Benzer şekilde, ısı verim PV/T kolektörünün kullanıma aktardığı ısı gücünün (örneğin suya aktarılan ısı) gelen güneş gücüne oranıdır. Kütleli debisi $\dot{m}$ olan akışkan (su) için panel giriş-çıkış sıcaklık farkıyla ısı güç Denklem 3.14'te verilmiştir:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giren}}) \quad (3.14)$$

şeklinde bulunur. Dolayısıyla:

$$\eta_{Isul} = \frac{\dot{m}c_p(T_{çıkan}-T_{giren})}{G.A} \quad (3.15)$$

PV'ler sadece elektrik, PV/T paneller ise aynı anda her iki enerji türünü de sağladığı için toplam enerji verimi elektriksel ve ısı verimlerin toplamı Denklem 3.16'da ki şekilde ifade edilir [66]:

$$\eta_{toplam} = \eta_{elektrik} + \eta_{Isul} = \frac{P_{elektrik} + \dot{m}c_p(T_{çıkan}-T_{giren})}{G.A} \quad (3.16)$$

Burada;

$$m = 0.05 \text{ kg/s}$$

$$C_p = 4180 \text{ J/kg.K}$$

$$\text{Yarı saydam panelin alanı: } 1.9 \times 1.1 \text{ m} = 2.09 \text{ m}^2$$

$$\text{PV/T panelin alanı: } 2.278 \times 1.134 \text{ m} = 2.583 \text{ m}^2$$

3.4.2. Ekserji Analizi

Enerji analizi, miktar olarak enerji kazanımlarını değerlendirirse de; enerjinin kalite farkını ve sistemdeki geri dönüşü olmayan kayıpları göz önüne almak için ekserji analizi gereklidir. Ekserji, bir enerji formunun mekanik işe dönüşebilme yeteneğini temsil eden ve çevre koşullarına bağlı bir ölçüdür. Bu çalışmada ekserji analizinde ortam (referans) sıcaklığı T_0 olarak dış ortamın ortalama sıcaklıkları (deney verilerinde aylık ortalamalar) alınmıştır. Ekserji hesabı için öncelikle güneş ışınımının ekserjisi tanımlanmıştır. Güneş, yaklaşık $T_{güneş} = 5800 \text{ K}$ sıcaklığında bir kara cisim olarak modellenirse, belli bir A alanına gelen G güneş ışınımı akısının ekserji akısı $E_{x,güneş}$ şu Denklem 3.17 ile verilebilir[67];

$$E_{x,güneş} = G.A \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{güneş}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{güneş}} \right)^4 \right] \quad (3.17)$$

Bu ifade Petela tarafından türetilen güneş ekserjisi formülüdür ve T_0 ortam sıcaklığı daha düşük oldukça gelen güneş enerjisinin ekserji içeriğinin toplam enerjiye yakınsadığını gösterir. 25°C ortamda $1 - \frac{T_0}{T_{güneş}}$ faktörü yaklaşık 0.95 mertebesinde, yani güneş enerjisinin yaklaşık %95'i teorik olarak iş yapabilir özelliktedir.

Sistemin ekserji girişi bu güneş ekserjisi akışı iken, ekserji çıkışı PV panelden çıkan elektrik ve PV/T panelden elde edilen elektrik ve ısı ekserjilerinin toplamıdır. Elektrik enerjisi yüksek kalitede olduğu için ekserjisi bizzat kendine eşittir ($1 \text{ kWh elektrik} = 1 \text{ kWh ekserji}$). Denklem 3.18'de elektrik ekserji akışı bağıntısı verilmiştir [67]:

$$E_{x,elektrik} = P_{elektrik} \quad (3.18)$$

ile hesaplanabilir. Termal ekserji akışı ise, panelden çıkan sıcak suyun taşıdığı kullanışlı iş potansiyelidir. Giriş ve çıkış suyu arasındaki ekserji artışı akış ekserjisi Denklem 3.19’da ki bağıntı ile bulunur [67]:

$$E_{x,ısı} = mC_p \left[(T_{çıkan} - T_{giren}) - T_0 \ln \frac{T_{çıkan}}{T_{giren}} \right] \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanır. Bu formülde $T_{çıkan} - T_{giren}$ terimi ısı enerjisiyi temsil ederken terimi $T_0 \ln \frac{T_{çıkan}}{T_{giren}}$ termodinamik ikinci kanun etkinliğini (ısı kalitesini) içerir. Panelden çıkan suyun sıcaklığı ne kadar yüksekse ve ortam sıcaklığından ne kadar fazla ise ekserji değeri o kadar yüksek olur; ancak $T_{çıkan}$ pratikte arttıkça paneldeki ısı kayıpları artacağı için bir denge noktası vardır. Sistem için ekserji verimliliği (ikinci kanun verimi), elde edilen toplam ekserji çıktısının (elektrik + ısı) güneşten sağlanan ekserji girdisine oranı olarak Denklem 3.20’de ki formülle tanımlanır [67]:

$$\epsilon_{sistem} = \frac{E_{x,çıkan}}{E_{x,giren}} = \frac{E_{x,elektrik} + E_{x,ısı}}{E_{x,güneş}} \quad (3.20)$$

Bu değer, güneş enerjisinin ikinci kanun açısından ne kadar etkin kullanıldığını gösterir. PV/T sistemlerde ekserji veriminin, enerji verimine göre oldukça düşük kaldığı bilinmektedir. Bunun başlıca sebebi, üretilen ısı enerjinin nispeten düşük sıcaklıklarda olması ve bu nedenle ekserji (işe dönüştürülebilir kısım) miktarının sınırlı kalmasıdır. Nitekim literatürde termal ekserji veriminin elektriksel ekserji verimine kıyasla oldukça düşük olduğu, çünkü ısıнын düşük kalitede olması nedeniyle ekserji içeriğinin sınırlı kaldığı açıkça belirtilmiştir [67].

3.4.3. Eksergoekonomik Analiz

Enerji sistemlerinin sadece termodinamik performans açısından değerlendirilmesi, sistemin toplam sürdürülebilirliğini ve ekonomik verimliliğini tam anlamıyla ortaya koymak için yeterli değildir. Bu nedenle, ekserji temelli ekonomik analizler (eksergoekonomik analiz), enerji sistemlerinin hem enerji kalitesi hem de maliyet etkinliği açısından değerlendirilmesine olanak sağlar. Eksergoekonomik analiz, termodinamik ve ekonomik ilkeleri birleştirerek her bir sistem bileşeninde üretilen ve tüketilen ekserji miktarlarını ekonomik bir perspektiften incelemeyi hedefler. Bu yaklaşımda, sistemin her bir bileşeni için hem termodinamik verimsizlikler (ekserji yıkımları) hem de bu verimsizliklerin neden olduğu ekonomik maliyetler ayrı ayrı hesaplanır. Bu analiz, sistem bileşenlerinin optimizasyonuna, daha düşük maliyetle daha yüksek verim elde edilmesine katkı sağlar [68].

- **Enerji Geri Ödeme Süresi**

Güneş hücreleri temiz ve sürdürülebilir elektrik üretmelerine rağmen, üretim süreçlerinde diğer endüstriyel faaliyetlerde olduğu gibi yüksek miktarda enerji tüketilmekte ve çevre kirlenmektedir. Bu nedenle, güneş enerjisi teknolojilerinin fosil yakıtı dayalı geleneksel enerji

üretim sistemleriyle rekabet edebilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir: Öncelikle, sistemin ömrü boyunca sağladığı toplam enerji, üretimi, taşınması, montajı, işletilmesi ve nihai bertarafı sırasında tüketilen toplam enerjiyi, yani sisteme gömülü enerjiyi, önemli ölçüde aşmalıdır. İkinci olarak, sistemin üretim, nakliye ve işletim aşamalarındaki net karbon salımı, geleneksel fosil yakıtlı elektrik üretim sistemlerinden çok daha düşük olmalıdır [69].

Ekserji dikkate alınarak hesaplanan enerji geri ödeme süresi (EGÖS), sistemin üretimi sırasında harcanan gömülü enerjiyi geri kazanması için gereken süreyi ifade eder. Bu süre, Denklem 3.21 kullanılarak hesaplanabilir [69]:

$$EGÖS_{ex} = \frac{E_g}{E_{x,çıkan}} \quad (3.21)$$

Burada E_g , sistemin gömülü enerjisini; $E_{x,çıkan}$ ise sistemin yıllık toplam faydalı enerji (ekserji) çıktısını temsil etmektedir. EGÖS, sistemin başlangıçtaki enerji yatırımlarını ekserji üretimi yoluyla ne kadar sürede telafi ettiğini gösterir. Daha düşük EGÖS değerleri, sistemin yatırım geri dönüş süresinin kısa olduğunu ve genel kârlılığın daha yüksek olduğunu ifade eder.

- **Enerji Üretim Faktörü**

Ekserjiye dayalı enerji üretim faktörü (EÜF), sistemlerinin genel performansına dair önemli bir gösterge sunar. Yıllık EÜF değeri, EGÖS'nin matematiksel tersidir. Bu durum, yıllık bazda sistemin başlangıç yatırımlarını hangi oranda geri kazandığını gösteren bir ölçüt sunar. Başka bir deyişle, EÜF, enerji yatırımlarının geri dönüş oranını temsil eder ve sistemlerin yapılandırılmalarının değerlendirilmesinde ekonomik bir perspektif sağlar. EÜF Denklem 3.22 ile hesaplanır:

$$EÜF_{ex,yıllık} = \frac{E_{x,çıkan}}{E_g} \times 100\% \quad (3.22)$$

Bununla birlikte, sistemin tahmini ömrü olan $L = 20$ yıl dikkate alınarak EÜF Denklem 3.23'te ki şekilde hesaplanabilir:

$$EÜF_{yaşamboyu} = \frac{E_{x,çıkan}}{E_g} L \times 100\% \quad (3.23)$$

- **Yaşam Döngüsü Dönüşüm Verimi**

Sistemin hizmet ömrü boyunca, toplam kullanılabilir enerji çıktısının güneşten alınan toplam enerjiye oranı, ekserji temelli yaşam döngüsü dönüşüm verimi (YDDV) olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle, bu verimlilik, sistemin yakalanan güneş ışığını ne ölçüde faydalı bir şekilde dönüştürdüğünü gösterir. Bu ömür boyu dönüşüm verimi, Denklem 3.24 ile hesaplanır [69]:

$$YDDV_{ex} = \frac{E_{x,çıkan} \times L - E_g}{E_{x,güneş} \times L} \quad (3.24)$$

- **Elektrik Üretim Maliyeti Analizi**

PV hücre teknolojilerinin temel hedeflerinden biri sürdürülebilirlik, karbon emisyonlarını azaltma ve temiz elektrik üretiminin yanı sıra, birim başına elektrik üretim maliyetini düşürmektir. Bu amaca ulaşma yolunda, aşağıdaki hesaplamalar doğrultusunda yapılan detaylı maliyet analizleri

önemli bilgiler sağlamaktadır. PV sisteminin yıllık maliyeti Denklem 3.25'te ki bağıntı ile hesaplanır [70]:

$$C_{yillik} = SGKF \times C_s \quad (3.25)$$

Burada SGKF, sermaye geri kazanım faktörünü, C_s ise sistemin sabit yatırım maliyetini ifade eder ve bu değerler Tablo 3.6'da verilmiştir. Sistem için PV panel, FDM, sirkülasyon pompası, ısı yalıtımı, yerden ısıtma gibi bileşenlerin tamamı hesaba katılmış ve toplam sistem maliyeti 5975 \$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.6. Sistem bileşenleri maliyet tablosu

Bileşen	Birim fiyat(\$)	Miktar	Toplam fiyat(\$)
Yarı saydam PV panel	118	7 adet	826
PV/T panel (depo, yalıtım ve bakır borular dahil)	215	2 adet	430
Huawei akıllı elektrik sistemi (batarya+inverter dahil)	2120	1 adet	2120
Yerden ısıtma sistemi (2 adet pompa dahil)	1370	1 adet	1370
Bina dış duvar ve çatı yalıtım gideri	512	1 adet	512
Dış cephe kaplama(façade)	717	1 adet	717
Toplam			5975

Sermaye geri kazanım faktörü SGKF Denklem 3.26'da ki bağıntı ile hesaplanır:

$$SGKF = \frac{i(1+n)^n}{(1+n)^n - 1} \quad (3.26)$$

Burada i, faiz oranını; n, PV sisteminin ömrünü (20 yıl) göstermektedir. PV ve PV/T sisteminin yıllık bazda hurda değeri (HV) Denklem 3.27 ile ifade edilir:

$$HV = HF \times H \quad (3.27)$$

Burada HF, hurda değeri; H ise hurda fonu faktörüdür. HF Denklem 3.28 ile hesaplanır [71,72]:

$$HF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (3.28)$$

Sistemin yıl sonu eşdeğer yıllık toplam maliyeti, bugünkü değer yöntemi kullanılarak şu şekilde hesaplanır [73]:

$$YEM = (SGKF \times C_s) - (HV \times HF) \quad (3.29)$$

Son olarak, sistem için elektrik ve ısı enerjisi üretiminin toplam maliyeti (\$/kWh) ve finansal geri ödeme süreleri aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir:

$$E_c = \frac{YEM}{E_{çıkan}} \quad (3.30)$$

$$FGÖ = \frac{C_s}{E_{elektrik} + (m_{CO_2} \times P_{CO_2})} \quad (3.31)$$

Burada C_s sistemin ilk yatırım maliyeti, $E_{elektrik}$ yıl boyunca üretilen elektrik miktarının USD cinsinden değerini, m_{CO_2} yıllık önlenen CO₂ kütlesini ve P_{CO_2} ise önlene CO₂ birim fiyatını göstermektedir.

3.4.4. Çevresel Analiz

Çevresel analiz, Dünya atmosferinde bulunan ve ısıyı tutan sera gazlarının (GHG'ler) nicel olarak belirlenmesinde kullanılır. Bu bağlamda, çevresel analiz; fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan ve atmosferik kirleticilerin önemli bir bölümünü oluşturan GHG emisyonlarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Küresel ölçekte, enerji kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonları 2019 yılında 33 gigaton ile rekor seviyeye ulaşmış ve bu durum dünya genelinde eşi görülmemiş bir "küresel ısınma" olgusunu tetiklemiştir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin enerjiye bağlı CO₂ emisyonları 564.4 milyon tona ulaşmış ve bu değerle ülke küresel sıralamada 15. sırada yer almıştır. Toplam sera gazı emisyonlarında 2021 yılında CO₂ eşdeğer olarak en büyük payı yüzde 71,3 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken bunu sırasıyla yüzde 13,3 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı yüzde 12,8 ile tarım ve yüzde 2,6 ile atık sektörü takip etmiştir [74].

Yukarıda detaylandırıldığı üzere, geleneksel elektrik üretim yöntemlerinden kaynaklanan yüksek karbon salınımları dikkate alındığında, temiz ve yenilenebilir enerji çözümlerine duyulan ihtiyaç oldukça kritiktir. PVT sistemleri, yalnızca binalara elektrik ve sıcak su sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda çevre dostu bir enerji çözümü sunar. Bu sistemler, enerji üretiminde gerekli olan malzeme ve maliyetleri azaltırken, doğal kaynakların korunmasına da katkı sağlar. Geleneksel elektrik üretim yöntemlerinden kaynaklanan zararlı karbon emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliğini doğrudan etkileyen temel çevresel faktörlerdendir. Amerikan Çevre Koruma Ajansı tarafından bildirildiği üzere, 2020 yılı itibarıyla doğal gaz santrallerinden kaynaklanan ortalama CO₂ emisyonu 0.499 kg CO₂/kWh, kömür santrallerinden kaynaklanan emisyon ise 1.012 kg CO₂/kWh olarak ölçülmüştür [73]. Binaya enyegre yarı saydam PV vr PV/T'ler için karbon dioksit salımındaki aylık azalma ton cinsinden, aşağıdaki Denklem 3.32 kullanılarak hesaplanabilir [75]:

$$\varphi_{CO_2} = \frac{\psi_{CO_2} \times Ex_{çıkan} \times N}{1000} \quad (3.32)$$

Burada:

- φ_{CO_2} : kömür veya doğalgaz ile çalışan üretimden kaynaklanan karbon dioksit emisyonlarını (ton/ay) ifade eder,
- ψ_{CO_2} : ayda ton cinsinden CO₂ azaltımını ifade eder (ton CO₂/ay),
- $Ex_{çıkan}$: PV ve PV/T sisteminin toplam ekserji çıktısıdır (kWh),
- N : ay içerisindeki güneşli gün sayısını temsil eder.

Ayrıca, karbon fiyatlandırması ve karbon dioksit emisyonları, kömür kullanılarak elektrik üretiminin çevresel maliyetini hesaplamak için kullanılabilir [75]:

$$C_{CO_2} = \varphi_{CO_2} \times X_{CO_2} \quad (3.33)$$

Denklem 3.33'te:

- C_{CO_2} : PVT sistemi için aylık karbon oksit çevresel maliyetini (\$/yıl) ifade eder,
- X_{CO_2} : CO₂ emisyonu başına ton başına karbon fiyatını gösterir.

Dünya Bankası'na göre, karbon fiyatlarının 2030 yılına kadar 100 \$/ton seviyelerine ulaşması gerekmektedir [76]; bu durum, yeşil, sürdürülebilir enerjiye geçişi teşvik etmek ve küresel ısınmayı 2 °C ile sınırlamak amacıyla önerilmektedir.

3.5. Belirsizlik Analizi

Akademik araştırmalar genel anlamda iki ana kategoriye ayrılabilir: deneysel ve teorik çalışmalar. Teorik yaklaşımlar ise kendi içerisinde analitik ve nümerik yöntemler olmak üzere iki alt başlıkta incelenmektedir. Analitik ve nümerik analizler, problemlerin matematiksel temelli çözümlerine dayanmaktadır. Buna karşılık simülasyon tabanlı çalışmalar, gerçek hayatta karşılaşılan bir sistemin ya da sürecin işleyişini belirli kabuller altında sayısal olarak modellemeyi amaçlar. Ancak teorik yöntemlerle elde edilen sonuçların bilimsel geçerliliği ve güvenilirliği, deneysel verilerle desteklenmediği sürece sınırlı kalabilir. Bu nedenle, teorik çalışmaların deneysel bulgularla doğrulanması, elde edilen sonuçların anlamlı ve kabul edilebilir hale gelmesini sağlar. Öte yandan, deneysel çalışmaların bilimsel geçerliliği, ölçüm yöntemi ile kullanılan cihazların doğruluğu kadar, ölçüm sürecinin dikkatli ve kontrollü şekilde yürütülmesine de bağlıdır. Deneysel süreçlerde oluşabilecek belirsizlikler, çalışmanın güvenilirliğini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Bu belirsizlikler iki ana kaynaktan türer: biri deney düzeneği ve ölçüm cihazlarının yapısal özelliklerinden kaynaklanan sistematik hatalar, diğeri ise deneyin uygulanmasında operatöre bağlı olarak ortaya çıkan kullanıcı kaynaklı hatalardır. Herhangi bir deneysel düzenek yardımıyla hesaplanması hedeflenen fiziksel büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken $x_1, x_2, \dots, x_n$ olmak üzere, ilgili sistem matematiksel olarak $R=R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ şeklinde ifade edilebilir. Her bir bağımsız değişkene ait sabit hata ya da belirsizlik miktarları $W_1, W_2, \dots, W_n$ ile gösterildiğinde, R büyüklüğünün toplam belirsizliği W_R Denklem 3.34'te ki şekilde hesaplanır [77].

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.34)$$

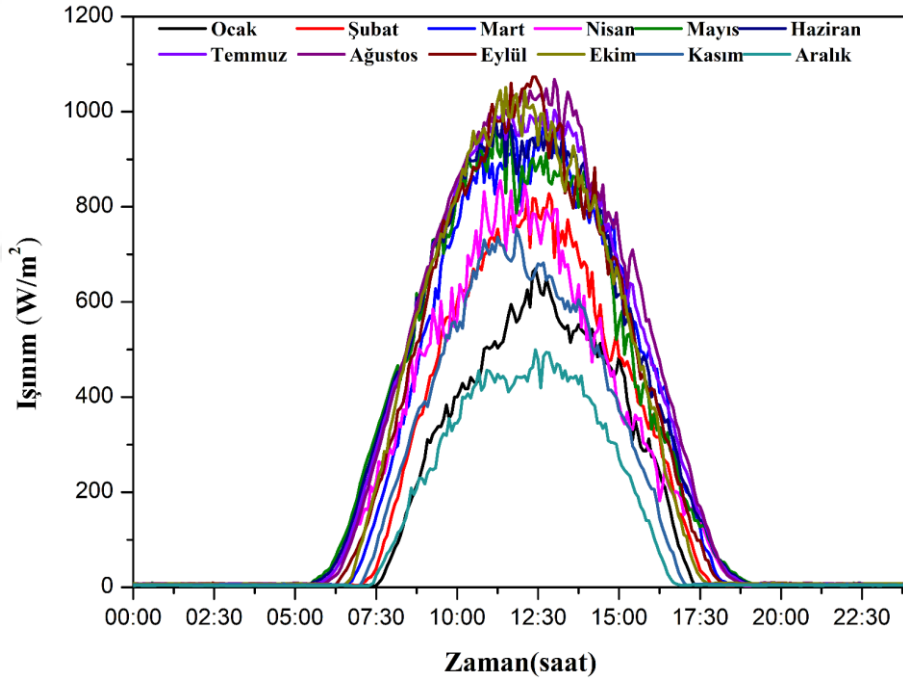
Belirsizlik analizi yapılmasında en önemli avantajı, deneylerde en büyük hataya neden olan değişkenin tespit edilmesidir. Tezde yapılan deneyler için belirsizlik analizi yöntemi kullanılarak hata analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin hata analizinde kullanılacak olan belirsizlik

değerleri, üretici firmaları tarafından bildirilen hata değerlerinden ve deneysel tecrübelerden elde edilmiştir. Belirsizlik analizi sonuçlarından elde edilen veriler bulgular bölümünde anlatılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

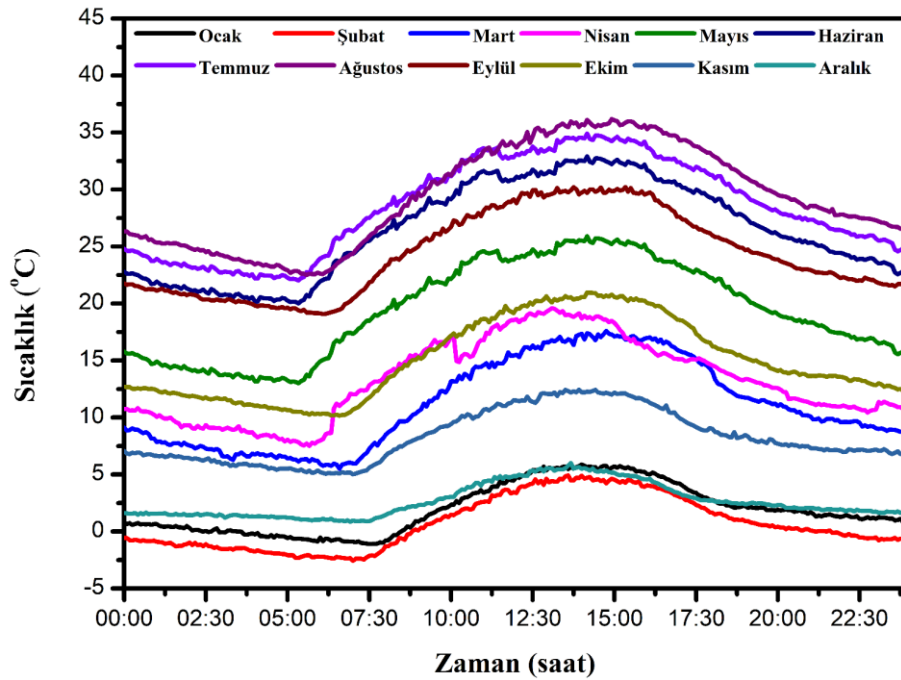
Bu bölümde, çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Sistem bileşenlerinin mevsimsel ve zamana bağlı performansları; sıcaklık dağılımları, ısıtım yoğunlukları ve enerji üretim değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Farklı cephe yönelimlerine sahip yarı saydam PV panellerin yüzey sıcaklıkları ve panel arkasındaki ara hava boşluğunda oluşan sıcaklık değişimleri, dış ortam koşullarıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiş; bu yapıların pasif ısı kazancı potansiyelleri ortaya konmuştur. Ayrıca, sistemin ısı çıkışlarının bina içinde değerlendirilmesine yönelik olarak, FDM destekli yerden ısıtma uygulamasına dair sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm bulgular, PV destekli bütünleşik enerji sistemlerinin hem elektriksel üretim hem de ısıl konfor bağlamında sürdürülebilir yapılar için önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen ısıtım miktarı

Şekil 4.1’de Elazığ’daki deney setinin bulunduğu konumda yıl boyunca elde edilen yatay düzlem küresel güneş ısıtım verilerinin saat-bazlı aylık ortalamalarını sunmaktadır. Eğriler, kış mevsiminde (Aralık-Ocak) ısıtımın yerel saatle yaklaşık 08.00’de anlamlı seviyelere yükseldiğini, 16.30 sonrasında yeniden sıfıra indiğini ve böylece ortalama 8 saat 30 dakikalık sınırlı bir fotoperiyot oluşturduğunu göstermektedir. Şubat ve Mart aylarında gün doğumu 07.30–07.00 aralığına, gün batımı ise 17.30–17.00 aralığına kayarak aydınlanma süresini 9–10 saat bandına

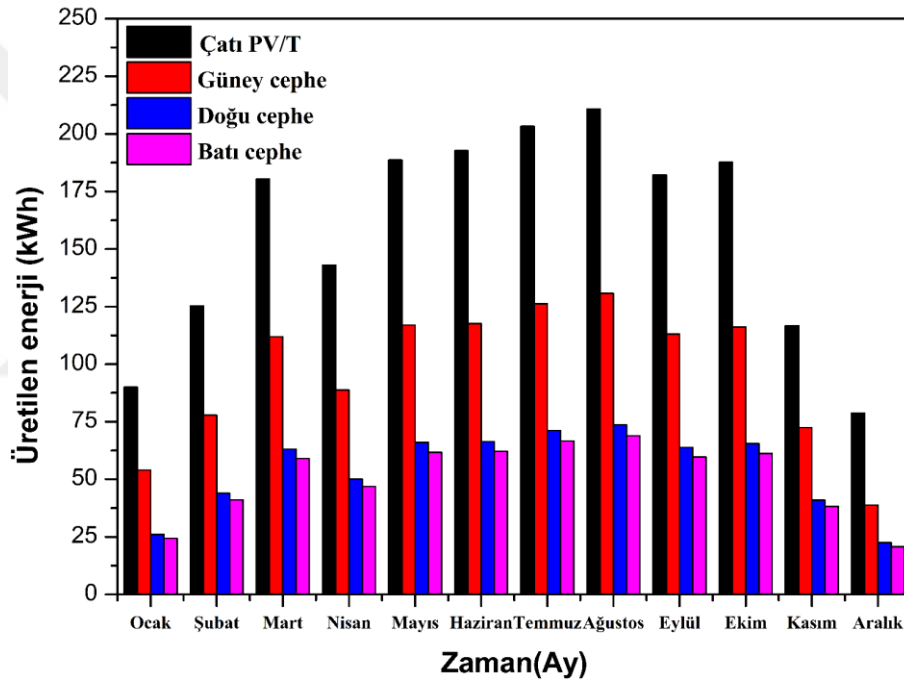
taşımaktadır. İlkbaharın ilerlemesiyle Nisan'da 06.30–18.00, Mayıs'ta 05.45–19.00 aralıklarına yayılan ışınlam profili 11,5–13 saat arasında değişen bir gün uzunluğu sağlamaktadır. Yaz ortasında (Haziran-Temmuz) başlangıç 05.30'a, bitiş 19.30'a uzanarak yılın en büyük fotoperiyodu olan 14 saat'i oluşturmakta; Ağustos'ta sürenin 05.45–19.00 aralığına kısılmasıyla 13 saat düzeyine gerilemektedir. Sonbaharda Eylül 06.15–18.45 (12,5 saat), Ekim 07.00–17.30 (10,5 saat) ve Kasım 07.15–16.45 (9,5 saat) pencereleri izlenmekte, Aralık döngüsüyle birlikte yeniden minimuma dönülmektedir. Aylık ortalama tepe şiddeti incelendiğinde, Temmuz'da 1100 W/ m², Haziran'da 1050 W/ m², Mayıs ve Ağustos'ta 980–1 000 W/ m², Nisan ve Eylül'de 920 W/ m², Mart ve Ekim'de 820–850 W/ m², Şubat ve Kasım'da 700–750 W/ m², Ocak ve Aralık'ta ise 600–650 W/ m² aralığında doruk değerler kaydedilmiştir. En yüksek ışınlam noktalarının tüm aylarda yerel saatle 12.15 ± 0.15 bandında kümeleniği, dolayısıyla gerçek güneş öğleninin yıl boyunca ±15 dakikadan daha dar bir sapma gösterdiği belirlenmiştir. Kış-yaz tepe değerleri arasında yaklaşık %45–50'lik bir fark ortaya çıkmıştır. Toplam fotoperiyot uzunluğunun mevsimsel genliğı ise ≈ 5 saat 30 dakika olup, bu durum Şekil 4.1'in gün içi eğimlerinde yaz aylarında yayvan, kış aylarında ise daha dik bir profil şeklinde kendini göstermektedir. Şekil 4.2'de, yıl boyunca kaydedilen dış ortam sıcaklığı verilerinden elde edilen saatlik aylık ortalamalar sunulmaktadır.



Şekil 4.2. Aylara göre zamana bağlı ölçülen dış ortam sıcaklığı

Eğriler, sıcaklığın tüm yıl boyunca en düşük değerine gün doğumundan hemen önceki 05.30–06.30 bandında, en yüksek değerine ise gerçek güneş öğlenine karşılık gelen 12.30–13.30 bandında ulaştığını göstermektedir; bu durum zaman serisinin hem sensör kalibrasyonu hem de

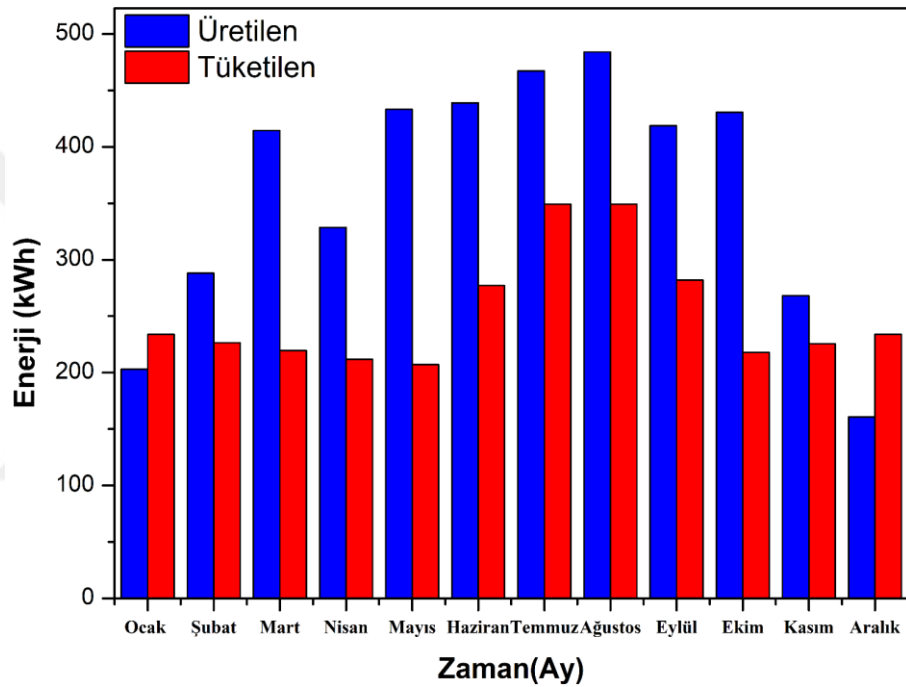
zaman damgası açısından tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Kış aylarında Ocak ve Aralık eğrileri gece saatlerinde -1°C civarında seyrederken öğle saatlerinde $5-6^{\circ}\text{C}$ düzeyine çıkmakta; Şubat eğrisi 0°C ile 7°C , Mart eğrisi 4°C ile 12°C aralığında günlük bir salınım sergilemektedir. İlkbaharda Nisan eğrisi gün doğumunda 7°C 'den başlayıp öğleye doğru 18°C 'ye, Mayıs eğrisi 12°C 'den 24°C 'ye yükselerek mevsimsel ısınmanın düzenli artışını yansıtmaktadır. Yaz döneminde Haziran eğrisi $17^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$, Temmuz eğrisi $20^{\circ}\text{C}-34^{\circ}\text{C}$, Ağustos eğrisi $18^{\circ}\text{C}-33^{\circ}\text{C}$ aralığında gerçekleşmekte ve Temmuz, yılın en yüksek ortalama tepe sıcaklığına ev sahipliği yapmaktadır. Sonbaharda Eylül eğrisi $13^{\circ}\text{C}-26^{\circ}\text{C}$, Ekim eğrisi $8^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C}$, Kasım eğrisi ise $3^{\circ}\text{C}-12^{\circ}\text{C}$ bandına gerileyerek sıcaklıkların kademeli düşüşünü ortaya koymaktadır. Günlük genlikler yaz ortasında yaklaşık $13-15^{\circ}\text{C}$, kış ortasında ise $6-7^{\circ}\text{C}$ düzeyinde kalmıştır.



Şekil 4.3. Aylara göre PV ve PV/T’de üretilen enerji miktarı

Şekil 4.3’te, binaya entegre edilen farklı yönelimli PV panellerin ve çatıya kurulu PV/T sisteminin aylık elektrik üretim değerleri sunulmaktadır. Yıl genelinde en yüksek üretim çatıdaki PV/T sistemde elde edilmiş olup, Temmuz ayında 203.30 kWh, Haziran’da 192.70 kWh ve Ağustos’ta 210.70 kWh enerji üretilmiştir. Kış aylarında üretim kayda değer ölçüde azalmış; Ocak ayında 90 kWh, Aralık’ta ise sadece 78.70 kWh olarak gerçekleşmiştir. Güney cephede konumlandırılan yarı saydam PV paneller ise yıl boyunca daha dengeli fakat daha düşük seviyede üretim göstermiş; en yüksek üretim Ağustos’ta 130.70 kWh olarak kaydedilmiş, yıl sonundaki en düşük üretim Aralık ayında 38.80 kWh’ye kadar düşmüştür. Doğu ve batı cepheler ise sistemin yönetime bağlı zayıf üretim alanları olarak öne çıkmıştır. Doğu cephede Ağustos ayında maksimum

73.70 kWh elde edilirken, Aralık ayında bu değer yalnızca 22.50 kWh'ye düşmüştür. Batı cephede de benzer şekilde, Ağustos ayında 68.91 kWh üretim sağlanmış, Aralık ayında ise sadece 20.71 kWh elde edilebilmiştir. Yıllık bazda değerlendirildiğinde, çatı PV/T sisteminden toplam 1900 kWh, güney cepheden 1164 kWh, doğu cepheden 653.2 kWh ve batı cepheden 610.417 kWh enerji üretilmiştir. Tüm sistemin toplam yıllık üretimi 4335.81 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, çatı sisteminin yüksek ısınım alması sayesinde en yüksek katkıyı sağladığını, güney cephe panellerinin yıl boyunca istikrarlı çalıştığını ve doğu ile batı cephelerin sınırlı katkı sunduğunu göstermektedir.



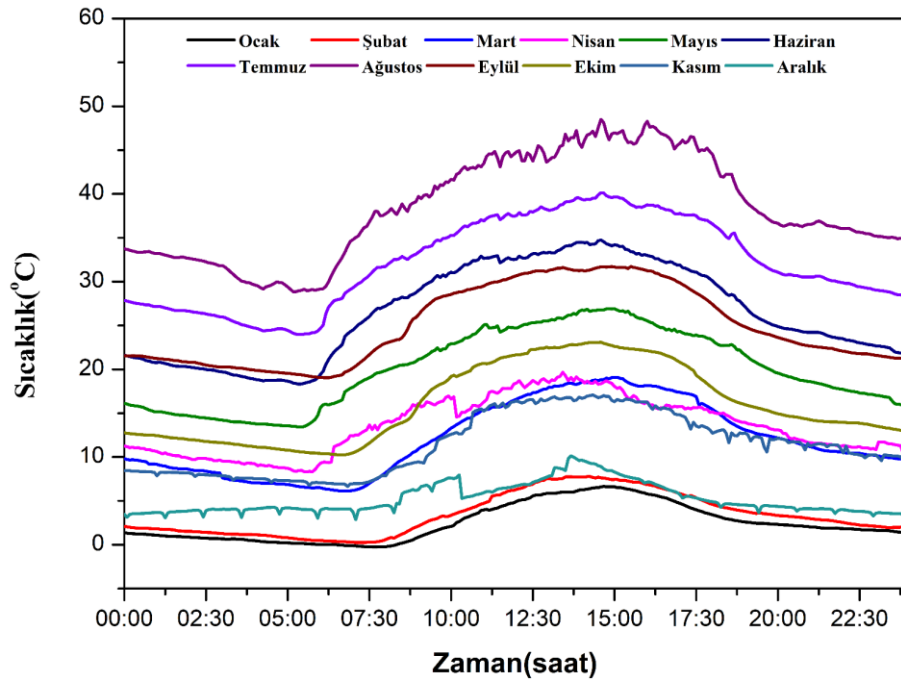
Şekil 4.4. Aylara göre üretilen ve tüketilen enerji miktarının karşılaştırılması

Şekil 4.4'te sistemin bir yıl boyunca PV ve PV/T yüzeyleri aracılığıyla ürettiği elektrik enerjisi ile aynı dönemde bina tarafından tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarlarının aylık bazda karşılaştırması verilmiştir. Elektrik üretim değerleri, güneş ısınım koşullarına bağlı olarak panel yüzeylerinde elde edilen elektriksel çıktılardan oluşmakta olup, tüketim verileri ise binanın iç yüklerine dayalı gerçek zamanlı enerji çekiş miktarlarını temsil etmektedir.

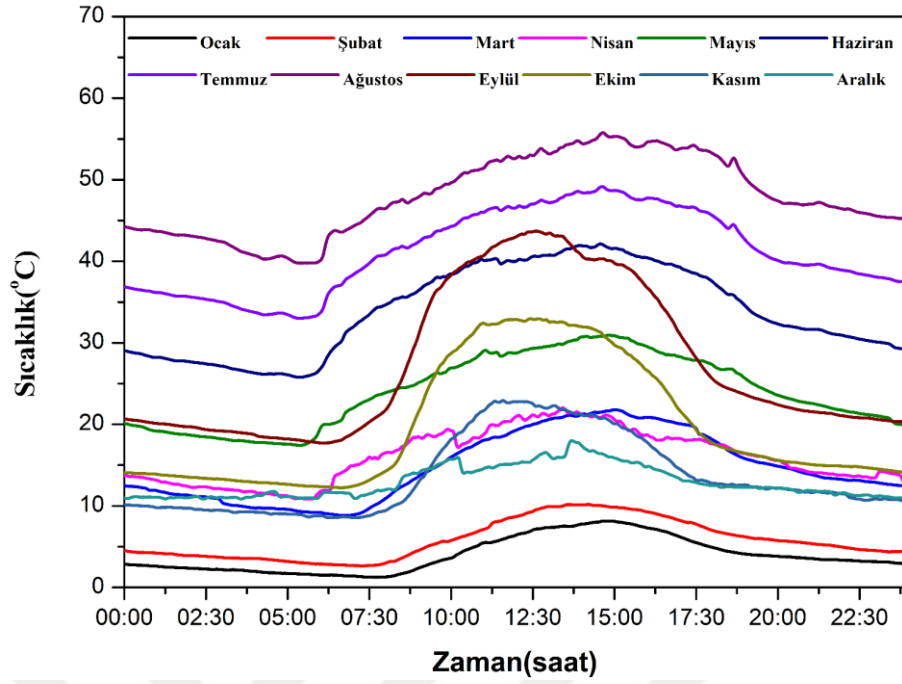
Ocak ayında, düşük güneş ısınımı ve kısa gündüz süresi nedeniyle 203,00 kWh üretim gerçekleşmiş, buna karşılık 233,80 kWh tüketim ölçülmüştür. Şubat ayında, ısınım seviyesindeki kısmi artışla birlikte üretim 288,05 kWh'ye yükselmiş, tüketim ise 226,50 kWh olarak kaydedilmiştir. Mart ayında, hem günlük ortalama ısınım miktarının hem de panel sıcaklıklarının daha elverişli hale gelmesiyle üretim değeri 414,40 kWh'ye ulaşmıştır; bu ayda tüketim 219,60 kWh düzeyindedir. Nisan ve Mayıs aylarında ısınım değerlerinin daha da artması, özellikle panel

yüzey sıcaklıklarının nominal verimliliğe yakın çalışmasına olanak sağlamış; bu nedenle üretimler sırasıyla 328,64 kWh ve 433,31 kWh olarak kaydedilmiştir. Bu dönemde tüketim 211,80 kWh ve 207,00 kWh düzeyinde kalmıştır. Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları boyunca güneş ışınımının yıllık maksimum seviyelere ulaşması ile birlikte, sistem üretim açısından en yüksek performans seviyelerine çıkmıştır. Haziran’da 438,88 kWh, Temmuz’da 467,27 kWh ve Ağustos’ta 484,01 kWh elektrik üretimi sağlanmıştır. Aynı dönemde tüketimler sırasıyla 277,20 kWh, 349,20 kWh ve 349,20 kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu aylar, sistemin ışınlm yoğunluğundan maksimum düzeyde faydalandığı ve net enerji fazlası oluşturduğu dönemlerdir. Eylül ayında 418,75 kWh üretim ve 282,00 kWh tüketim, Ekim ayında ise 430,54 kWh üretim ve 217,80 kWh tüketim gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar, sistemin geçiş mevsimlerinde de dengeli ve yeterli bir üretim performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Kasım ve Aralık aylarında ise gün uzunluğunun kısalması, yatay yüzeye düşen ışınlm miktarının ciddi şekilde azalması ve panel eğimlerinin ışınlma paralel açıdan uzaklaşması nedeniyle üretim değerleri sırasıyla 268,24 kWh ve 160,71 kWh’ye düşmüştür. Buna karşılık tüketim değerleri 225,60 kWh ve 233,80 kWh olarak ölçülmüş, Aralık ayında negatif net enerji dengesi oluşmuştur. Toplamda sistem yıllık olarak 4335,81 kWh elektrik enerjisi üretmiş ve bina aynı dönemde 3033,50 kWh enerji tüketmiştir. Bu üretim-tüketim dengesi sonucunda yıllık elektriksel öz yeterlilik oranı %142,93 olarak belirlenmiştir. Bu oran, sistemin yıl boyunca yalnızca bina ihtiyacını karşılamakla kalmayıp aynı zamanda önemli miktarda enerji fazlası oluşturduğunu göstermektedir.

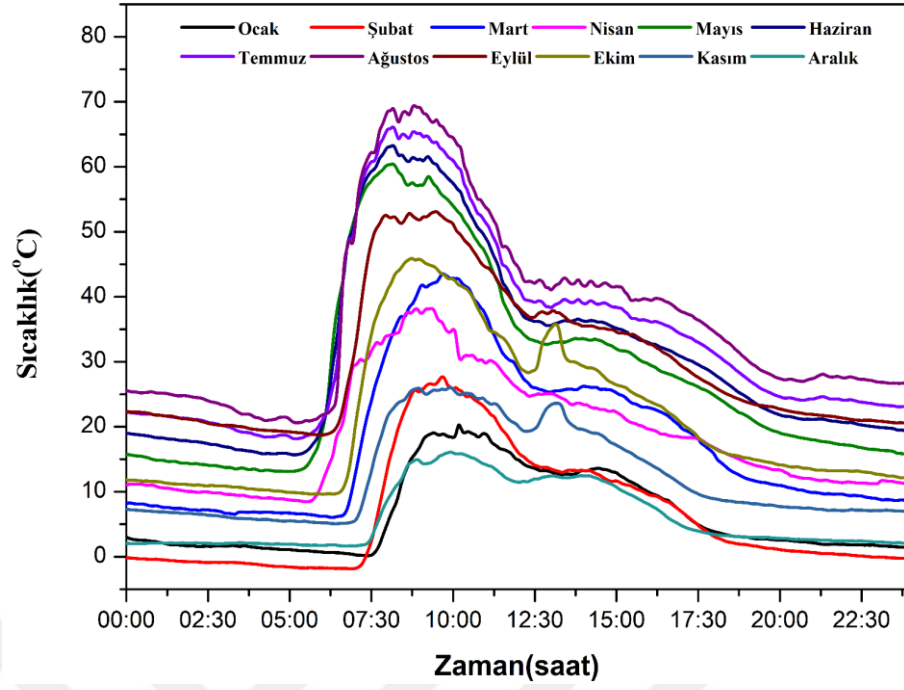


Şekil 4.5. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen PV/T’ye giren su sıcaklığı

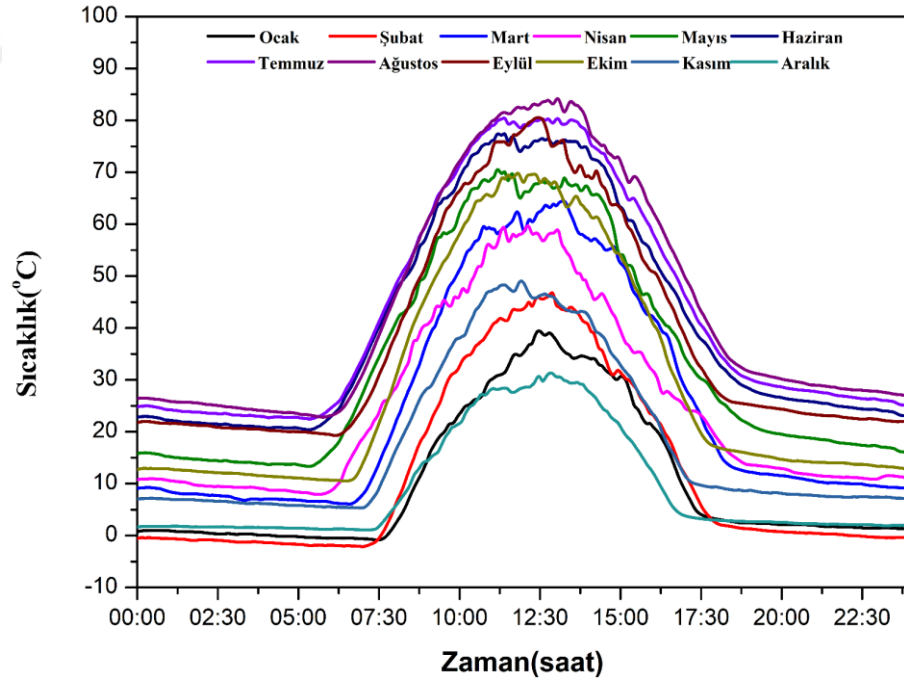


Şekil 4.6. Aylara göre zamana bağlı olarak ölçülen PV/T'den çıkan su sıcaklığı

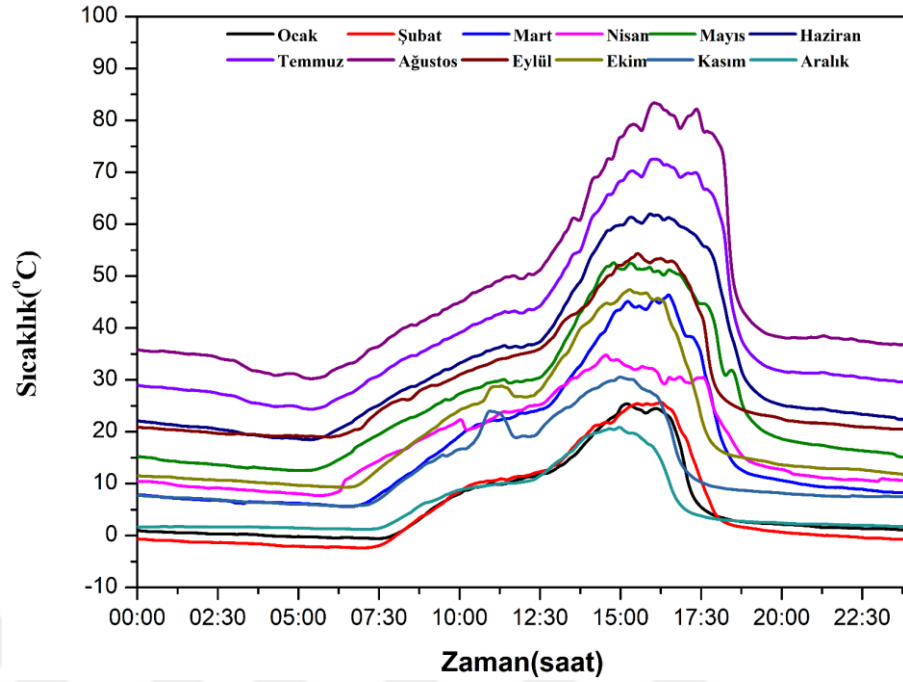
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6, PV/T sistemine giren ve çıkan suyun saatlik sıcaklık dağılımını aylık olarak göstermektedir. Bu grafikler, sistemin ısı transfer davranışını ve mevsimsel verimliliğini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. PV/T'ye giren su sıcaklığı, doğrudan ortam sıcaklığına ve depolama tankının termal davranışına bağlı olarak değişmektedir. Kış aylarında (Ocak, Şubat) giriş suyu sıcaklığı gece saatlerinde 0 °C'ye kadar düşerken, yaz aylarında (Haziran, Temmuz, Ağustos) 25–30 °C seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu değerler, sistemin giriş koşullarını ve ısıtma yükü başlangıç sıcaklığını belirlemektedir. Şekil 4.6'da gösterilen çıkan su sıcaklıkları, PV yüzeyinin güneş ışımasını emerek ısınması ve bu ısının panel arkasındaki bakır borularla suya aktarılması sonucu elde edilmektedir. Özellikle yaz aylarında, sistemden çıkan suyun sıcaklığı öğle saatlerinde 55–60 °C'ye kadar ulaşmıştır. Örneğin, Temmuz ayı saat 13:00 civarında 58–59 °C, Ağustos'ta benzer saatlerde 57–58 °C çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu değerler, PV/T sistemin yaz aylarında sadece elektrik değil, yüksek ısıl enerji de sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Kış aylarında ise çıkış sıcaklıkları düşük seviyelerde kalmıştır. Ocak ayında gündüz en yüksek çıkış sıcaklığı 10–15 °C arasında değişirken, gece saatlerinde bu sıcaklıklar 0 °C'ye kadar gerilemiştir. Bu durum, düşük güneş ışıması ve ortam sıcaklığının sistem üzerindeki sınırlayıcı etkisini göstermektedir. Giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki fark (ΔT), sistemin ısıl verimini yansıtan temel bir göstergedir. Temmuz ve Ağustos aylarında bu fark öğle saatlerinde 25–30 °C'yi aşarken, kış aylarında (Ocak, Şubat) bu fark 5–10 °C ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.7. Aylara göre zamana bağlı doğu cephede bulunan yarı saydam PV'lerin sıcaklığı



Şekil 4.8. Aylara göre zamana bağlı güney cephede bulunan yarı saydam PV'lerin sıcaklığı



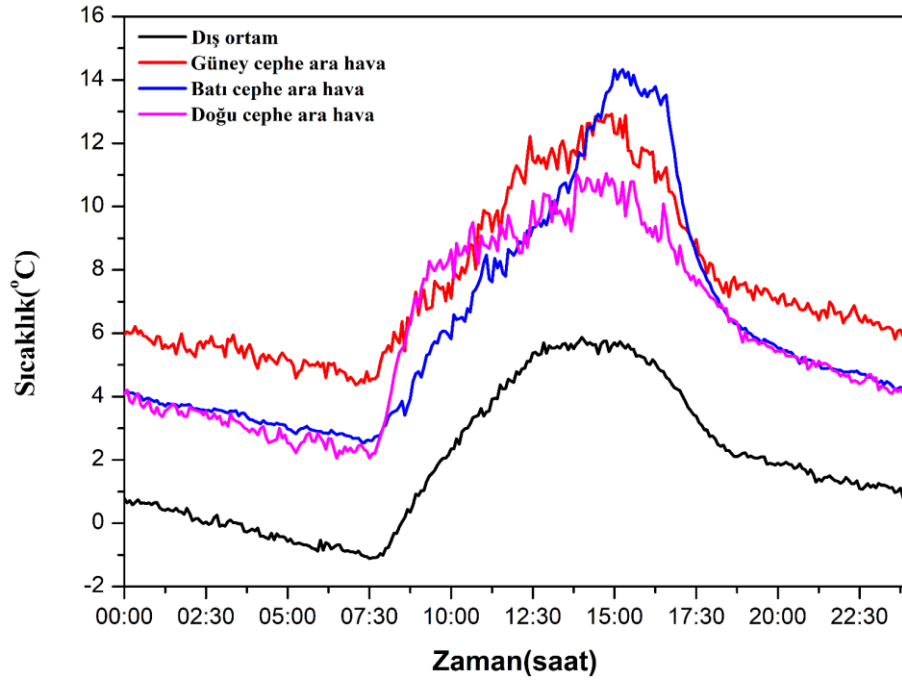
Şekil 4.9. Aylara göre zamana bağlı batı cephede bulunan yarı saydam PV'lerin sıcaklığı

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, sırasıyla doğu, güney ve batı cephelerde yer alan yarı saydam PV panellerin saatlik sıcaklık değişimlerini aylık bazda göstermektedir. Bu grafikler, yönelimin panel yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini analiz etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Doğru cephesine ait veriler, panel sıcaklıklarının sabah erken saatlerde hızla yükseldiğini göstermektedir. Özellikle yaz aylarında, güneşin doğuşuyla birlikte 07:00–09:00 saatleri arasında sıcaklıklar 60–70 °C'ye kadar çıkmaktadır. Bu erken sıcaklık artışı, doğu cephenin sabah saatlerinde direkt ışıınıma maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu yüzey günün ilerleyen saatlerinde gölgede kaldığı için, sıcaklıklar hızla düşmekte ve gün ortasında sabitlenmektedir.

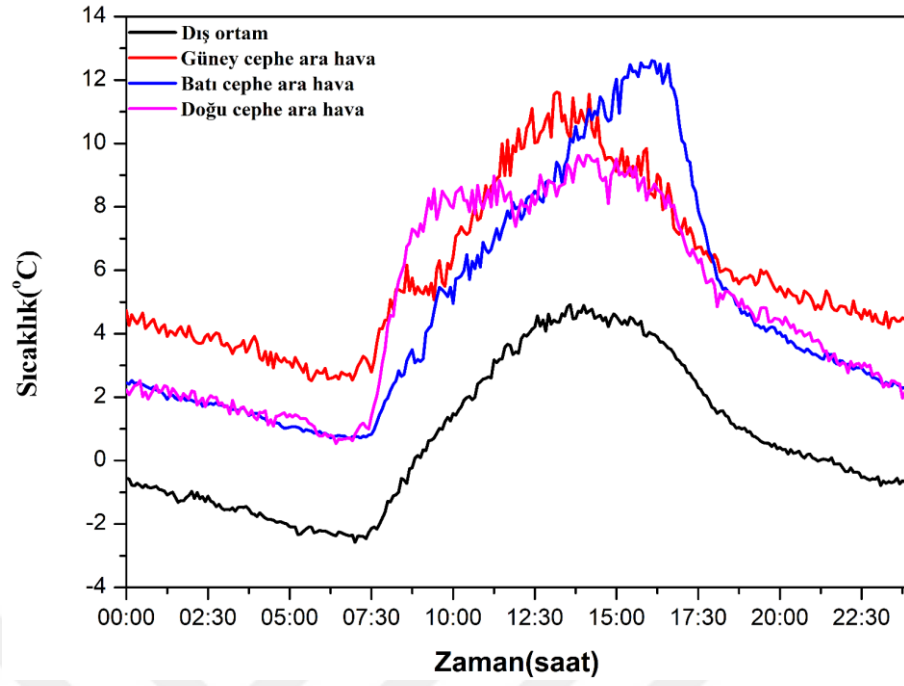
Kış aylarında ise, düşük ışıınım ve kısa güneşlenme süresi nedeniyle doğu cephedeki panellerin sıcaklıkları düşük seyretmiştir. Güney cephesi sistemin en yüksek sıcaklıklara ulaştığı yönelimi temsil etmektedir. Bu cephe, gün boyunca güneşi doğrudan aldığı için sıcaklıklar sabah saatlerinden başlayarak sürekli artmakta ve öğlen saatlerinde zirve yapmaktadır. Temmuz ve Ağustos aylarında saat 12:00–13:00 arasında panel sıcaklıkları 70–80 °C civarlarındadır. Kış aylarında bile güney cephede sıcaklıklar 30–40 °C bandına ulaşabilmiş; bu durum, bu cephenin pasif ısı kazancı açısından yıl boyu avantajlı olduğunu göstermektedir. Batı cephesi ise günün ikinci yarısında ışıınım almaya başladığı için sıcaklık artışı daha geç başlamakta, 14:00 sonrası ani bir yükselişle 70–75 °C civarına ulaşmaktadır. Bu cephe, özellikle yaz aylarında öğleden sonra yoğun ışıınım alarak kısa sürede yüksek sıcaklıklara çıkmaktadır. Ancak sabah saatlerinde sıcaklıklar düşük kalmakta, bu da gün içerisindeki enerji kazanımının daha kısa zaman dilimine sıkışmasına

neden olmaktadır. Kış aylarında batı cephedeki panel sıcaklıkları genellikle 15–25 °C seviyelerinde kalmıştır.

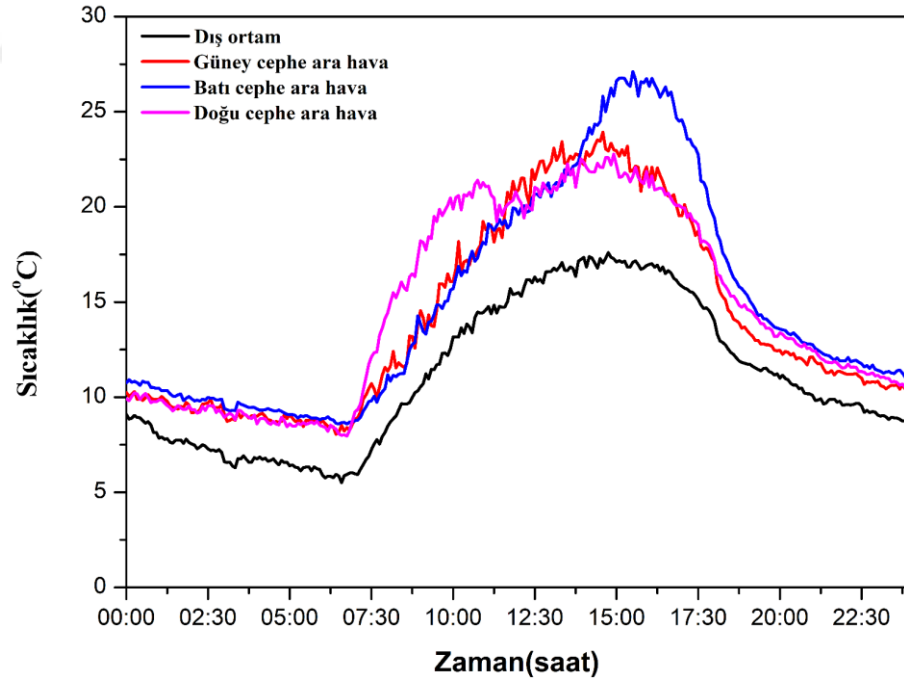
Bu üç cephe birlikte değerlendirildiğinde, güney cephenin hem sıcaklık seviyesi hem de ışıma maruz kalma süresi bakımından en avantajlı yönelim olduğu, doğu cephenin sabah saatlerinde erken fakat kısa süreli yüksek sıcaklıklar oluşturduğu, batı cephenin ise öğleden sonra ani ama geçici bir ısı artışı sağladığı görülmektedir. Panel sıcaklıklarının artışı, PV hücrelerdeki elektriksel verimi azaltıcı bir etkiye sahip olsa da, bu enerji aynı zamanda termal olarak değerlendirilmek üzere sistemin entegre ısı yönetimine katkı sunmaktadır.



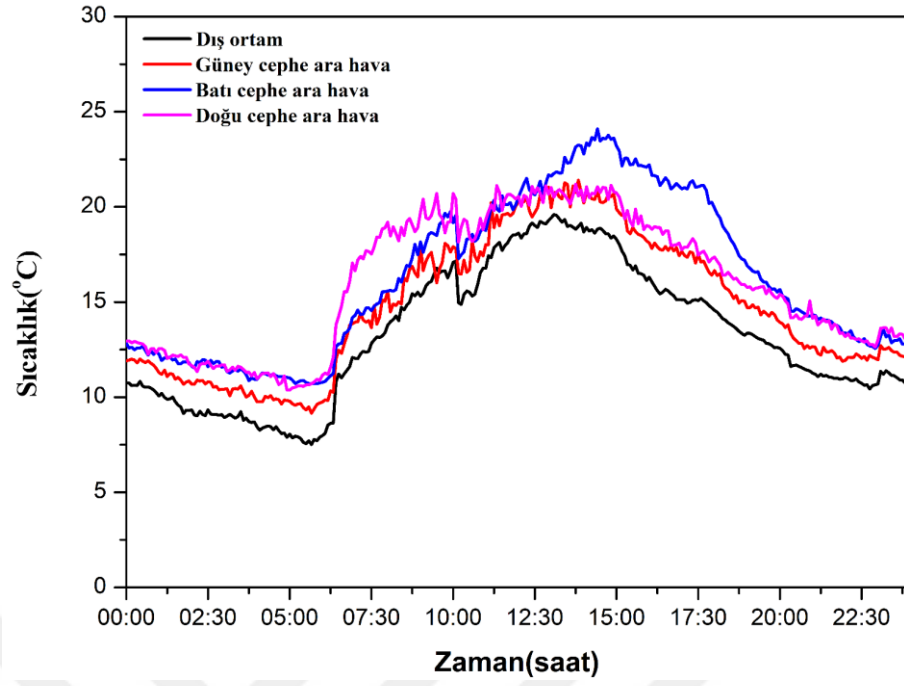
Şekil 4.10. Ocak ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



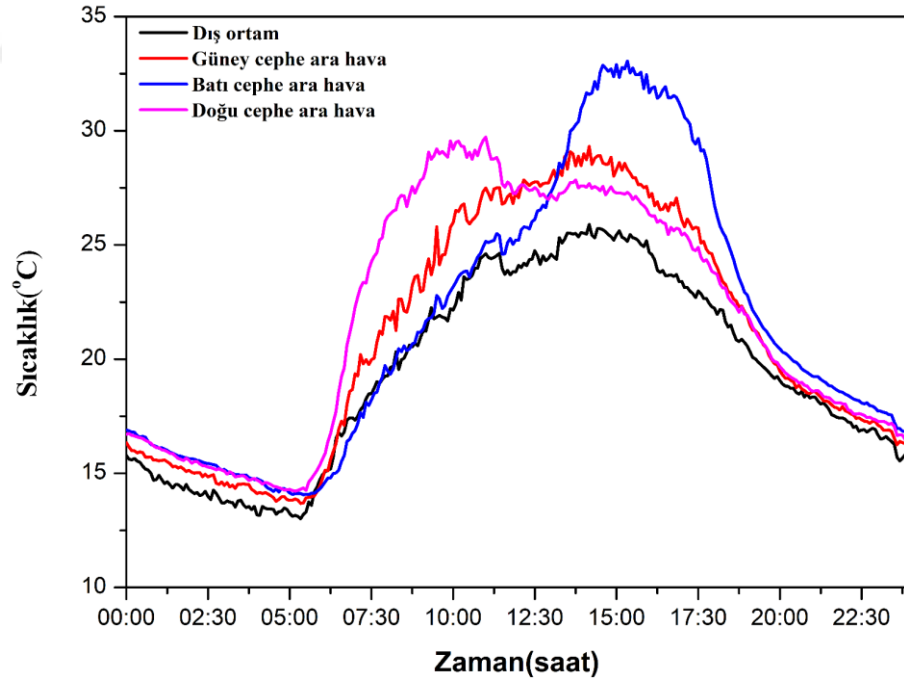
Şekil 4.11. Şubat ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



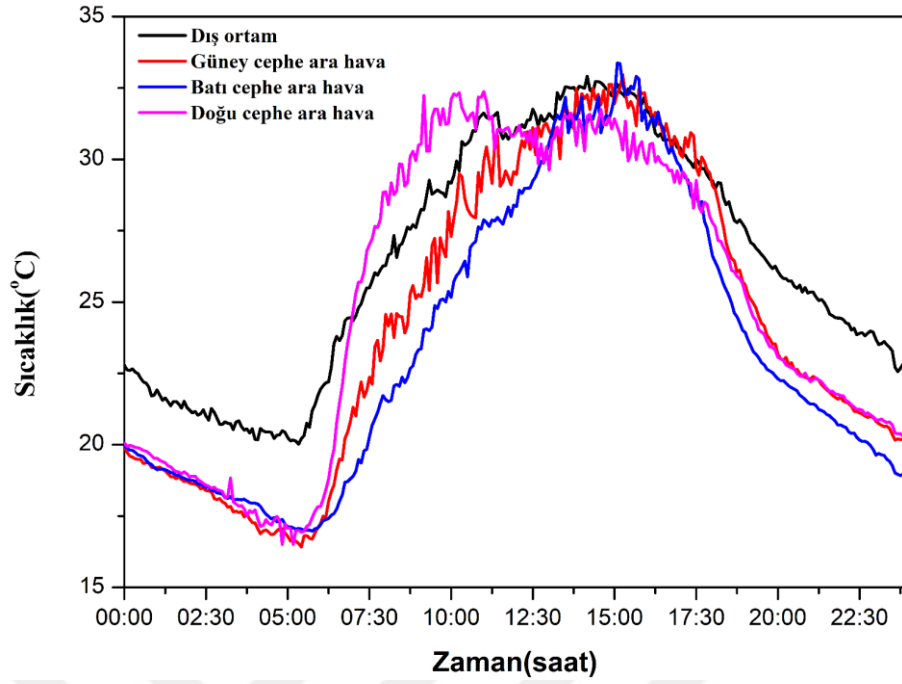
Şekil 4.12. Mart ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



Şekil 4.13. Nisan ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



Şekil 4.14. Mayıs ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması

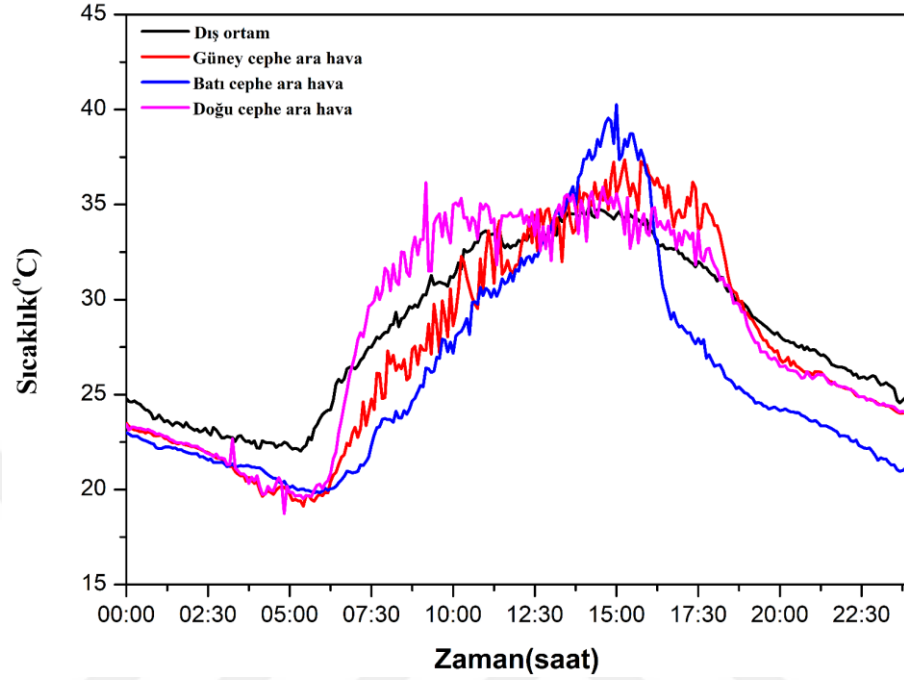


Şekil 4.15. Haziran ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması

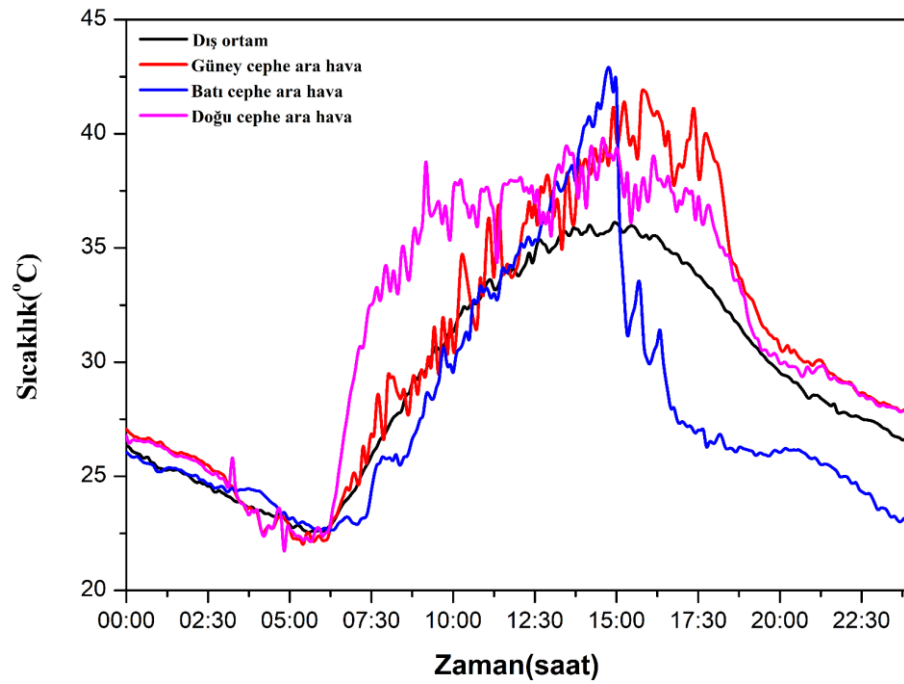
Şekil 4.10'dan Şekil 4.15'e kadar sunulan grafiklerde, Ocak'tan Haziran ayına kadar olan periyotta doğu, güney ve batı cephelerde yer alan yarı saydam PV panellerin arka tarafında oluşan ara hava sıcaklıklarının saatlik değişimleri ile dış ortam sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu grafikler, cephe yöneliminin pasif ısı kazancı üzerindeki etkisini ve bunun bina termal performansı ile enerji verimliliğine katkı düzeyini ortaya koymaktadır. Özellikle kış aylarında (Ocak ve Şubat), dış ortam sıcaklıkları gündüz saatlerinde sınırlı düzeyde yükselirken, güneş ışınlamına doğrudan maruz kalan cephelerdeki ara hava sıcaklıkları, dış ortama kıyasla ortalama 5–8 °C daha yüksek gerçekleşmiştir. Bu fark, güney cephede gün boyu sürekli, doğu cephede sabah saatlerinde, batı cephede ise öğleden sonra yoğunlaşan kısa süreli ısı birikimleri ile açıklanabilir. Ara boşlukta oluşan bu sıcaklık artışı, PV yüzeylerinin arkasında hapsolan güneş kaynaklı enerjinin doğal yolla birikmesi sonucunda ortaya çıkmakta olup, duvar yüzeyi ile iç mekân arasındaki ısı geçişini destekleyerek yapının ısıtma yükünü azaltıcı bir etki yaratmaktadır.

Geçiş ayları olan Mart ve Nisan'da bu etki daha dengeli biçimde dağılmış; doğu ve batı cephelerde ısıtım yönelimine bağlı olarak zamansal farklılık gösterse de, tüm cephelerde dış ortama kıyasla önemli düzeyde sıcaklık kazanımı sürmüştür. Mayıs ve Haziran aylarında ise dış ortam sıcaklıkları yüksek olmasına rağmen, cephelerdeki ara hava sıcaklıkları dış ortamın 2–5 °C üzerine çıkarak hâlâ ısı birikimi potansiyelini korumuş; bu durum, yaz aylarında sistemin pasif ısı kazancını desteklemekten ziyade iç mekanlarda ısınma riskini artırabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, grafikler aracılığıyla elde edilen bulgular, yarı saydam PV panel kaplamalı cephelerin yalnızca elektrik üretimiyle sınırlı kalmayıp, mevsimsel olarak değişen koşullarda binaya katkı

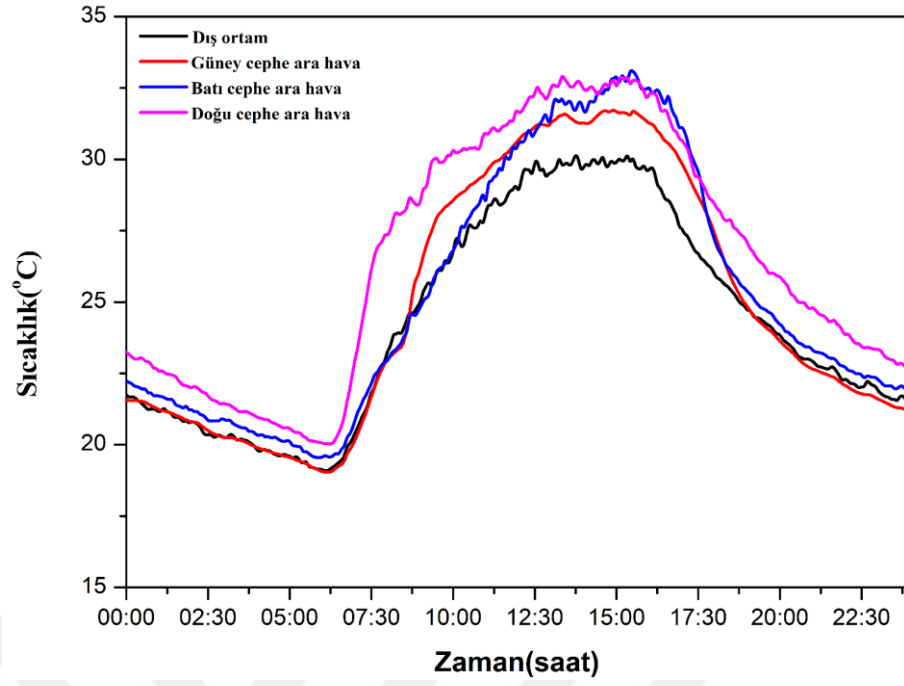
sağlayan pasif ısı kazancı işleviyle de enerji verimliliğini artırabileceğini, bu etkinin cephe yönelimi ve mevsimsel ışıınım karakteristiği ile doğrudan ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



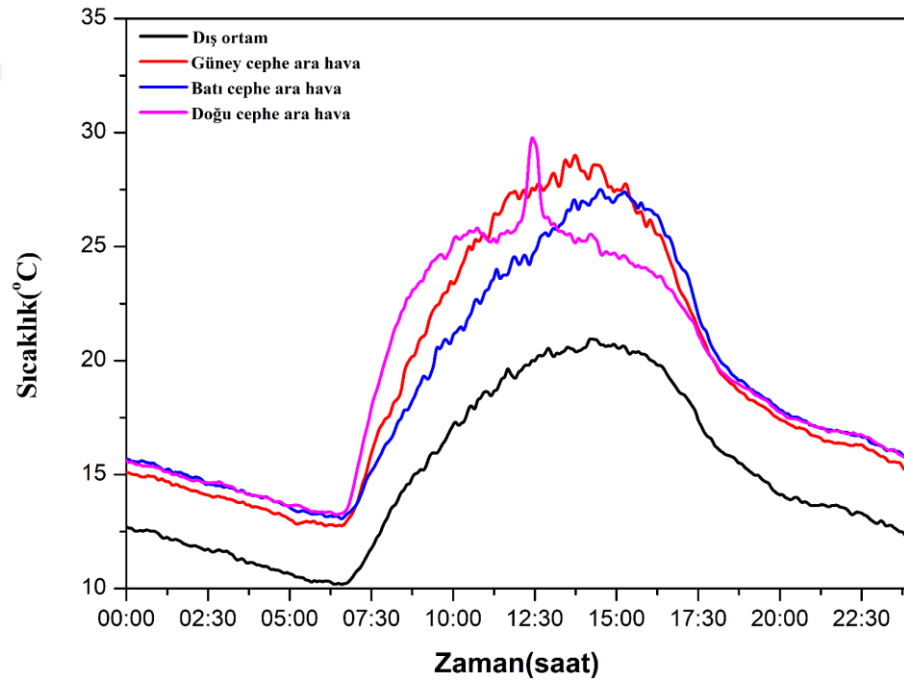
Şekil 4.16. Temmuz ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



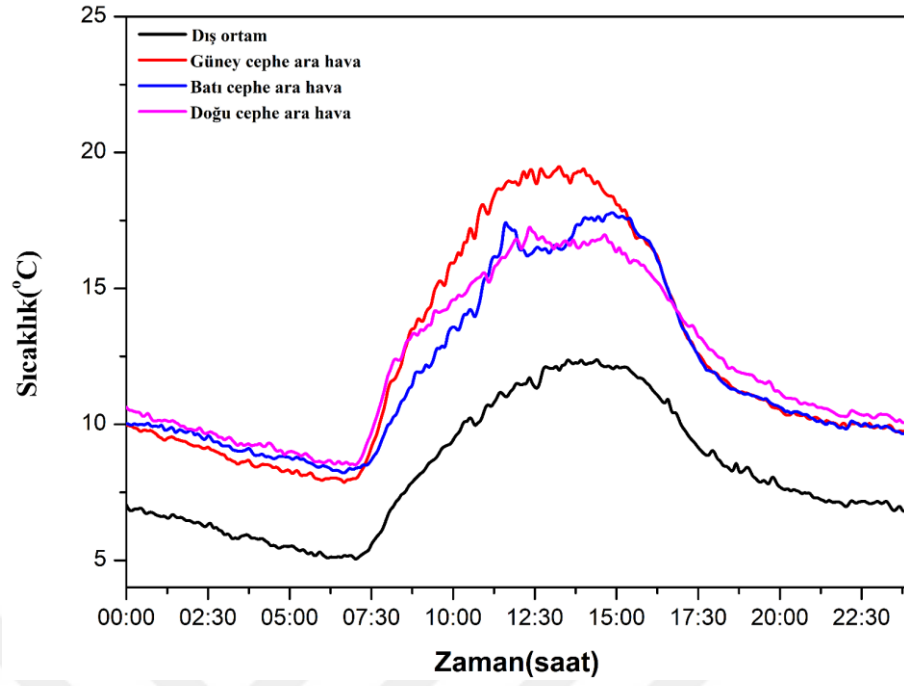
Şekil 4.17. Ağustos ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



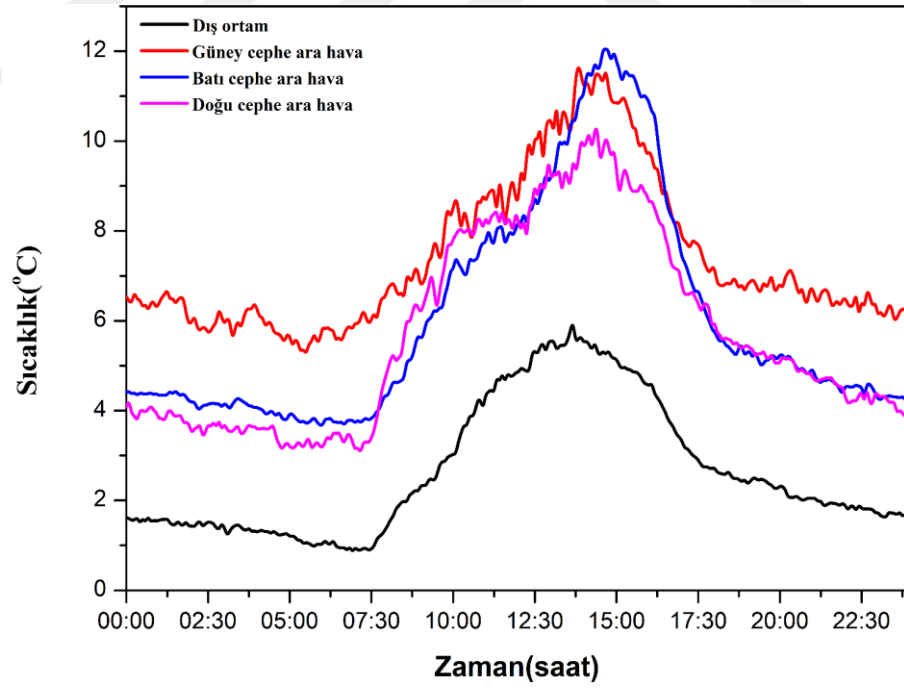
Şekil 4.18. Eylül ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



Şekil 4.19. Ekim ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



Şekil 4.20. Kasım ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması



Şekil 4.21. Aralık ayında cephelerde bulunan ara hava sıcaklığının dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırılması

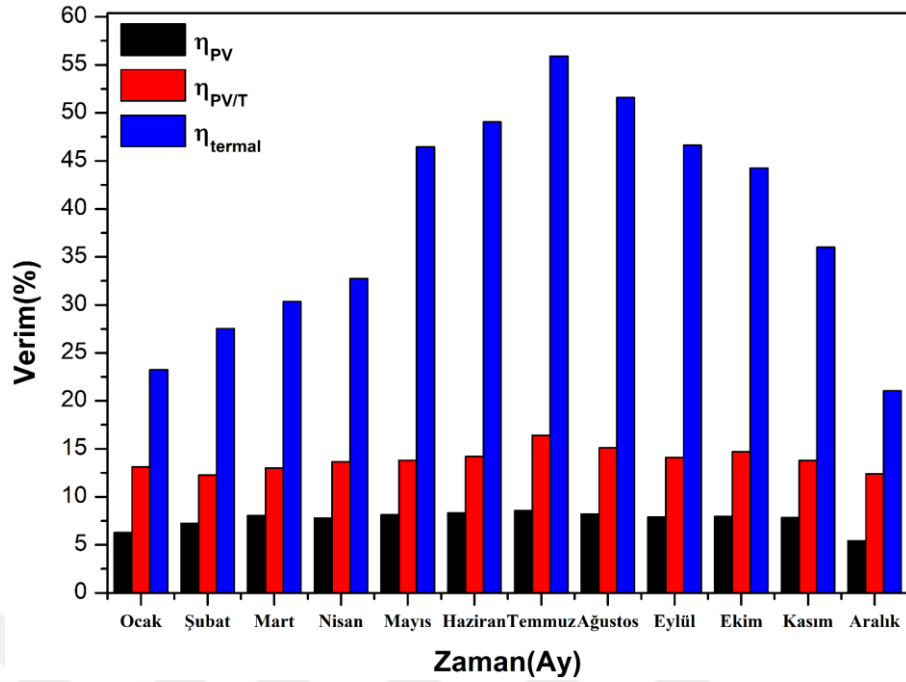
Şekil 4.16'dan Şekil 4.21'e kadar yer alan grafikler, Temmuz'dan Aralık ayına kadar geçen süreçte yarı saydam PV panellerin arkasında oluşan ara hava sıcaklıklarının saatlik değişimini, dış

ortam sıcaklıklarıyla karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu grafikler, binaya ait cephelerin mevsimsel termal davranışlarını analiz etmek ve pasif ısı kazancı ile potansiyel ısı yükü etkilerini değerlendirmek açısından kritik bilgiler sağlamaktadır. Yaz aylarında (Temmuz ve Ağustos), dış ortam sıcaklıkları zaten oldukça yüksek seviyelerde seyrederken, özellikle doğu ve güney cephelerde ara hava sıcaklıkları dış ortama göre 5–8 °C daha fazla artış göstermiş; bazı saatlerde 40–42 °C’yi aşan değerler kaydedilmiştir.

Geçiş dönemi olan Eylül ve Ekim aylarında ise dış ortam sıcaklıkları kademeli olarak düşmesine rağmen, cephe ara hava sıcaklıkları hâlen dış ortama göre 3–6 °C daha yüksek seyretmiş; özellikle öğle saatlerinde batı ve doğu cephelerde kısa süreli fakat yüksek sıcaklık farkları oluşmuştur. Bu dönem, hem ısıtma hem de soğutma gereksiniminin sınırlı olduğu, ancak iç mekân konforunun sağlanmasında cephelerin ısıl dengesinin önemli rol oynadığı bir geçiş sürecidir. Kasım ve Aralık aylarında ise sıcaklık farkları daha da belirgin hâle gelmiştir. Özellikle Aralık ayında dış ortam sıcaklığı gün boyunca 4–6 °C seviyelerinde kalırken, güneş ışınlamına maruz kalan cephelerin ara hava sıcaklıkları 10–12 °C’ye kadar ulaşmıştır. Bu fark, PV kaplamalı cephelerin kış aylarında binaya pasif ısı kazancı sağlayan etkili bir ısıtıcı yüzey gibi çalıştığını ortaya koymaktadır. Deneylerde ölçülen değerlerin ve hesaplamalardan kaynaklanan belirsizlik analizi Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ölçülen değerlerin belirsizlik analizi

Tanımlama	Birim	Toplam Belirsizlik
Sıcaklık	°C	±0.726
Işınım	W/m ²	±0.018



Şekil 4.22. I. yasa çerçevesinde yapılan enerji verimi sonuçları

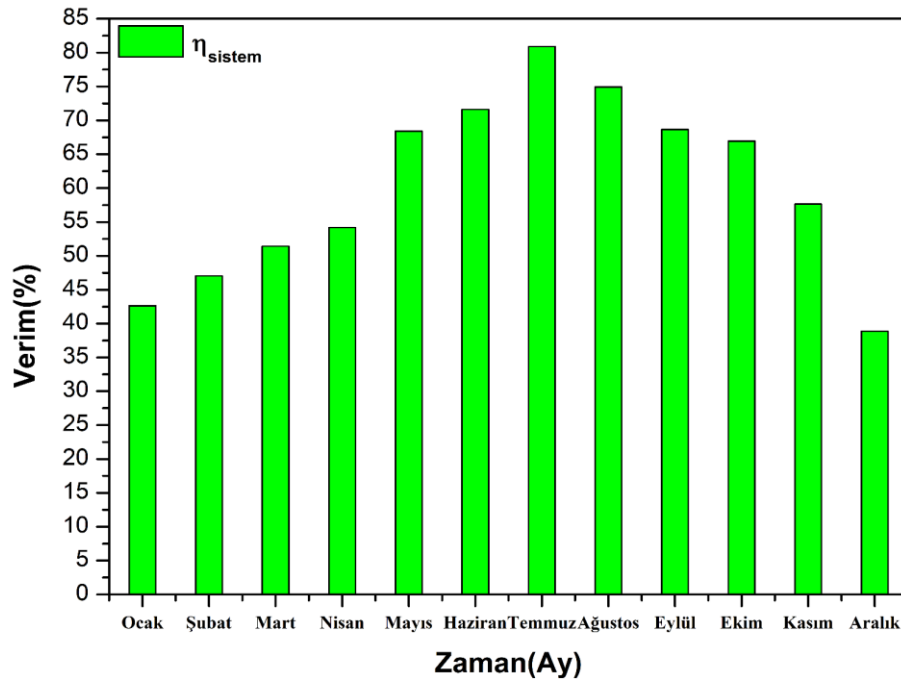
Şekil 4.22’de yıl boyunca yarı saydam PV modülüne ait elektriksel verimlilik (η_{PV}), PV/T sistemine ait elektrik verimliliği ($\eta_{PV/T}$) ve PV/T sisteminin termal enerji kazanımına karşılık gelen ısı verimliliği ($\eta_{thermal}$) değerleri aylık ortalamalar halinde sunulmaktadır. Bu veriler, deneysel olarak elde edilen güneş ışıınımı, çevresel sıcaklıklar ve akışkan sıcaklıklarına dayalı olarak 1. Termodinamik Yasa esas alınarak hesaplanmıştır. Her üç verimlilik parametresi de hem çevresel koşullar hem de sistem konfigürasyonuna bağlı olarak aylar arasında önemli farklılıklar göstermiştir. Kış aylarında düşük ışıınım şiddeti, kısa güneşlenme süresi ve düşük ortam sıcaklıkları nedeniyle tüm verimlilik bileşenlerinde sınırlı performans gözlemlenmiştir. Özellikle Ocak ayında PV modülünün elektriksel verimliliği %6,29, PV/T sisteminin elektriksel verimliliği %13,13 termal verimliliği ise %23,23 olarak hesaplanmıştır. Bu dönemde düşük ışıınım değerleri ve panel yüzey sıcaklıklarının sınırlı olması, elektriksel dönüşüm kapasitesini azaltmış; aynı zamanda düşük sıcaklık farkı nedeniyle ısı transfer verimliliği de kısıtlı kalmıştır.

Şubat ayında bu değerler sırasıyla %7,25, %12,26 ve %27,54 düzeyine yükselmiş; artan güneşlenme süresi ve çevresel sıcaklıkların etkisiyle sınırlı da olsa iyileşme sağlanmıştır. İlkbahar aylarında ışıınım koşullarının iyileşmesiyle birlikte, sistemin tüm enerji kazanım parametrelerinde belirgin artışlar kaydedilmiştir. Mart ayında PV verimliliği %8,06, PV/T elektriksel verimliliği %13,00 ve termal verimlilik %30,36 seviyelerine ulaşmıştır. Nisan ayında η_{PV} %7,81, $\eta_{PV/T}$ %13,65 ve $\eta_{thermal}$ %32,74 olarak hesaplanmıştır. Bu dönemde panelin arka yüzey sıcaklığının daha yüksek değerlere ulaşması, su giriş sıcaklığı ile panel yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını artırmış; bu da ısı kazanım kapasitesini güçlendirmiştir. Mayıs ayı itibarıyla sistem performansı daha da artmış; PV

modülü %8,16, PV/T sistemi %13,80 ve termal bileşen %46,46 verimliliğe ulaşmıştır. Bu artış, sadece artan ısınım değil aynı zamanda çevresel koşulların ve ısı transfer mekanizmasının daha etkin hale gelmesiyle ilişkilidir. Haziran ayında η_{PV} %8,35, $\eta_{PV/T}$ %14,20 ve η_{termal} %49,06 değerleri kaydedilmiştir. Bu dönemde panel yüzey sıcaklığı ile akışkan arasındaki ΔT farkı maksimuma yakın düzeylere ulaşmış, sistemin termal dönüşüm kabiliyeti iyileşmiştir.

Yılın en yüksek verimlilik değerleri Temmuz ayında kaydedilmiştir. Bu ayda yarı saydam PV modülünün verimliliği %8,58, PV/T sisteminin toplam verimliliği %16,40 ve ısı verimliliği %55,90 olarak gerçekleşmiştir. Bu performans, maksimum düzeye ulaşan ısınım, uzun güneşlenme süresi ve yüksek çevresel sıcaklıkların birlikte etkisiyle oluşmuştur. Ağustos ayında benzer eğilim devam etmiş; η_{PV} %8,22, $\eta_{PV/T}$ %15,10 ve η_{termal} %51,60 düzeyinde ölçülmüştür. Sonbahar aylarında ısınım şiddetinin ve çevresel sıcaklıkların kademeli olarak azalmasıyla birlikte sistem performansında da düşüş eğilimi gözlenmiştir. Eylül ayında η_{PV} %7,92, $\eta_{PV/T}$ %14,09 ve η_{termal} %46,63 olarak hesaplanmıştır. Ekim ayında ise bu değerler sırasıyla %7,98, %14,70 ve %44,26 olarak kaydedilmiştir. Bu dönemde sistem, yüksek panel yüzey sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki farkı korumakta başarılı olmuş ve böylece termal verimliliğini koruyabilmiştir.

Kasım ve Aralık aylarında ısınımın minimum düzeye inmesiyle birlikte tüm verimlilik bileşenlerinde önemli düşüşler yaşanmıştır. Kasım ayında PV verimliliği %7,83, PV/T verimliliği %13,79 ve termal verimlilik %36,02 olarak gerçekleşmiştir. Aralık ayında ise sırasıyla %5,42, %12,41 ve %21,05 düzeylerine kadar gerilemiştir.



Şekil 4.23. I. yasa çerçevesinde yapılan toplam enerji verimi sonuçları

Şekil 4.23'te, sistemin yıl boyunca gösterdiği toplam enerji dönüşüm performansı aylık bazda verimlilik (%) cinsinden sunulmaktadır. Sistemin bileşenleri arasında doğu, batı ve güney cephelere entegre edilmiş yarı saydam PV paneller ile çatıya yerleştirilmiş PV/T'ler yer almaktadır. Dolayısıyla burada ifade edilen toplam enerji verimliliği; yarı saydam PV panellerden elde edilen elektriksel katkı, PV/T kolektörlerin elektrik üretimi ve aynı zamanda termal enerji kazanımına dayanan ısı verim katkılarının bir araya getirilmesiyle tanımlanmıştır. Ocak ayında toplam verimlilik %42,65 seviyesinde gerçekleşmiş ve bu değer düşük kalmasında ısınım yoğunluğunun azlığı, kısa güneşlenme süresi ve çevresel sıcaklıkların düşük olması etkili olmuştur. Şubat ayında bu değer %47,05'e yükselmiş, artan ısınımla birlikte hem yarı saydam PV panellerin hem de PV/T kolektörlerin elektriksel üretim performansında belirgin bir iyileşme gözlenmiştir.

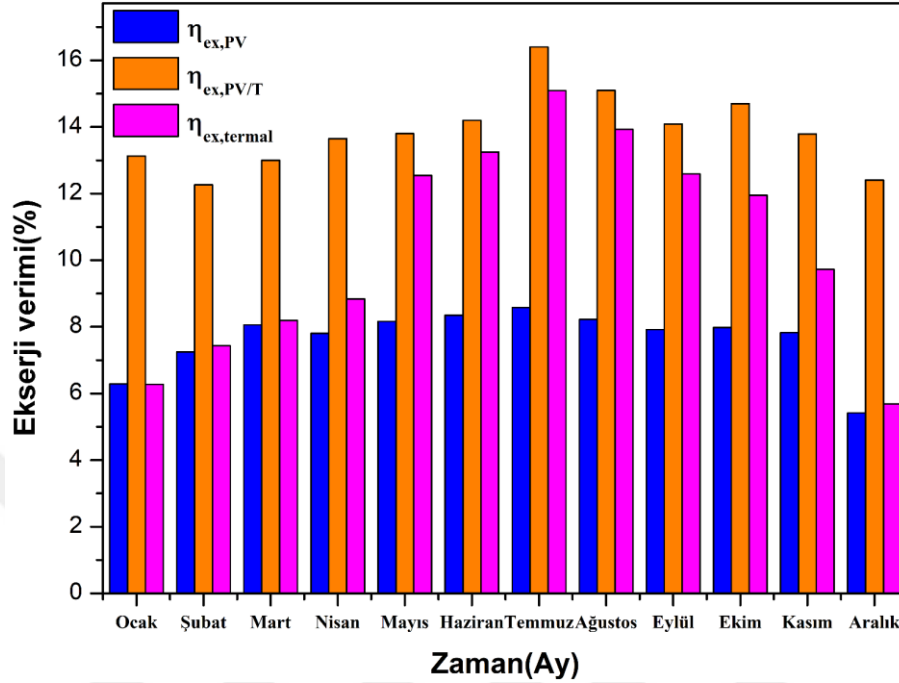
Mart ayında %51,42'ye ulaşan sistem verimliliği, Nisan'da %54,19 düzeyine çıkarak sistemin bahar aylarında daha etkin bir enerji dönüşüm kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Özellikle Nisan ayı itibarıyla PV/T kolektörlerin yüzey sıcaklıklarında artış gözlenmiş ve bu durum sistemin termal performansını olumlu yönde etkilemiştir. Mayıs ayında verimlilik %68,42'ye ulaşmış; bu artış, hem yüksek ısınım seviyeleri hem de panel-akışkan arasındaki sıcaklık farkının artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Haziran ayında sistemin toplam verimliliği %71,61 olarak belirlenmiştir. Bu dönemde hem yarı saydam PV panellerde elektrik üretimi artmış hem de PV/T kolektörlerin soğutma etkisi sayesinde PV hücrelerin sıcaklık kaynaklı kayıpları minimuma indirilmiştir.

Temmuz ayında sistem yılın en yüksek verimliliğine ulaşmış ve toplam enerji verimliliği %80,88 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, maksimum ısınım değerlerinin yanı sıra PV/T sistemlerin aynı anda hem elektriksel hem de ısı enerji üretiminde yüksek verimlilikle çalışmasından kaynaklanmıştır.

Ağustos ayında %74,92 olan sistem verimliliği, Eylül'de %68,64 ve Ekim'de %66,94 düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu aylar, ısınım seviyelerinin azalmaya başladığı ancak sistemin halen yüksek sıcaklık farklarına bağlı olarak etkin şekilde çalışabildiği dönemlerdir. Kasım ayında verimlilik %57,64'e gerilemiş, Aralık ayında ise yılın en düşük ikinci değeri olan %38,88 ile kapanış yapılmıştır. Bu dönemde güneş ısınımının azalması, gün uzunluklarının kısalması ve çevresel sıcaklıkların düşmesi hem PV üretimi hem de ısı kazanımı sınırlandırmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sistemin toplam enerji verimliliği yıl boyunca %38,88 ile %80,88 arasında değişmiş; özellikle yaz aylarında ısınım, panel sıcaklığı ve sıcaklık farklarının optimum düzeyde olması sayesinde PV/T kolektörlerin ısı katkısı yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu durum, sistemin entegre yapısının hem mevsimsel koşullara iyi yanıt verdiğini hem de elektriksel ve termal enerji üretimi arasında dengeli bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Yarı saydam PV panellerden elde edilen elektrik üretiminin yıl boyunca sabit

seyrettiği, buna karşın PV/T kolektörlerin termal kazanç kapasitesinin özellikle yaz aylarında sistem verimliliğine büyük katkı sunduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.24. II. yasa çerçevesinde yapılan ekserji verimi sonuçları

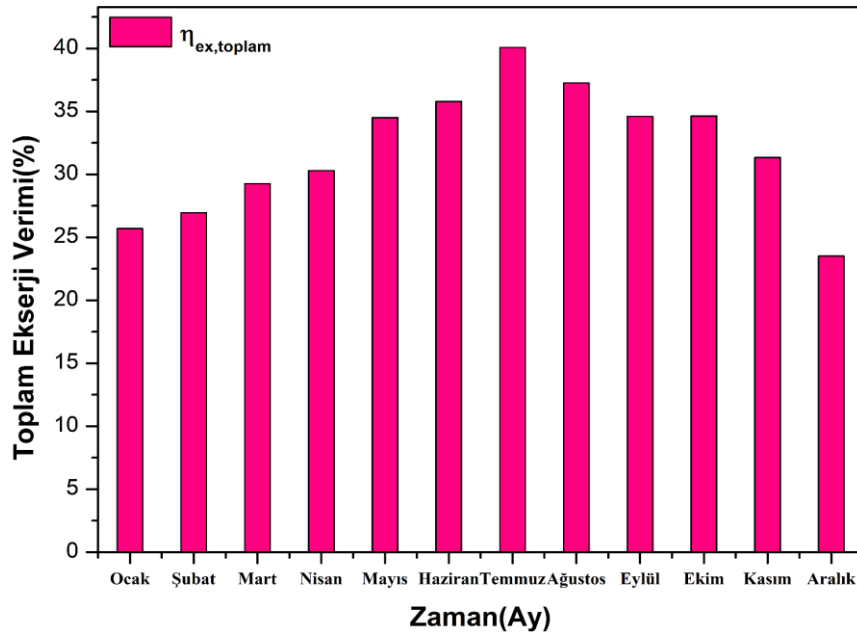
Şekil 4.24'te, sistemin ikinci yasa termodinamiği kapsamında aylık bazda değerlendirilmiş toplam ekserji verimliliği sonuçları sunulmaktadır. Ekserji verimliliği, yalnızca enerji miktarını değil aynı zamanda bu enerjinin kullanılabilirliğini de dikkate alması bakımından, sistemin gerçek performansını ortaya koymada son derece kritik bir göstergedir. Sistem üç ana bileşene sahiptir: binaya entegre edilmiş yarı saydam PV paneller ($\eta_{ex,PV}$), çatı üstü PV/T kolektörlerinin elektriksel üretiminden kaynaklanan ekserji ($\eta_{ex,PV/T}$), ve PV/T kolektörlerden sağlanan termal enerjinin çevresel sıcaklıkla ilişkili olarak ekserjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısı ekserji verimi ($\eta_{ex,termal}$). Bu üçlü yapı, sistemin toplam kullanılabilir enerji dönüşüm performansını ay bazında belirlemektedir. Ocak ayında sistemin toplam ekserji performansı düşüktür; PV'nin elektriksel ekserji verimi %6,29, PV/T'nin toplam elektriksel verimi %13,13 ve ısı ekserji verimi yalnızca %6,27'dir. Bu durum düşük çevresel sıcaklık farkları ve düşük ısıtım koşullarından kaynaklanmaktadır. Şubat ayında bu değerler artış göstermekte; özellikle termal sistemin sıcaklık farkına dayalı ekserji üretimi %7,43'e yükselmiştir.

Mart ve Nisan aylarında bu eğilim devam etmiş, Mart'ta toplam ısı ekserji verimi %8,19'a, Nisan'da ise %8,84'e çıkmıştır. Bu artışlar, gün uzunluğunun artması ve güneş ışınlamadaki yükselişin hem elektriksel hem de termal sistemlere pozitif katkı sağlamasıyla açıklanabilir. Mayıs ayında sistemin toplam ısı ekserji verimi %12,54'e yükselmiştir. Bu noktada, PV/T kolektörlerin

termal katkısı daha belirgin hale gelmekte, çevre sıcaklığı ile kolektör yüzey sıcaklığı arasındaki farkın artması ısı enerjisinin daha yüksek bir ekserji verimiyle sisteme aktarılmasına imkân tanımaktadır.

Haziran ve Temmuz aylarında bu artış daha da belirgin hale gelmiş; sırasıyla %13,25 ve %15,09 değerlerine ulaşılmıştır. Temmuz ayı, aynı zamanda %16,4 ile PV/T sistemin en yüksek elektriksel ekserji verimini de sunduğu aydır. Bu durum, sistemin yılın bu döneminde hem elektrik hem de ısı açısından kullanılabilir enerjiye en verimli şekilde dönüştüğünü göstermektedir. Ağustos ayında ısı ekserji verimi %13,93, Eylül’de %12,59 ve Ekim’de %11,95 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler, sistemin yaz-sonbahar geçişinde halen yüksek performans sergilediğini, özellikle güneşlenme süresinin yeterli olduğu günlerde PV/T kolektörlerin verimli şekilde çalıştığını ortaya koymaktadır. Kasım ayında ısı ekserji verimi %9,72’ye düşerken, Aralık ayında bu değer %5,68’e kadar gerilemiştir. Bu azalma, güneş ışıınının azalması, düşük çevre sıcaklığı farkları ve daha kısa gün süreleriyle doğrudan ilişkilidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sistemin toplam ekserji verimliliği yıl boyunca termal açıdan %5,68–15,09 aralığında değişmekte olup, elektriksel katkı ile birlikte PV/T’nin toplam ekserji performansı yılın en verimli döneminde (Haziran–Ağustos) %29’a yaklaşmaktadır. Yarı saydam PV panellerin ekserji verimi ise yıl boyunca %5,4 ile %8,5 aralığında değişmiş, daha istikrarlı bir seyir izlemiştir. PV/T sistemin termal ekserjiye dayalı katkısı yaz aylarında oldukça baskın hale gelirken, kış aylarında sistemin performansı daha çok PV bileşenleri ile sınırlı kalmaktadır.



Şekil 4.25. II. yasa çerçevesinde yapılan toplam ekserji verimi sonuçları

Şekil 4.25'te, entegre enerji sisteminin termodinamiğin ikinci yasası çerçevesinde aylık ortalama toplam ekserji verimliliği ($\eta_{ex,toplam}$) sunulmaktadır. Bu verimlilik, sistemin yalnızca enerji miktarına değil, aynı zamanda bu enerjinin kullanılabilirliğine, yani **kalitesine** odaklanan en temel göstergelerden biridir. Paylaşılan tablo doğrultusunda toplam ekserji verimliliği değerleri, bileşen bazında hesaplanan elektriksel ve termal ekserji verimlerinin toplamından elde edilmiştir ve sistemin PV, PV/T ve termal alt bileşenlerinin tamamını kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Ocak ayında $\eta_{ex,toplam}$ değeri %25,69 olarak ölçülmüş olup, bu düşük değer sistemin özellikle kış aylarında sınırlı ısınım alması, düşük çevresel sıcaklıklar ve güneşlenme süresinin kısa oluşu nedeniyle hem elektriksel hem de termal olarak düşük kullanılabilir enerji üretimi gerçekleştirmesiyle ilişkilidir. Şubat ayında %26,95'e, Mart ayında ise %29,25'e yükselen bu değer, ısınım artışı ve çevre sıcaklıklarındaki göreceli yükselişle birlikte sistemin enerji kalitesinde artışı ifade etmektedir.

Nisan ayında toplam ekserji verimi %30,29'a ulaşmış, Mayıs'ta ise termal sistemlerin artan katkısıyla birlikte bu değer %34,51'e yükselmiştir. Bu artışta PV/T kolektörlerinin yüzey sıcaklıklarının, çevre sıcaklığına oranla daha yüksek değerlere ulaşmasıyla, termal enerjinin ekserjiye dönüşüm potansiyelinin artması etkili olmuştur. Haziran ayında sistem %35,80; Temmuz ayında ise %40,07 ile yılın en yüksek toplam ekserji verimliliğine ulaşmıştır. Bu maksimum performans, hem yüksek düzeyde gelen güneş ısınımı hem de optimum çevresel koşulların, sistemin tüm bileşenleriyle yüksek ekserji dönüşümü gerçekleştirmesini mümkün kılmasıyla açıklanmaktadır.

Ağustos ayında bu değer %37,25'e düşmekle birlikte halen yüksek bir performans sergilenmiştir. Eylül ve Ekim aylarında sistem sırasıyla %34,60 ve %34,63 değerleri ile görece istikrarlı bir performans göstermiştir. Kasım ayında düşüş eğilimi devam etmiş ve toplam ekserji verimliliği %31,35 olarak ölçülmüştür. Aralık ayı ise %23,51 değeriyle yılın en düşük ikinci performansını sergilemiş, bu da sistemin özellikle termal bileşenlerinin düşük ısınım ve düşük çevre sıcaklığı nedeniyle yetersiz ekserji dönüşümüne sahip olduğunu göstermektedir. Yıl boyunca en düşük ve en yüksek ekserji verimi değerleri sırasıyla Aralık (%23,51) ve Temmuz (%40,07) aylarında elde edilmiştir. Bu sonuç, sistemin yıl içinde mevsimsel iklim koşullarından yüksek derecede etkilendiğini göstermektedir. Özellikle Temmuz ayındaki %40'ı aşan toplam ekserji verimliliği, PV/T sistemin elektrik ve termal entegrasyonunun en verimli olduğu dönemi temsil etmektedir. Bu ayda yalnızca PV elektrik üretimi değil, aynı zamanda termal ekserji üretimi de maksimuma yakın gerçekleşmiş, bu da mevsimsel entegrasyon stratejilerinin sistem performansına doğrudan katkı sunduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 4.2. Sistemin eksergoekonomik analiz sonuçları

E_g (kWh)	$Ex_{güneş}$ (kWh/yıl)	Ömür (yıl)	$EGÖS_{ex}$ (yıl)	$EÜF_{ex,yıllık}$ (%/yıl)	$EÜF_{ex,yaşamboyu}$ (%/yaşamboyu)	$YDDV_{ex}$	$FGÖ$ (yıl)
18.018	54747	20	3.18	32	6.3	11.23	8.9

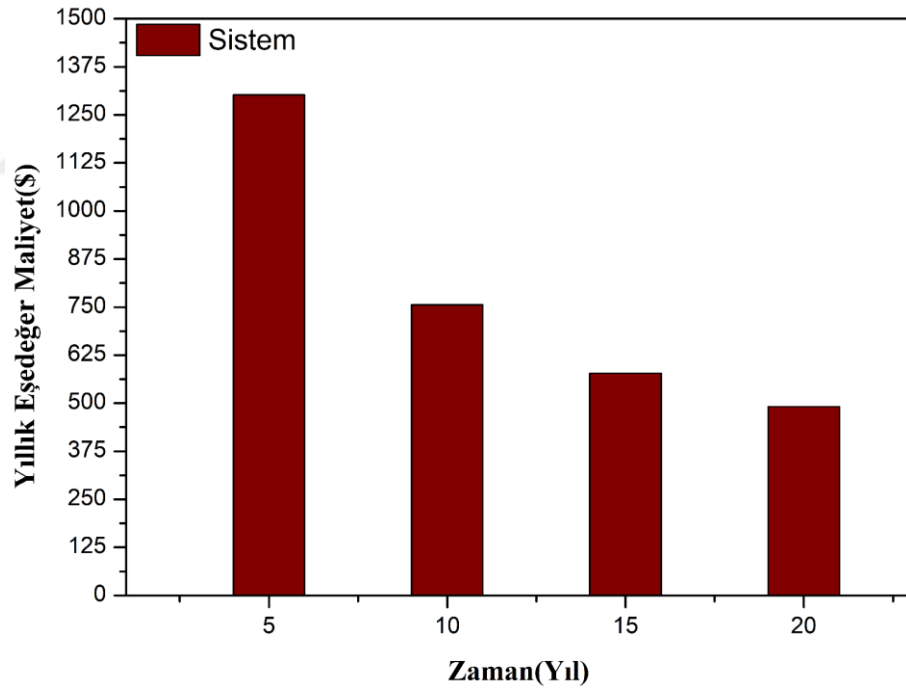
Bu çalışmada ele alınan entegre sistem; binaya entegre edilmiş 7 adet yarı saydam PV panel ve çatıya yerleştirilmiş 2 adet PV/T kolektörden oluşmakta olup, toplamda 19.79 m²'lik aktif yüzey alanı üzerinden elektriksel ve termal enerji üretimi gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen eksergoekonomik analiz, sistemin hem enerji dönüşüm etkinliğini hem de ekonomik geri kazanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem bileşenlerinin üretimi, nakliyesi, kurulumu ve işletme süresince gerekli bakım faaliyetleri göz önüne alınarak yapılan yaşam döngüsü enerji analizinde, toplam gömülü enerji (E_g) ihtiyacı 18018 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemin üretim ve kurulum evrelerinde tüketilen toplam birincil enerjiyi temsil etmekte olup, ekserjetik değerlendirmelerde temel kıyas parametresi olarak dikkate alınmıştır.

Enerji dönüşümü sırasında sadece nicel çıktılar değil, aynı zamanda dönüşüm verimliliği de dikkate alındığından, ekserji bazlı analizler sistem performansının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Yıl boyunca yapılan izleme ve hesaplamalar sonucunda, sistemin toplam yıllık net ekserji üretimi 54747 kWh/yıl düzeyinde tespit edilmiştir. Bu üretim değeri, PV ve PV/T modüllerin birlikte çalışması sonucu elde edilen elektriksel ve termal enerjinin ikinci yasa kapsamında değerlendirilmiş karşılığı olup, doğrudan kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilirliğini temsil etmektedir. Yıllık ekserji üretimi verisi ile gömülü enerji kıyaslandığında, sistemin $EGÖS_{ex}$ değeri 3.18 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu süre, sistemin kurulumu için harcanan toplam enerji maliyetinin kaç yıl içerisinde sağlanan ekserji çıktısı ile karşılandığını göstermekte ve sistemin kendini enerji bazında amorti etme süresini ifade etmektedir. Böylelikle sistem, üçüncü yılın sonunda gömülü enerji yatırımını tamamen karşılayarak net pozitif enerji üretimine geçmektedir.

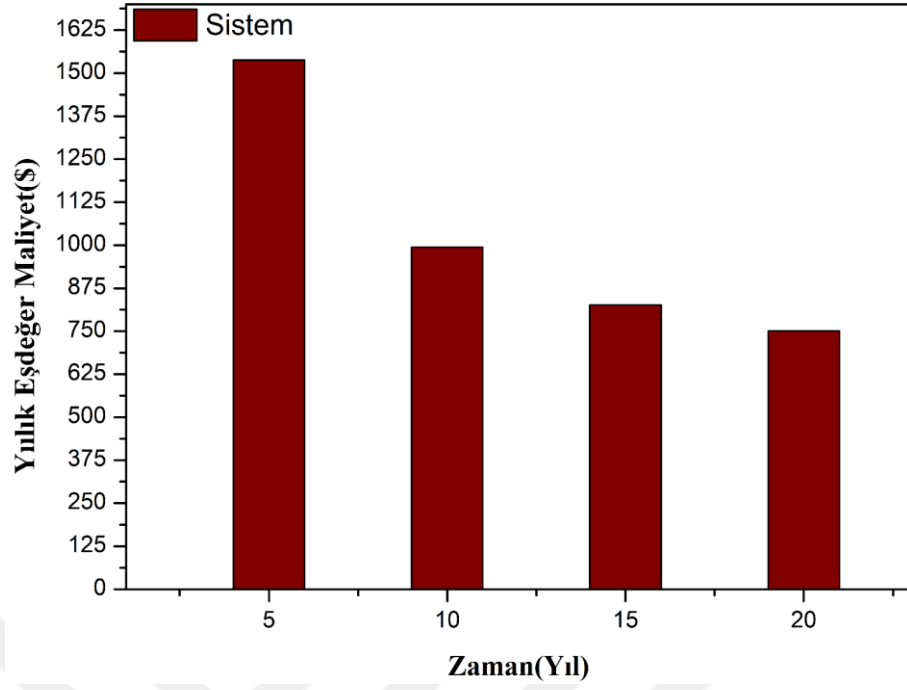
Sistemin ekserji temelli etkinliğini yıllık bazda değerlendirmek amacıyla hesaplanan $EÜF_{ex,yıllık}$ %32 olarak bulunmuştur. Bu oran, sistemin her yıl gömülü enerji girdisinin üçte birini doğrudan kullanılabilir ekserjiye dönüştürebildiğini göstermektedir. Söz konusu verimlilik oranı, PV sistemlerinde genellikle %10–18 bandında kalan yıllık net ekserji oranlarıyla kıyaslandığında oldukça yüksek bir düzeyde gerçekleşmiştir. Bunun temel nedeni, PV/T kolektörlerin yalnızca elektrik üretmekle kalmayıp aynı zamanda atık ısıyı da faydalı termal enerjiye dönüştürmesidir. Ek olarak, yarı saydam PV panellerin ışık geçirgenliğini dengeleyerek hem doğal aydınlatma katkısı sağlaması hem de yapı yüzeylerine entegre edilerek mimari bütünlüğe katkıda bulunması, sistemin toplam faydalı kullanım değerini artırmıştır.

Ömür boyu performans analizine geçildiğinde ise, sistemin 20 yıllık varsayılan kullanım süresi boyunca toplam 109.494 kWh düzeyinde ekserji çıktısı sağlayabildiği hesaplanmıştır. Bu veri, gömülü enerjiye oranlandığında sistemin yaşam döngüsü süresince sağladığı enerji geri dönüş oranı yaklaşık 6.3 kat olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak hesaplanan $E\ddot{U}F_{ex,yaşamboyu}$ %6.3 olup, her 1 birim enerji yatırımı karşılığında yaklaşık 6.3 birim net ekserji üretildiği anlamına gelmektedir. Bu oran, PV ve PV/T teknolojilerinin birlikte kullanılmasıyla elde edilen verim artışının doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

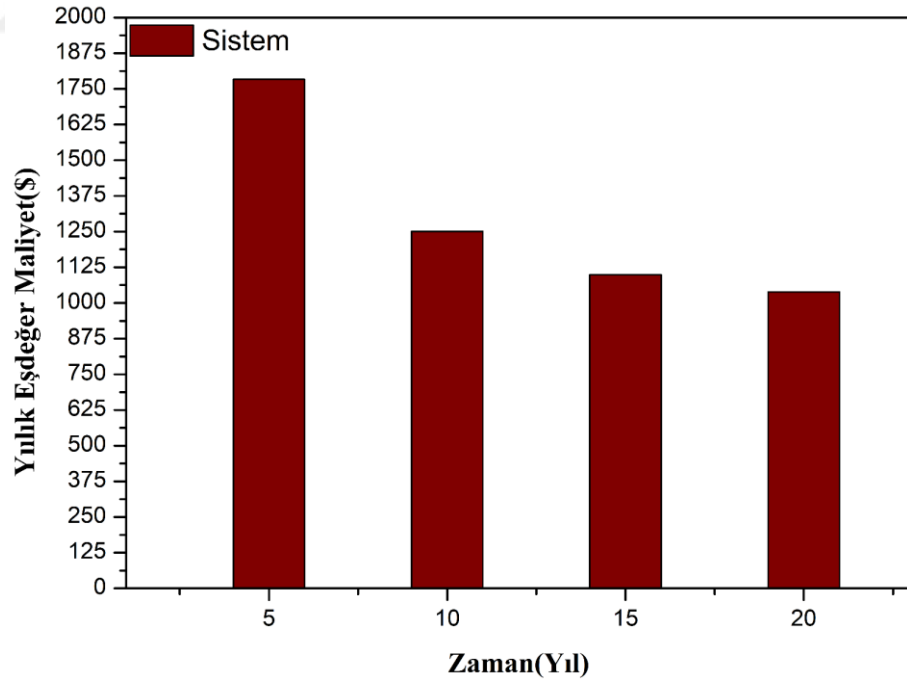
Sistemin maliyet etkinliği açısından yapılan analizde, enerji tasarrufu ve üretimiyle yatırım geri dönüş süresi karşılaştırılmıştır. Buna göre, sistemin FGÖ 8.9 yıl olarak belirlenmiştir. Bu değer, yatırım maliyetlerinin sağlanan enerji çıktıları üzerinden karşılanma süresini ifade etmektedir. Ancak finansal analizlerde yalnızca nominal kazançlar değil, paranın zaman değeri de dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda hesaplanan $YDDV_{ex}$ ise 11.23 yıl olarak bulunmuştur. Bu değer, sistemin bugünkü değer üzerinden değerlendirildiğinde yatırım maliyetini kaç yıl içerisinde geri kazanabildiğini göstermektedir.



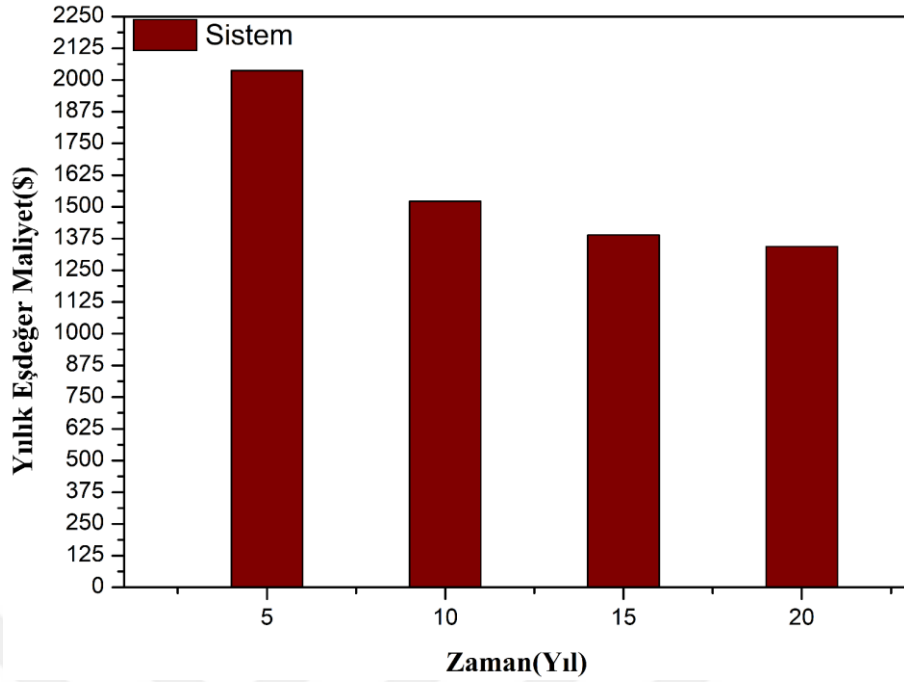
Şekil 4.26. Eksergoekonomik analizde %5 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi



Şekil 4.27. Eksergoekonomik analizde %10 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi



Şekil 4.28. Eksergoekonomik analizde %15 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi



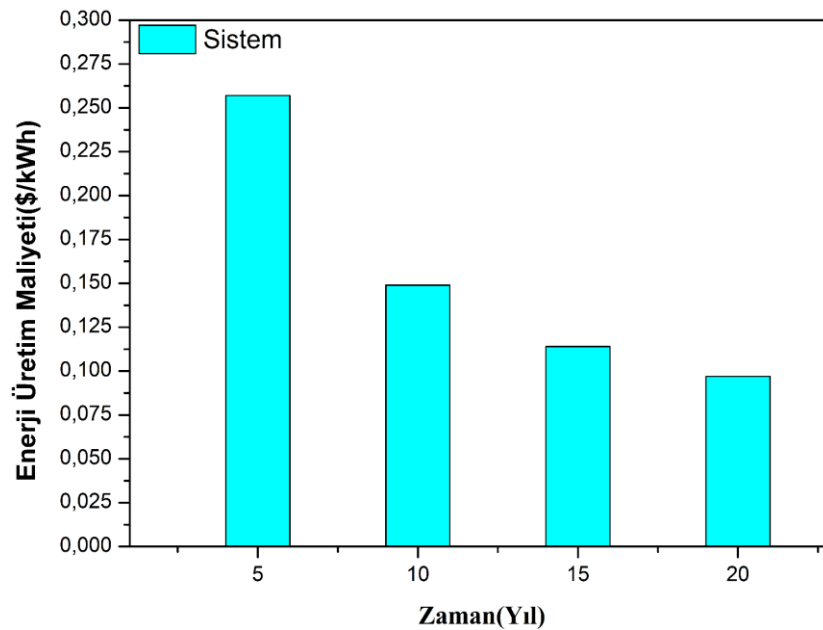
Şekil 4.29. Eksergoekonomik analizde %20 faiz oranında sistem ömrüne bağlı olarak yıllık eşdeğer maliyetin değişimi

Eksergoekonomik analiz kapsamında gerçekleştirilen değerlendirmelerde, sistemin yıllık eşdeğer maliyet (YEM) eğilimleri, farklı faiz oranlarında ve değişen sistem ömürlerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, %5, %10, %15 ve %20 oranlarındaki dört farklı faiz senaryosu altında, sistemin 5, 10, 15 ve 20 yıllık kullanım süreleri için yıllık bazda eşdeğer maliyet hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.26–4.29’da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, faiz oranı ve sistem ömrü parametreleri, yıllık eşdeğer maliyet üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. En düşük faiz oranı olan %5 senaryosu incelendiğinde, sistemin 5 yıllık ömür süresinde yıllık eşdeğer maliyet yaklaşık 1300–1350 \$ düzeyindedir. Ancak sistem ömrü uzadıkça maliyetlerde belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Örneğin, sistem ömrünün 10 yıla çıkartılmasıyla maliyet yaklaşık 850 \$ seviyesine düşerken, 15 yılda 650 \$ ve 20 yıllık sürede ise 475 \$ civarına gerilemiştir. Bu durum, sistem yatırımının zaman içinde daha yaygın bir şekilde dağıtılması sayesinde, yıllık maliyetlerin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.

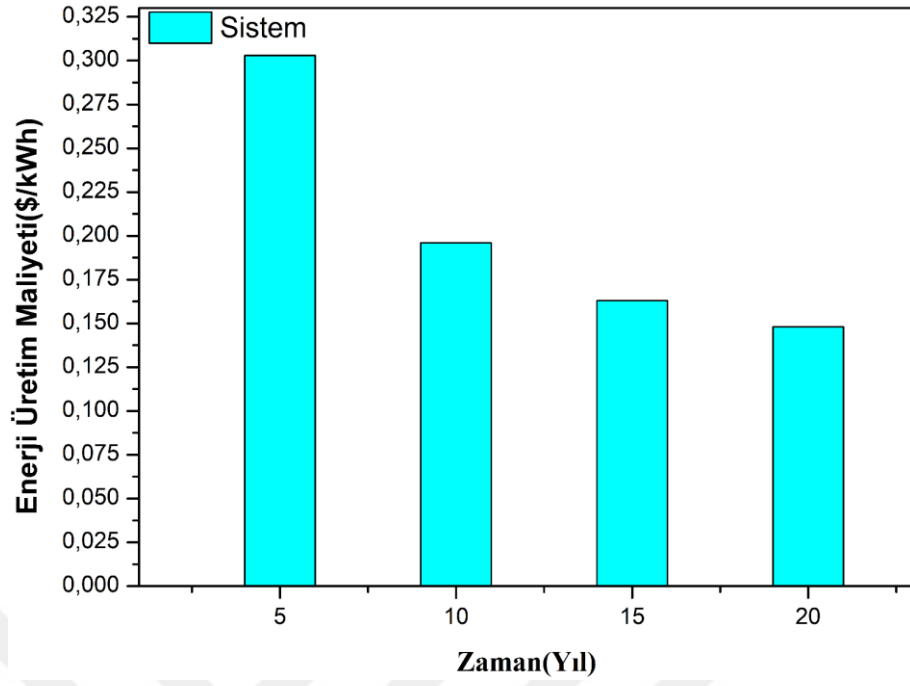
Faiz oranının %10 seviyesine çıkarılması durumunda ise, yıllık eşdeğer maliyetlerde artış meydana gelmiştir. Sistem ömrü 5 yıl olarak alındığında maliyet yaklaşık 1550 \$ seviyelerine ulaşırken, 10, 15 ve 20 yıllık ömürlerde bu değerler sırasıyla yaklaşık 1000 \$, 750 \$ ve 650 \$ düzeylerine düşmüştür. Bu eğilim, sermaye maliyetinin artan faiz oranlarıyla birlikte sistemin ekonomik performansına olan etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, yüksek faiz ortamlarında yatırımın kendini amorti etme süresi uzamakta ve ekonomik sürdürülebilirlik daha düşük bir seviyeye inmektedir. %15 faiz oranı senaryosunda ise benzer bir eğilim devam etmekle birlikte,

sistemin yıllık eşdeğer maliyeti 5 yıllık kullanım süresinde yaklaşık 1800 \$'a ulaşmıştır. Daha uzun vadelerde ise maliyet düşüşü devam etmiş; 10 yılda 1250 \$, 15 yılda 1050 \$ ve 20 yılda ise yaklaşık 1000 \$ seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu durum, faiz oranının sistem ömrüne bağlı maliyetlerdeki azalma eğrisini daha yatık hale getirdiğini göstermektedir. Artan faiz, gelecekteki harcamaların bugünkü değeri üzerinde daha fazla baskı oluşturarak, sistemin toplam ekonomik cazibesini düşürmektedir. En yüksek faiz oranı olan %20 senaryosunda ise sistemin 5 yıllık ömür için yıllık eşdeğer maliyeti 2100 \$'a kadar çıkmakta; 10 yıllık sürede 1400 \$, 15 yılda yaklaşık 1300 \$ ve 20 yılda ise 1100 \$ civarında seyretmektedir. Bu senaryoda, sistem ömrü uzadıkça maliyet düşse de düşüş hızı diğer senaryolara kıyasla daha yavaş kalmaktadır. Özellikle %20 faiz oranı altında sistemin 20 yıla yayılmasına rağmen yıllık eşdeğer maliyetin hâlâ yüksek seviyelerde kalması, yatırımın geri ödeme potansiyelini ciddi şekilde sınırlamaktadır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ekonomilerde sermaye maliyetlerinin yüksek olduğu senaryolarda, sistem yatırımlarının maliyet-etkinliğinin azaldığını göstermektedir.

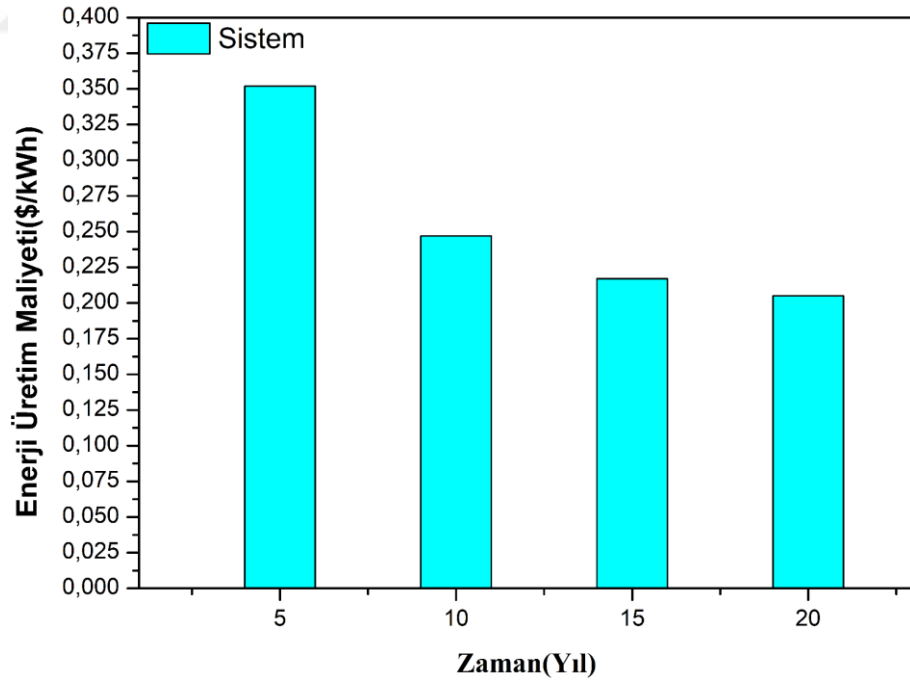
Sonuç olarak, sistemin ekonomik fizibilitesini belirleyen temel parametrelerden biri olan faiz oranı, yıllık eşdeğer maliyet üzerinde doğrudan etkili olup, düşük faiz oranları ve uzun sistem ömürleri durumunda yatırımın daha ekonomik hale geldiği tespit edilmiştir. Sistem ömrü uzadıkça yıllık maliyetler düşmekte, ancak faiz oranı yükseldikçe bu düşüş eğrisi zayıflamakta ve yatırımın toplam yaşam döngüsü maliyeti artmaktadır. Bu analiz bulguları, yenilenebilir enerji sistemlerinin uzun vadeli ekonomik planlamalarında faiz oranı-ömür etkileşiminin kritik bir optimizasyon parametresi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



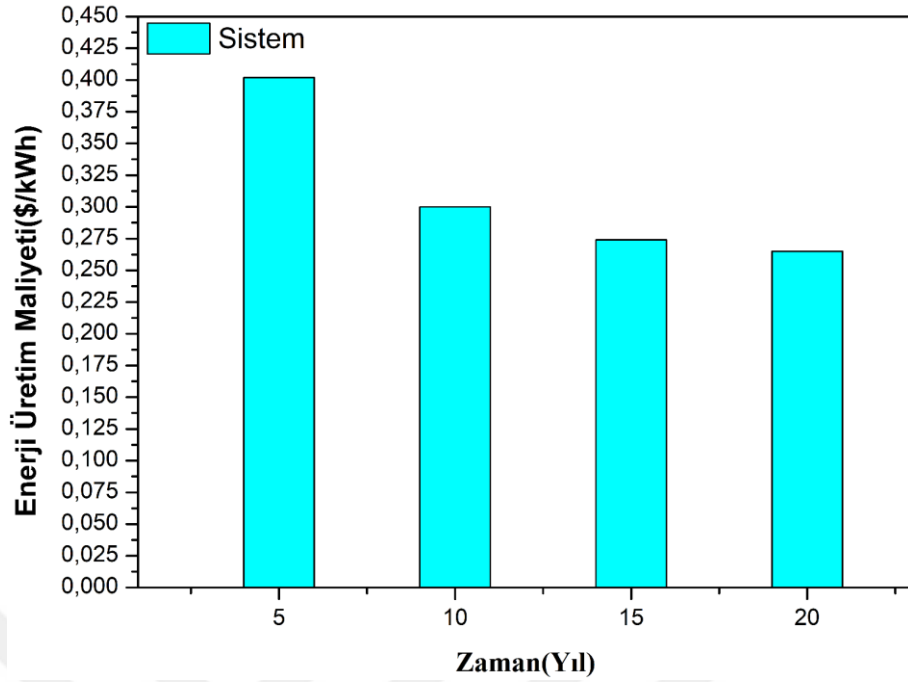
Şekil 4.30. Eksergoekonomik analizde %5 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi



Şekil 4.31. Eksergoekonomik analizde %10 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi



Şekil 4.32. Eksergoekonomik analizde %15 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi



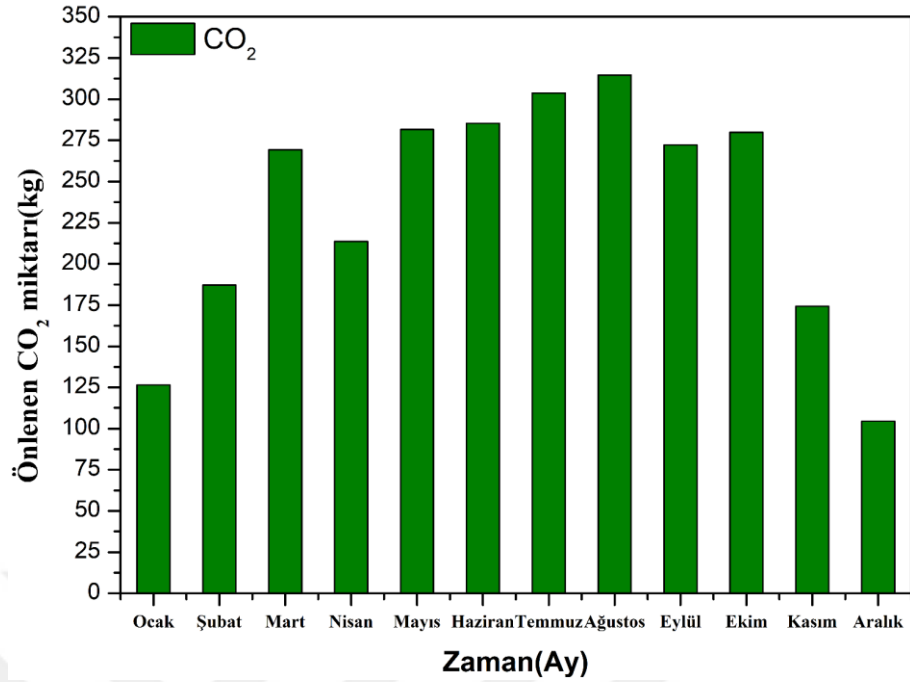
Şekil 4.33. Eksergoekonomik analizde %20 faiz oranında yıllara bağlı olarak enerji üretim maliyetinin değişimi

Şekil 4.30 – 4.33'te sunulan grafikler, sistemin enerji üretim maliyetinin (\$/kWh) farklı faiz oranları (%5, %10, %15 ve %20) ve sistem ömürleri (5, 10, 15 ve 20 yıl) altında nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu analiz, sistemin ilk yatırım maliyetinin zamanla ne ölçüde amorti edilebildiğini ve ekonomik fizibilitenin nasıl geliştiğini değerlendirmek adına kritik öneme sahiptir.

İlk olarak Şekil 4.30'da, %5 faiz oranı altında gerçekleştirilen analiz, düşük sermaye maliyeti senaryosu için oldukça avantajlı bir görünüm sunmaktadır. Bu senaryoda, sistemin 5 yıllık bir kullanım ömrü durumunda enerji üretim maliyeti yaklaşık 0.257 \$/kWh düzeyinde oluşmaktadır. Ancak sistemin ekonomik ömrü 10 yıla çıkarıldığında maliyet %42 oranında düşerek yaklaşık 0.149 \$/kWh seviyesine inmiştir. Sistem ömrü 20 yıla ulaştığında ise üretim maliyeti yaklaşık 0.097 \$/kWh değerine kadar gerilemiştir. Bu azalma, sistemin ömrü uzadıkça birim enerjiye düşen sermaye yükünün belirgin biçimde azaldığını ve amortisman etkisinin daha dengeli dağıldığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.31'de, %10 faiz oranı senaryosunda artan sermaye maliyeti nedeniyle kısa vadeli ekonomik performans zayıflamıştır. 5 yıllık kullanımda enerji üretim maliyeti yaklaşık 0.303 \$/kWh olup, bu değer %5 faiz senaryosuna göre daha yüksek bir maliyet yapısına işaret etmektedir. Ancak sistem ömrü uzadıkça bu etkinin zayıfladığı ve maliyetlerin göreceli olarak düştüğü gözlemlenmektedir. 10 yıllık ömürde maliyet 0.196 \$/kWh, 15 yılda ise 0.163 \$/kWh seviyelerine gerilemekte; 20 yıllık senaryoda ise üretim maliyeti yaklaşık 0.148 \$/kWh değerine inmektedir. Bu durum, faiz oranının maliyetler üzerindeki etkisinin zamanla azaldığını ve uzun vadeli işletim süresinin ekonomik fayda sağladığını göstermektedir. Şekil 4.32'de %15 faiz

oranı altında yapılan analizde, kısa ömür senaryosunda maliyetler daha da artmakta ve 5 yıl için üretim maliyeti yaklaşık 0.352 \$/kWh düzeyine ulaşmaktadır. 10 yıllık kullanımda bu değer 0.247 \$/kWh, 15 yılda 0.217 \$/kWh ve 20 yıl sonunda yaklaşık 0.205 \$/kWh seviyelerine gerilemektedir. Bu senaryo, yatırımcı açısından ilk yatırımın yüksek faizli bir borçlanma ile karşılandığı ve geri ödeme süresinin kısa tutulduğu durumlarda sistemin ekonomik cazibesinin azaldığını ancak ömrün uzamasıyla bu etkinin büyük oranda dengelendiğini ifade etmektedir. Şekil 4.33’de ise en yüksek faiz oranı olan %20’lik senaryoda, sistemin enerji üretim maliyeti 5 yıllık kısa ömürde yaklaşık 0.402 \$/kWh seviyesine çıkarak ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir eşik ortaya koymaktadır. Ancak sistemin 10, 15 ve 20 yıl süreyle işletilmesi durumunda sırasıyla 0.3 \$/kWh, 0.274 \$/kWh ve 0.265 \$/kWh değerlerine gerilemektedir. Bu durumda dahi üretim maliyeti, düşük faizli senaryolara göre kayda değer biçimde yüksek kalmaktadır.

Tüm bu analizler değerlendirildiğinde, enerji üretim maliyetleri üzerinde en belirleyici iki etmenin faiz oranı ve sistem ömrü olduğu görülmektedir. Düşük faizli senaryolarda yatırım maliyetinin birim enerjiye yansımaları daha az olmakta, sistem ömrü uzadıkça da sermaye yükü daha geniş bir zaman dilimine yayılmakta ve enerji başına maliyet düşmektedir. Buna karşılık, yüksek faizli senaryolarda özellikle kısa ömürlü kullanım durumlarında enerji üretim maliyetleri ekonomik eşiklerin üzerine çıkmakta ve sistemin yatırım geri dönüş süresi uzamaktadır. Bu nedenle sistemin ekonomik fizibilitesini artırmak için, düşük faizli finansman seçenekleri ile birlikte sistem ömrünün 15 yıl ve üzerine çıkarılması önerilmektedir. Özellikle PV/T ve yarı saydam PV panellerin birlikte entegre edildiği bu tür hibrit sistemlerde, uzun ömürlü kullanım ve düşük finansman maliyetleri, toplam enerji üretim maliyetini makul seviyelere indirerek sistemin yaygınlaştırılabilirliğini artırmaktadır.



Şekil 4.34. Çevresel analize göre aylık önlenen CO₂ miktarı

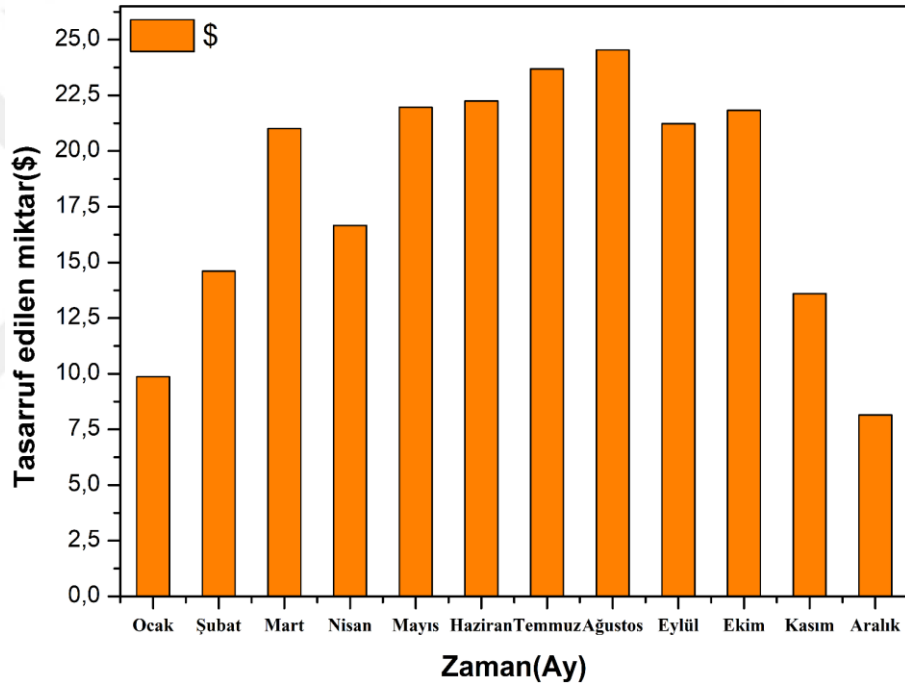
Şekil 4.34’te, incelenen PV ve PV/T entegre sistemin 12 ay boyunca gerçekleştirdiği CO₂ emisyonu azaltım miktarları sunulmaktadır. Analiz sonuçlarına göre sistemin yılın ilk ayında, yani Ocak ayında önlediği CO₂ miktarı 126.43 kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer yıl içerisindeki en düşük ikinci seviyedir ve bu durumun temel nedeni, kış aylarında güneşlenme süresinin kısa olması, güneş ışınımının düşük düzeylerde seyretmesi ve dolayısıyla elektrik üretim potansiyelinin sınırlı kalmasıdır. Şubat ayında ışınlam düzeyinin artmasıyla birlikte sistemin çevresel etkisi de belirgin şekilde yükselmiş ve bu ayda 187.23 kg CO₂ emisyonu engellenmiştir. Mart ayına gelindiğinde, sistemin performansındaki artış, 269.36 kg gibi yüksek bir CO₂ azaltımına karşılık gelmiştir. Bu değer, sistemin ilkbahar aylarında güneşlenme süresinden daha verimli yararlanmaya başladığını göstermektedir. Nisan ayında ise mevsimsel geçişe bağlı olarak 213.62 kg, Mayıs ayında ise bu değer 281.65 kg’a yükselmiştir. Mayıs ayı, yaz öncesi dönemin ışınlam koşulları ile sistemin hem PV hem de termal bileşenlerinin etkin çalıştığı ve buna bağlı olarak ciddi bir çevresel fayda sağlandığı bir ay olarak öne çıkmaktadır. Haziran ayında 285.27 kg, Temmuz ayında 303.73 kg, ve Ağustos ayında 314.61 kg CO₂ emisyonu engellenmiştir. Özellikle Ağustos ayı, yıl boyunca elde edilen en yüksek CO₂ azaltım miktarını temsil etmektedir.

Yaz mevsimi sonrasında da sistemin çevresel katkısı sürdürülmüş; Eylül ayında 272.19 kg, Ekim ayında ise 279.85 kg CO₂ emisyonunun atmosfere salımı engellenmiştir. Bu değerler, sistemin sadece yaz aylarında değil, sonbaharda da çevresel fayda üretmeye devam ettiğini göstermektedir. Ancak kış mevsiminin yaklaşmasıyla birlikte üretim kapasitesi düşmeye başlamış, Kasım ayında 174.36 kg, Aralık ayında ise yalnızca 104.46 kg CO₂ önlenebilmiştir. Aralık ayı, yıl

boyunca kaydedilen en düşük CO₂ azaltımını ifade etmektedir ve bu da yılın bu dönemindeki düşük ışıınım seviyeleri ve kısa gün süresinin doğrudan bir sonucudur.

Yıllık toplam değerlendirildiğinde, sistemin 1 yıl boyunca toplamda 2812.76 kg CO₂ salımını engellediği görülmektedir. Sistem, yaklaşık 1 m² panel alanı başına yılda ortalama 142.1 kg CO₂ azaltımı sağlamaktadır. Bu bağlamda mevcut sistemin hem panel konfigürasyonu hem de yıl içindeki mevsimsel enerji üretim dengesi açısından çevresel sürdürülebilirliğe yüksek katkı sunduğu anlaşılmaktadır.

Sistem, yılda aylık ortalama 234.4 kg CO₂ emisyonu engelleyerek, yalnızca enerji üretim performansı açısından değil, aynı zamanda karbon ayak izini azaltma yönünden de oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır.



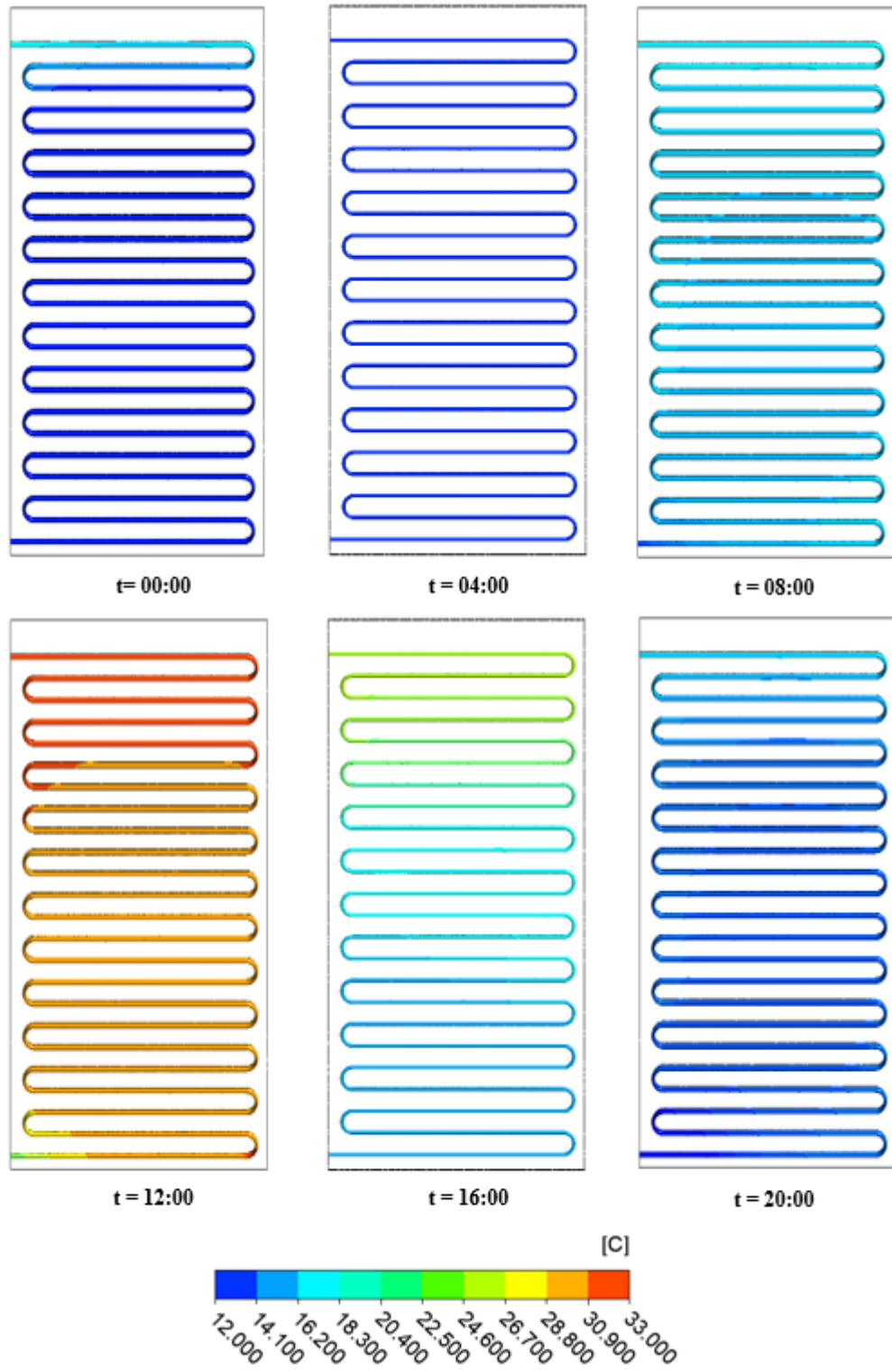
Şekil 4.35. Çevresel analize göre aylık önlenen CO₂ miktarına bağlı elde edilen tasarruf miktarı

Şekil 4.35, çevresel analiz kapsamında sistemin her ay atmosfere salınmasını engellediği t CO₂ miktarına karşılık gelen parasal tasarrufları detaylı olarak sunmaktadır. Bu değerlendirme, her ay yenilenebilir enerji üretimi sonucu elde edilen çevresel katkının, karbon salınımını önleme yoluyla sağladığı ekonomik faydaları göstermektedir. Sistem, yıl boyunca çeşitli oranlarda CO₂ salınımını engellemiş ve buna bağlı olarak her ay farklı düzeyde ekonomik kazanç sağlamıştır. Ocak ayında, düşük güneşlenme süresi nedeniyle sistemin performansı sınırlı kalmış ve yaklaşık 9.86 \$ düzeyinde karbon tasarrufu sağlanmıştır. Şubat ayında güneş ışıınımındaki artışa paralel olarak bu değer 14.60 \$'a yükselmiş, Mart ayında ise sistemin artan üretim kapasitesiyle birlikte 21.01 \$ seviyesine ulaşmıştır. Nisan ayında, mevsim geçişiyle birlikte üretimdeki nispi düşüşe bağlı

olarak karbon tasarrufu 16.66 \$ olarak hesaplanmıştır. Yılın daha yoğun güneş ışınlamına sahip dönemleri olan yaz aylarında ise sistemin çevresel katkısı önemli ölçüde artmıştır. Mayıs ayında karbon salımı önlenmesine bağlı olarak 21.97 \$, Haziran ayında 22.25 \$, Temmuz ayında 23.69 \$ ve Ağustos ayında 24.54 \$ düzeylerinde ekonomik fayda elde edilmiştir. Bu dört aylık dönem, sistemin çevreye en fazla katkı sağladığı ve en yüksek tasarrufların gerçekleştiği zaman aralığıdır.

Özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında kaydedilen değerler, sistemin optimum verimlilikte çalıştığını ve maksimum çevresel getiriyi sağladığını göstermektedir. Eylül ayında, mevsimsel değişimlerin başlamasıyla birlikte elde edilen tasarruf 21.23 \$ seviyesinde kalmış, ancak bu değer hâlâ yılın ilk çeyreğine göre oldukça yüksek düzeydedir. Ekim ayında sistem performansı yeniden artış göstererek 21.83 \$ tutarında karbon tasarrufu sağlamıştır. Sonbaharın ilerlemesiyle birlikte Kasım ayında bu değer 13.60 \$'a gerilemiş ve Aralık ayında en düşük seviyeye inerek 8.15 \$ olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, kış aylarında güneş ışınlamındaki azalma nedeniyle sistemin çevresel etkinliğinin doğal olarak düştüğünü ortaya koymaktadır.

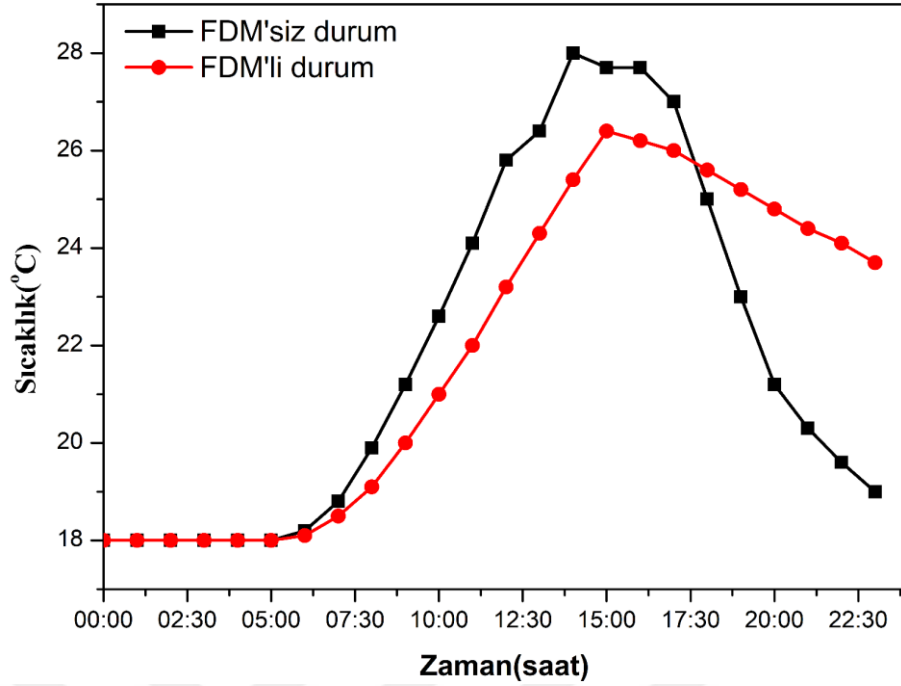
Yıl genelinde değerlendirildiğinde, sistemin toplamda 219.39 \$ düzeyinde karbon kaynaklı ekonomik tasarruf sağladığı görülmektedir. Bu değer, engellenen 2812.76 kg CO₂ salınımına karşılık gelmekte ve sistemin sadece enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkate değer bir katkı sunduğunu göstermektedir.



Şekil 4.36. Ekim ayında bir gün için PV/T panelde oluşan su sıcaklıklarının ısı eş eğrisi

Şekil 4.36’da, Ekim ayına ait tipik bir gün boyunca PV/T panel içerisinde geçen suyun saatlik sıcaklık dağılımı, ısı eş eğrileri aracılığıyla verilmiştir. Altı farklı zaman dilimi (00:00, 04:00, 08:00, 12:00, 16:00 ve 20:00) esas alınarak hazırlanan bu kontur haritaları, gün boyunca panelde dolaşan akışkanın (su) sıcaklık profilinin zamana bağlı nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Görsellerde sıcaklık değişimi renk skalası ile gösterilmiş olup, mavi tonlar daha düşük sıcaklıkları (12–20 °C), sarıdan kırmızıya geçiş ise daha yüksek sıcaklıkları (28–33 °C) temsil etmektedir. Gece saatlerine ait ilk iki görüntü olan $t = 00:00$ ve $t = 04:00$ zamanlarında sistemin dış ortam koşulları nedeniyle güneş ışınlamından faydalanamadığı ve dolayısıyla paneldeki su sıcaklıklarının düşük düzeylerde kaldığı gözlemlenmektedir. Her iki zaman diliminde de panel genelinde hâkim olan koyu mavi renk, su sıcaklığının büyük oranda 14 °C civarında olduğunu göstermektedir. Bu saatlerde güneşlenme etkisi bulunmadığından, PV/T panelin termal katkısı devre dışı kalmakta ve su sıcaklığı dış ortam sıcaklığına yaklaşmaktadır.

Sabah saatleri olan $t = 08:00$ zamanında ise, güneşin doğmasıyla birlikte panelin üst bölgesinde hafif bir sıcaklık artışı meydana geldiği görülmektedir. Renk skalasındaki açık mavi ve camgöbeği tonları, bu saatlerde su sıcaklığının ortalama 18–20 °C seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Bu artış, güneş ışınlamının yüzeye düşmeye başlamasıyla birlikte PV modüllerinden alınan ısı suya aktarılmaya başlandığını kanıtlamaktadır. Öğle saatlerinde, $t = 12:00$ zamanında ise, güneş ışınlamının en yoğun olduğu saat diliminde panel içerisindeki suyun belirgin şekilde ısındığı gözlemlenmektedir. Görselde yer alan sarı, turuncu ve kırmızı renkler panelin genelinde hâkim olup, sıcaklıkların birçok bölgede 30–33 °C seviyelerine ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, PV/T sistemin gün içerisindeki maksimum termal verimliliğe ulaştığı zaman aralığını temsil etmektedir. Özellikle panelin giriş noktasından çıkış noktasına kadar olan bölgede belirgin sıcaklık gradyeni gözlemlenmekte, bu da suyun panel boyunca enerji kazandığını göstermektedir. Öğleden sonra saatlerinde, $t = 16:00$ zamanında güneş ışınlamının azalmaya başlamasıyla birlikte panel içi su sıcaklıklarında düşüş başlamış ve renk dağılımı sarıdan tekrar açık mavi tonlara kaymıştır. Bu durum, sıcaklıkların ortalama 24–26 °C seviyelerinde sabitlendiğini göstermektedir. Yine de bu sıcaklıklar sabah saatlerine göre oldukça yüksektir ve sistemin gün sonuna kadar belirli bir termal üretim potansiyelini koruduğunu göstermektedir. Akşam saatlerinde $t = 20:00$ zamanında ise, güneş ışınlamı ortadan kalktığı için paneldeki su sıcaklıkları yeniden düşük düzeylere gerilemiş ve kontur çizgileri yeniden mavi tonlara dönmüştür. Bu saatlerde sistem, güneş enerjisi desteği olmadan çalıştığı için su sıcaklıkları 16–18 °C civarına inmiştir.



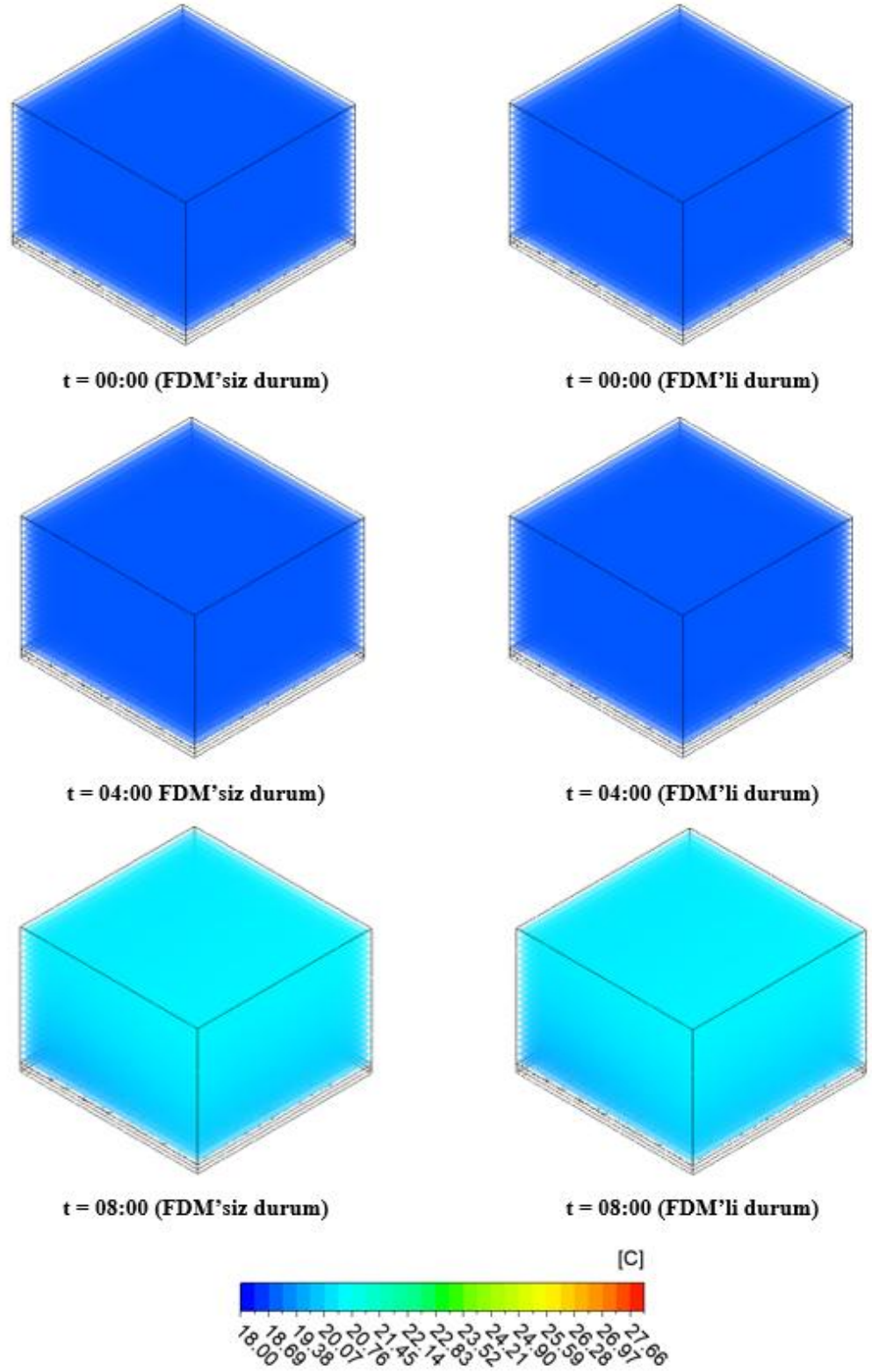
Şekil 4.37. Ekim ayında yerden ısıtma sisteminde FDM'nin oda sıcaklığına etkisi

Şekil 4.37'de, Ekim ayında bir gün boyunca FDM entegre edilmiş ve edilmemiş yerden ısıtma sistemlerinin oluşturduğu iç ortam sıcaklıklarının saatlik değişimleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu grafik, FDM'nin ısı konfor üzerindeki etkisini saatlik bazda oldukça net şekilde ortaya koymaktadır. Gece saatlerinde (00:00–06:00) her iki sistemde de oda sıcaklığı yaklaşık 18 °C düzeyinde sabit seyretmektedir. Bu saat aralığında güneş ışıınımı bulunmadığından, PVT panelden herhangi bir termal enerji girişi gerçekleşmemekte, dolayısıyla FDM'li sistemde de gizli ısı salınımı başlamamaktadır. Bu nedenle iki sistem arasındaki sıcaklık farkı bu zaman diliminde ihmal edilebilir düzeydedir. Sabah 06:00'dan itibaren güneş ışıınımının artmasıyla birlikte hem PVT panelden enerji toplanmaya başlanmakta hem de FDM'nin erime süreci devreye girmektedir. Saat 07:00 itibarıyla sıcaklık değerleri artış göstermeye başlar. FDM'siz sistemde sıcaklık daha hızlı yükselirken, FDM'li sistemde bu artış daha yavaş gerçekleşmiştir. Bu durum, FDM'nin gelen enerjiyi doğrudan ortama iletmek yerine önce kendi bünyesinde depolayarak sıcaklık artışını sınırlamasından kaynaklanmaktadır. Saat 14:00'te, FDM'siz sistem 28.0 °C ile maksimum sıcaklığa ulaşırken, FDM'li sistem 25.4 °C ile daha düşük ancak dengeli bir sıcaklık seviyesi sergilemiştir. Bu iki sistem arasındaki fark bu saat diliminde 2.6 °C'ye ulaşmış ve FDM'nin ortamı aşırı ısınmaya karşı koruyucu etkisi açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu sayede termal konfor aşırı sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalmadan sağlanabilmiştir.

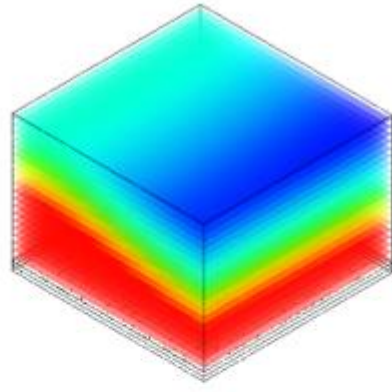
Günün ilerleyen saatlerinde, yani 15:00 sonrasında güneş ışıınımı azalmaya başlasa da FDM'li sistem, gündüz saatlerinde erime sürecinde depoladığı gizli ısıyı ortama geri vermeye başlamıştır. Bu nedenle FDM'li sistemin sıcaklık profili FDM'siz sistemin aksine daha yavaş

düşmüş, daha uzun süre konfor aralığında kalmıştır. Özellikle saat 18:00 sonrası FDM'siz sistemde sıcaklık 25 °C seviyesine düşerken, FDM'li sistemde sıcaklık 25.6 °C düzeyine çıkarak onu aşmıştır. Bu eğilim akşam boyunca devam etmiş, 22:00 itibarıyla FDM'siz sistemin sıcaklığı 19.6 °C'ye gerilerken FDM'li sistem 24.1 °C sıcaklık sağlamaya devam etmiştir. Gün sonu olan 23:00'te ise fark maksimuma ulaşmış; FDM'siz sistem 19.0 °C'de kalırken, FDM'li sistem 23.7 °C seviyesindedir. Bu da FDM'li sistemin, geç saatlerde yaklaşık 4.7 °C daha yüksek sıcaklık sağlayabildiğini göstermektedir.

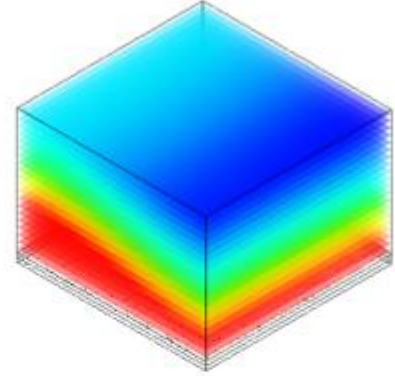
Bu bulgular, FDM'nin gündüz saatlerinde aşırı sıcaklık yükselmelerini önleme, gece saatlerinde ise ortam sıcaklığını daha uzun süre belirli bir konfor seviyesinde tutma yeteneğini açıkça ortaya koymaktadır. FDM'nin bu özelliği, özellikle ısı konforun gece boyunca korunması gereken uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Konvansiyonel sistemlerde güneş enerjisinin sona ermesiyle birlikte ortam sıcaklığı hızla düşerken, FDM içeren sistemlerde depolanan enerji kademeli şekilde ortama salınarak ani sıcaklık düşüşlerinin önüne geçilmekte ve daha kararlı bir iç ortam elde edilmektedir. Sonuç olarak, FDM entegrasyonu, yalnızca enerji depolama işleviyle değil, aynı zamanda gündüz-aşam dengesi sağlayarak sıcaklık dalgalanmalarını azaltma ve kullanıcı konforunu artırma bakımından önemli bir ısı dengeleyici unsur olarak öne çıkmaktadır.



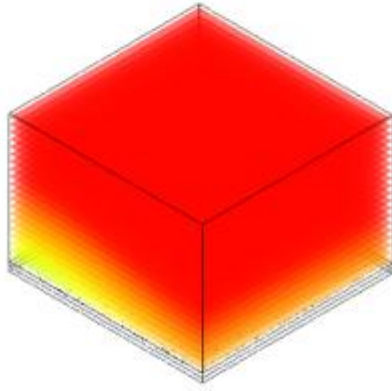
Şekil 4.38. Saat 00:00 ile 04:00 arasında FDM'li durum ve FDM'siz durum için oda sıcaklıklarının değişimi



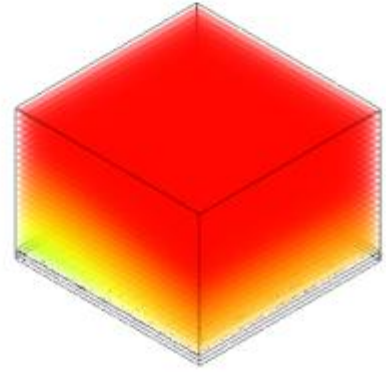
t = 12:00 (FDM'siz durum)



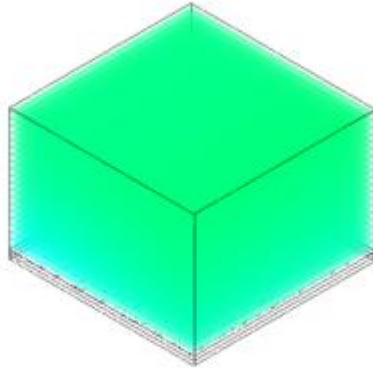
t = 12:00 (FDM'li durum)



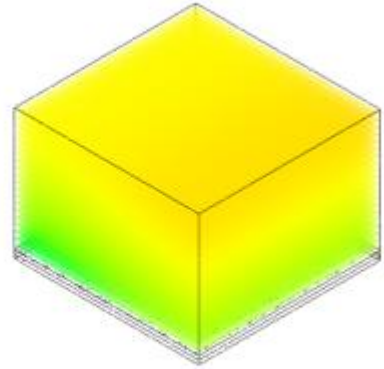
t = 16:00 FDM'siz durum)



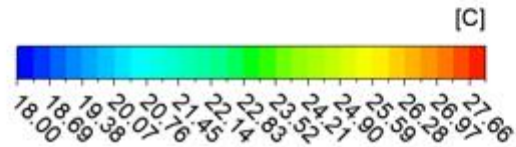
t = 16:00 (FDM'li durum)



t = 20:00 (FDM'siz durum)



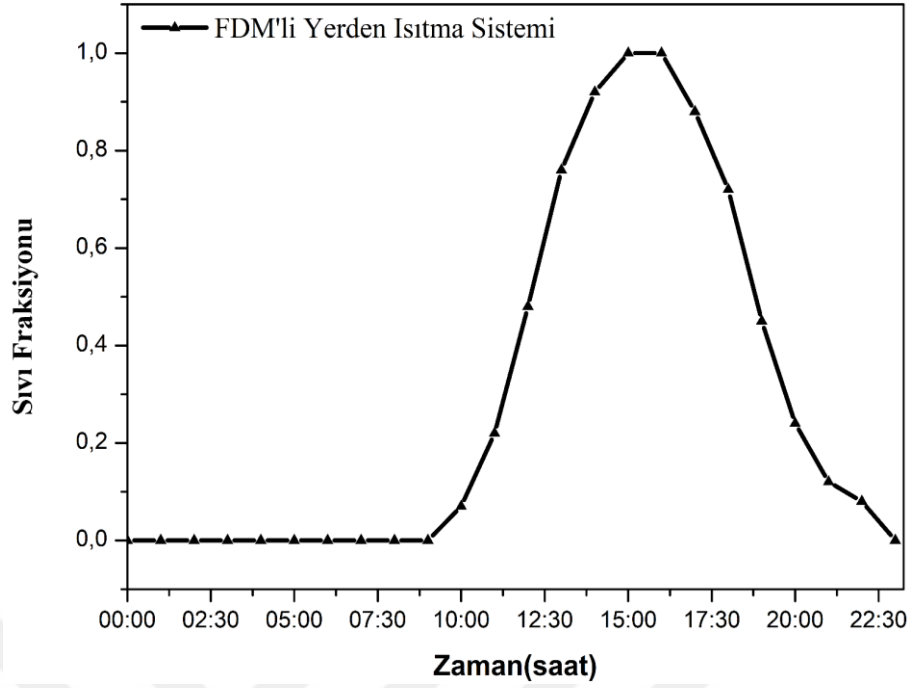
t = 20:00 (FDM'li durum)



Şekil 4.39. Saat 12:00 ile 20:00 arasında FDM'li durum ve FDM'siz durum için oda sıcaklıklarının değişimi

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da, Ekim ayına ait bir gün boyunca FDM’li ve FDM’siz durumlar için odada oluşan sıcaklıkların belirli saatler için üç boyutlu sıcaklık eş eğrileri verilmiştir. Günün erken saatleri olan 00:00, 04:00 ve 08:00 zamanlarında her iki durumda da düşük sıcaklık seviyeleri hâkimdir. Özellikle 00:00 ve 04:00 saatlerinde oda içerisindeki sıcaklık dağılımı neredeyse homojen ve mavi renk aralığında olup 18 °C civarındadır. Bu saatlerde iki sistem arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Saat 08:00’e gelindiğinde, her iki durumda da sıcaklığın artmaya başladığı ve izotermal dağılımın daha açık renklere kaydığı görülmektedir. Buna karşın FDM’li durumda sıcaklık artışı daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. Öğle saatlerinde (12:00 ve 16:00) odadaki sıcaklık dağılımında belirgin farklar oluşmuştur.

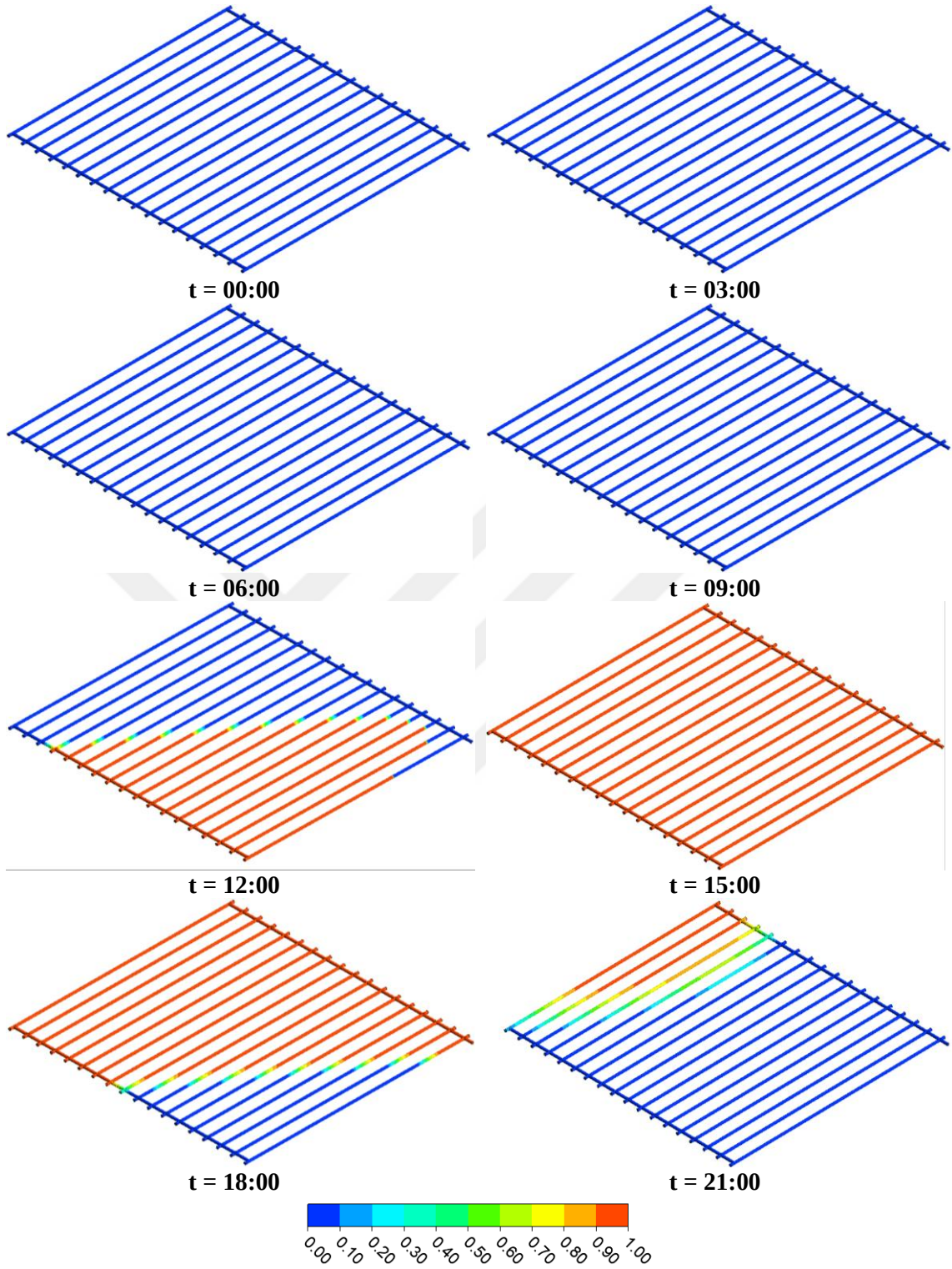
FDM’siz durumda, oda alt kısımlarında sıcaklık 30 °C’ye kadar ulaşmış; üst hacimlere çıkıldıkça sıcaklık düşmüştür. Öte yandan FDM’li durumda sıcaklık 26–28 °C seviyelerinde kalmış; sıcaklık dağılımı ise daha izotermal bir yapı sergilemiştir. Bu da FDM’nin öğle saatlerinde yerden ısıtma sisteminden gelen su sıcaklığını diğer duruma göre hapsettiğini göstermekte olup FDM’siz duruma göre iç ortam sıcaklığının daha düşük olduğunu göstermektedir. Saat 20:00’de ise sistemler arasında tersine bir fark ortaya çıkmıştır. FDM’siz sistemde sıcaklık hızlı bir şekilde düşmüş ve oda genelinde soğuma başlamıştır. Ancak FDM’li durumda, FDM gün içinde depoladığı ısıyı serbest bırakarak oda sıcaklığını daha uzun süre korumuştur. Bu nedenle, FDM’li sistemin sıcaklık dağılımı hâlen daha sıcak ve dengeli bir görünüm sergilemektedir. Gün boyunca FDM’siz sistemde sıcaklık değişimleri daha ani ve geniş aralıklı gerçekleşirken, FDM’li sistemde sıcaklık değişimi daha kontrollü ve dengelidir. Bu durum, FDM’nin gün ortasında sıcaklık artışlarını sınırlama ve akşam saatlerinde ısı salınımıyla ortamı ılımlı tutma göstermektedir.



Şekil 4.40. Sayısal çalışmada Ekim ayında FDM’li yerden ısıtma sisteminde bulunan FDM’nin zamana bağlı olarak sıvı fraksiyonu

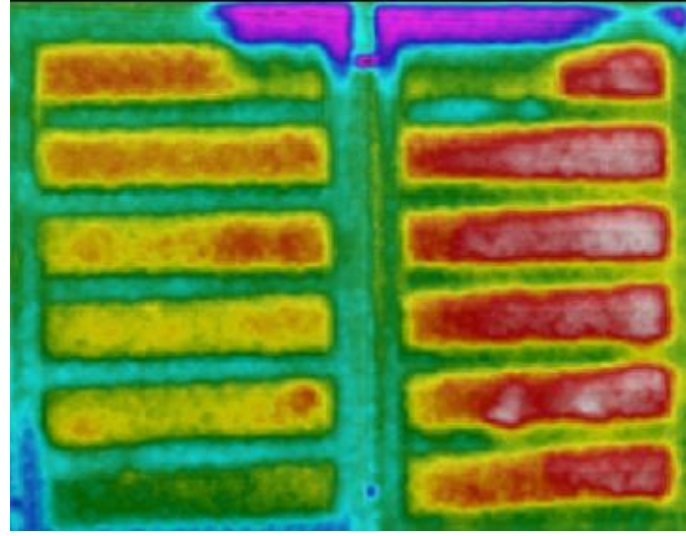
Şekil 4.40, sayısal analiz kapsamında Ekim ayında FDM’li yerden ısıtma sisteminde bulunan faz değişim malzemesinin (FDM) zamana bağlı olarak gösterdiği sıvı fraksiyonu değişimini sunmaktadır. Sıvı fraksiyonu, 0 ile 1 arasında değer alan boyutsuz bir nicelik olup, 0 değeri FDM’nin tamamen katı fazda olduğunu, 1 değeri ise tamamen sıvı faza geçtiğini ifade etmektedir. Bu gösterim, FDM’nin gün boyunca ne zaman enerji depoladığı (erime fazı) ve ne zaman bu enerjiyi geri saldırdığı (katılaşma fazı) hakkında doğrudan bilgi verir. Gece saatlerinden sabah 09:00’a kadar olan zaman diliminde sıvı fraksiyonu değeri 0 olarak sabit kalmıştır. Bu durum, sistemin bu zaman aralığında düşük çevresel sıcaklıklara maruz kaldığını ve bu nedenle FDM’nin tamamıyla katı fazda bulunduğunu göstermektedir. FDM’nin bu safhalarda herhangi bir faz geçişine uğramadığı ve güneş enerjisinden gelen ısı girdisinin malzemeyi eritecek düzeyde olmadığı anlaşılmaktadır. Bu da, sabah erken saatlerde sistemin sadece düşük sıcaklıkta çalıştığını ve ısı depolama potansiyelinin henüz devreye girmediğini göstermektedir. Saat 10:00 itibarıyla sıvı fraksiyonu değeri 0.07’ye yükselmiş, bu da FDM’nin erime sürecine başladığını ve dış ortamdan alınan enerjinin artık faz geçişini başlatacak seviyeye ulaştığını göstermektedir. Bu saatten sonra güneşlenmenin artmasıyla birlikte FDM’nin enerji absorpsiyonu hızlanmış ve saat 11:00’de sıvı fraksiyonu 0.22, 12:00’de 0.48, 13:00’te 0.76 ve 14:00’te 0.92’ye kadar çıkmıştır. Bu artış, PV/T panelden gelen ısı enerjinin giderek yükseldiğini ve sistemdeki sıcaklık seviyesinin FDM’nin erime sıcaklığının üzerinde kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Sıvı fraksiyonundaki bu hızlı yükseliş, FDM’nin büyük bir bölümünün sıvı faza geçtiğini ve maksimum ısı depolama

kapasitesine yaklaştığını göstermektedir. Saat 15:00 ve 16:00 arasında sıvı fraksiyonu değeri 1.00 seviyesine ulaşarak FDM'nin tamamen sıvı hâle geçtiğini ortaya koymaktadır. Bu noktada, faz değişim malzemesi tümüyle enerji depolamış durumdadır ve bu enerji, ilerleyen saatlerde ortam sıcaklığı azaldıkça geri salınacaktır. FDM'nin bu maksimum sıvı faz durumuna ulaşması, sistemin güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlandığını ve güneşlenme koşullarının yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir. Günün ilerleyen saatlerinde, özellikle 17:00 sonrasında güneş ışınımının azalmasıyla birlikte sistemdeki sıcaklık da azalmaya başlamış, bunun sonucunda FDM sıvı fazdan tekrar katı faza dönüşmeye başlamıştır. Bu dönüşüm süreci sırasında sıvı fraksiyonu 17:00'de 0.88, 18:00'de 0.72, 19:00'da 0.45, 20:00'de 0.24, 21:00'de 0.12 ve 22:00'de 0.08 olarak ölçülmüştür. Bu düşüş, FDM'nin depolamış olduğu ısı enerjisiyi kontrollü bir şekilde ortama saldırdığını ve bu sayede sistemin termal stabilitesini koruduğunu göstermektedir. Saat 23:00 itibarıyla sıvı fraksiyonu tekrar 0'a düşerek faz değişim malzemesinin tamamen katı hâle döndüğünü ifade etmektedir.



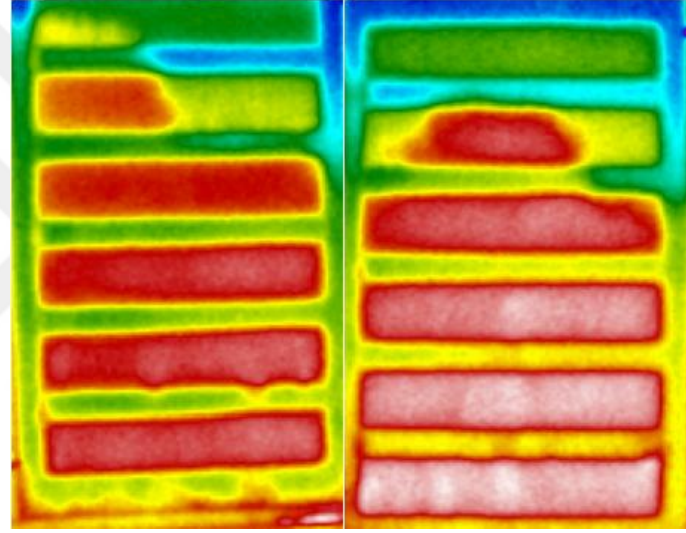
Şekil 4.41. Sayısal çalışmada Ekim ayında FDM'li yerden ısıtma sisteminde bulunan FDM'nin zamana bağlı olarak sıvı fraksiyon eş eğrileri

Şekil 4.41, FDM destekli yerden ısıtma sisteminde kullanılan FDM'nin gün boyunca zamana bağlı sıvı fraksiyonu değişimini göstermektedir. Bu dağılım, sistemin Elazığ iklim koşullarında Ekim ayı itibarıyla örnek bir günde gösterdiği termal tepkimeyi yansıtmaktadır. FDM'nin termal davranışı, doğrudan PV/T kolektörlerinden elde edilen sıcak suyun sıcaklık profiline bağlı olarak şekillenmiştir. PV/T kolektörlerinden gelen sıcak su, özellikle günün güneşlenme potansiyelinin yüksek olduğu öğle saatlerinde yükselmiş ve bu durum, FDM'nin erimesine neden olmuştur. Gece saatlerinden sabahın erken saatlerine kadar (00:00–09:00), dış ortam sıcaklığının düşük olması ve PV/T sisteminden sıcak su akışının olmaması nedeniyle FDM tamamen katı fazda kalmış, bu saat aralığında sıvı fraksiyonu sabit olarak 0 değerinde seyretmiştir. Güneşlenmenin başlaması ve PV/T çıkış sıcaklığının artışıyla birlikte saat 10:00 itibarıyla FDM'nin erime süreci başlamış, bu saatten itibaren sıvı fraksiyonu artış göstermiştir. Saat 12:00–14:00 arasında PV/T çıkış sıcaklığı maksimum düzeye ulaşmış ve bu yüksek sıcaklık sayesinde FDM'nin tamamen erimesi gerçekleşmiştir. Bu saatlerde sıvı fraksiyonu 1.00 olarak ölçülmüş; yani FDM'nin tamamı sıvı faza geçmiş ve sistem maksimum ısı depolama kapasitesine ulaşmıştır. Öğleden sonra güneş ışınımının azalması ile birlikte PV/T çıkış sıcaklığı düşmeye başlamış ve bu durum, FDM'nin yeniden katılaşma sürecine girmesine neden olmuştur. FDM'nin bu şekilde kontrollü olarak erimesi ve katılaşması, binada ek enerji girişi olmaksızın iç ortam sıcaklığını korumakta ve geçiş mevsimlerinde ek ısıtma ihtiyacını ortadan kaldırmaya yardımcı olduğu görülmektedir.



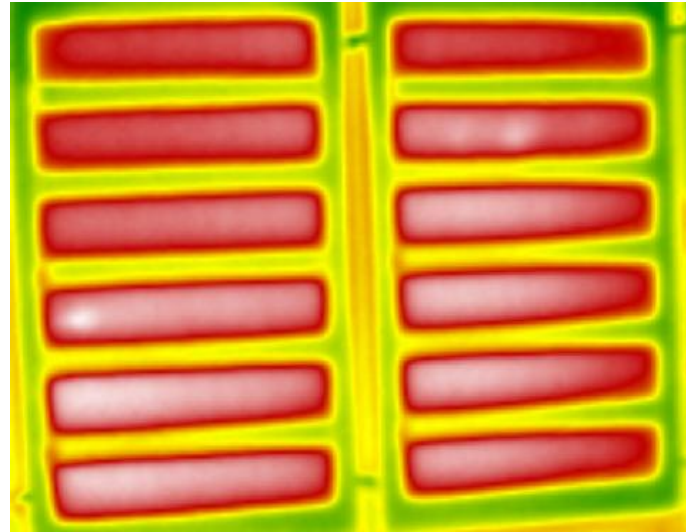
Maksimum:36,0
Ortalama:33,1
Minimum:28,0

t = 09:00



Maksimum:52,1
Ortalama:46,6
Minimum:36,7

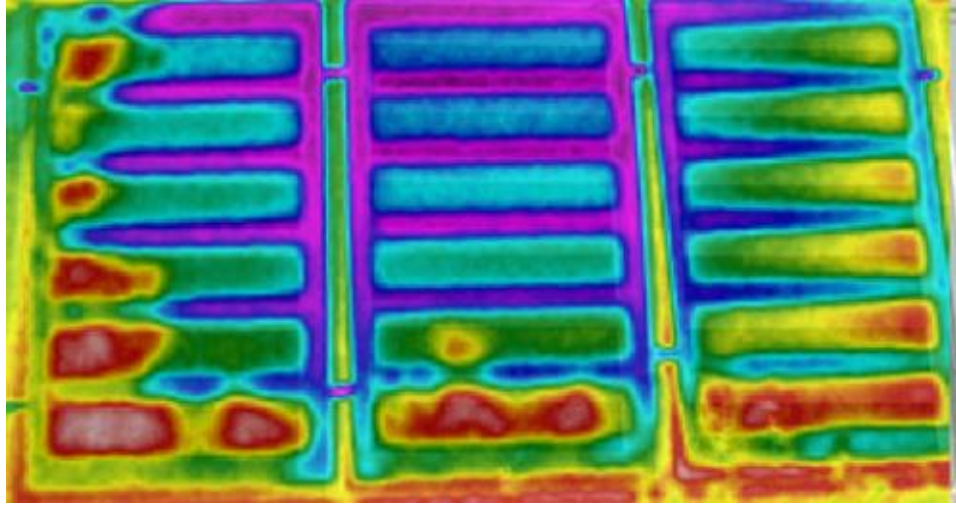
t = 13:00



Maksimum:76,1
Ortalama:62,3
Minimum:37,3

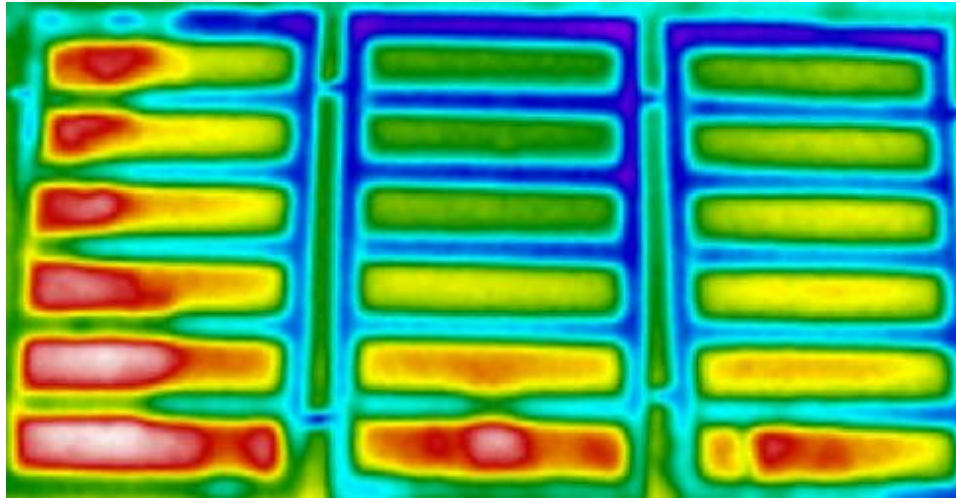
t = 17:00

Şekil 4.42. Temmuz ayında batı cephede bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri



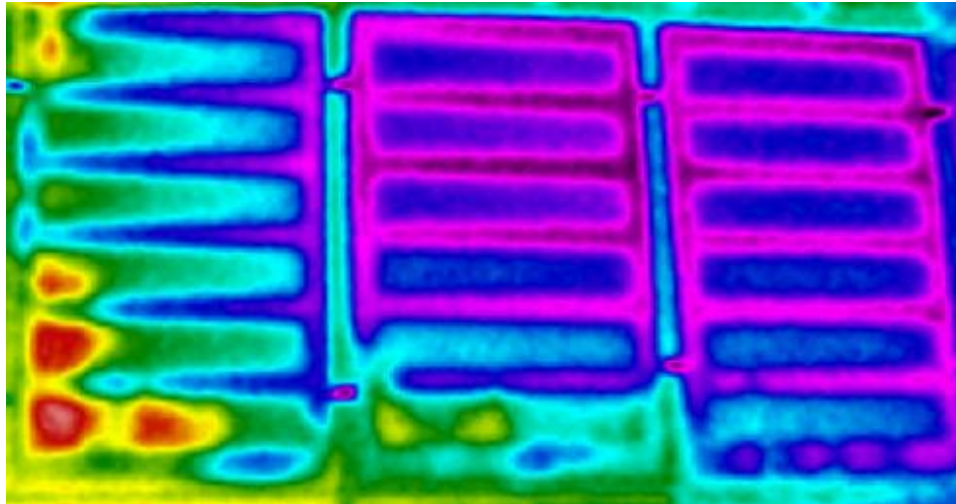
Maksimum:38,7
Ortalama:33,5
Minimum:28,4

t = 09:00



Maksimum:55,6
Ortalama:46,3
Minimum:38,5

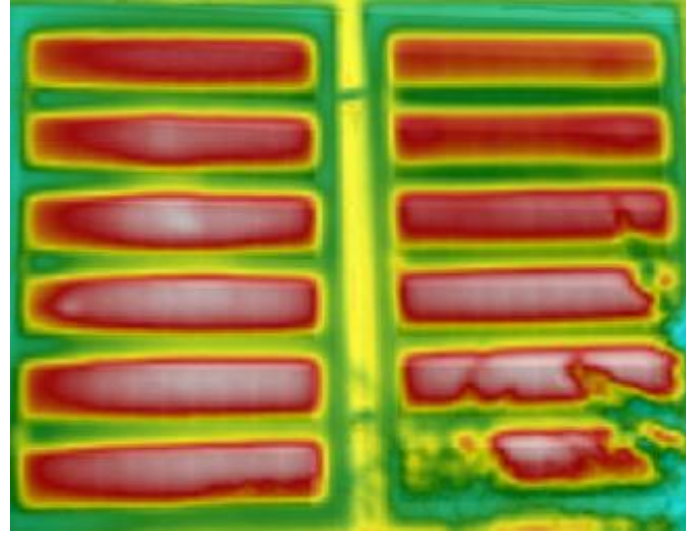
t = 13:00



Maksimum:48,3
Ortalama:39,6
Minimum:34,5

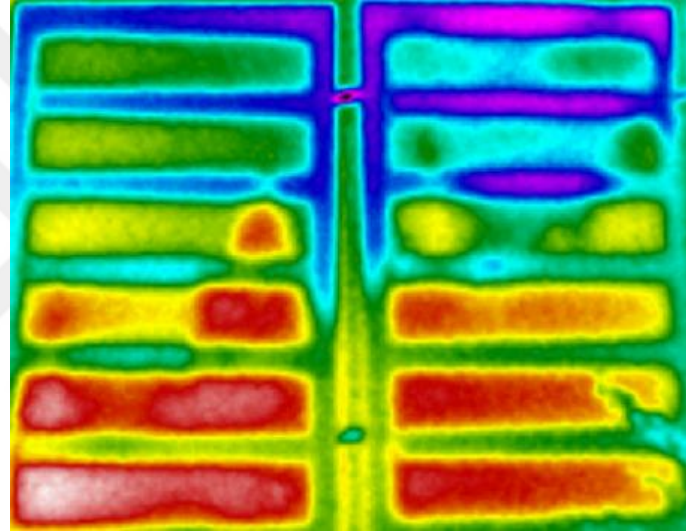
t = 17:00

Şekil 4.43. Temmuz ayında güney cephede bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri



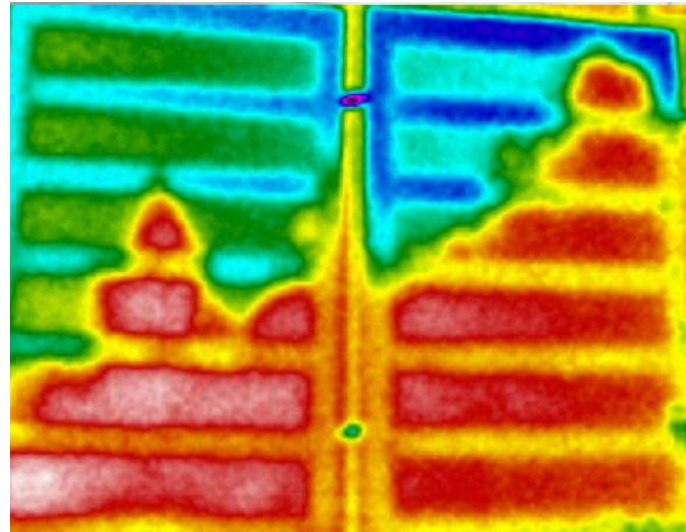
Maksimum:70,9
Ortalama:56,1
Minimum:37,2

t = 09:00



Maksimum:48,8
Ortalama:42,6
Minimum:33,8

t = 13:00



Maksimum:41,2
Ortalama:37,2
Minimum:28,7

t = 17:00

Şekil 4.44. Temmuz ayında doğu cephe de bulunan yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri

Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44'te Temmuz ayına ait batı, güney ve doğu cephelerine entegre edilen yarı saydam PV panellerin gün içerisindeki termal davranışları, termal kamera görüntüleriyle gösterilmiştir. Bu görseller, PV sistemlerinin maruz kaldığı güneşlenme süresi ve cephe yönelimiyle ilişkili olarak sıcaklık dağılımlarının değişimini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 4.42'de Temmuz ayına ait batı cephesine entegre edilen yarı saydam PV panellerin termal kamera görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerden de anlaşılacağı üzere, sabah saatlerinde panellerin sıcaklık dağılımı oldukça düşüktür; saat 09:00'da ortalama sıcaklık 33.1 °C olarak ölçülmüştür. Güneş ışıının etkisiyle öğleden sonraya doğru sıcaklıklar hızlı bir şekilde artmış, 13:00'te ortalama 46.6 °C'ye, 17:00'de ise ortalama 62.3 °C'ye ulaşmıştır. Maksimum sıcaklık ise bu saat diliminde 76.1 °C olarak kaydedilmiştir. Bu durum, batı cephesinin öğleden sonra yoğun güneş ışıının maruz kaldığını göstermektedir.

Şekil 4.43'te güney cephesine ait yarı saydam PV panellerin gün içerisindeki termal davranışı yer almaktadır. Güneş ışıının gün boyu daha homojen bir şekilde cepheye ulaşması sayesinde, sıcaklık değişimleri daha dengeli gerçekleşmiştir. Sabah 09:00'da ortalama sıcaklık 33.5 °C iken, öğle saatlerinde bu değer 46.3 °C'ye çıkmış, 17:00'de ise 39.6 °C'ye düşmüştür. Güneşlenme süresinin uzun olması bu cephedeki panellerin gün boyunca daha istikrarlı bir sıcaklık profiline sahip olmasını sağlamıştır.

Şekil 4.44'te doğu cephesine entegre edilen yarı saydam PV panellerin termal görüntüleri incelenmektedir. Sabah saatlerinde doğrudan güneş ışıının maruz kalan doğu cephesinde sıcaklıklar erken saatlerde hızlıca yükselmiştir. 09:00'da ortalama sıcaklık 56.1 °C, maksimum sıcaklık ise 70.9 °C olarak kaydedilmiştir. Öğleden sonra güneş ışıının etkisini kaybetmesiyle birlikte 13:00'te ortalama sıcaklık 42.6 °C'ye, 17:00'de ise 37.2 °C'ye düşmüştür. Bu üç farklı cepheye ait termal kamera görüntüleri, cephe yöneliminin yarı saydam PV panellerin yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Batı cephesinde öğleden sonra, doğu cephesinde sabah saatlerinde yüksek sıcaklıklar gözlemlenirken, güney cephesinde daha dengeli bir sıcaklık dağılımı oluşmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, nSEB konseptine uygun şekilde tasarlanan ve inşa edilen deneysel bir yapının, binaya entegre yarı saydam PV paneller, PV/T kolektörler ve FDM destekli yerden ısıtma sistemlerinden oluşan hibrit enerji sisteminin bir yıllık deneysel ve sayısal performansı analiz edilmiştir. Gerek elektrik gerekse ısı enerjisi üretimi açısından sistemin verimliliği, enerji öz yeterliliği, termodinamik kalitesi (ekserji), ekonomik geri dönüşleri ve çevresel etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca sistemin iç mekân konforuna katkısı da zamana bağlı sıcaklık ölçümleri ve sayısal simülasyonlarla ortaya konmuştur.

- Sistemin bir yıl boyunca ürettiği toplam elektrik enerjisi 4335.81 kWh, yıllık tüketim değeri ise 3033.5 kWh olarak ölçülmüştür. Bu verilere göre sistemin yıllık elektriksel öz yeterlilik oranı %142.93 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, sistemin yıllık elektrik ihtiyacının tamamını karşıladığını ve yaklaşık %43 oranında fazla üretimle şebekeye geri besleme yapabilecek kapasitede olduğunu göstermektedir. Aylık bazda en yüksek öz yeterlilik Temmuz (%134) ve Ağustos (%138) aylarında gerçekleşmiş, Aralık ve Ocak aylarında üretim tüketimi karşılayamamıştır. Bu da sistemin yılın 10 ayında tüketimden fazla üretim yaptığını, yalnızca kışın minimum ısıtım koşullarında dış enerji desteğine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur.
- Toplamda 4335.81 kWh elektrik ve 8671 kWh ısı enerjisi üretilmiştir. Elektrik üretiminde en yüksek değer Temmuz'da (467.27 kWh), en düşük değer Aralık'ta (160.7125 kWh) kaydedilmiştir. Bu fark yaklaşık %130 olup, güneşlenme süresi, ısıtım değeri ve panel sıcaklık farklarının üretim performansı üzerindeki güçlü etkisini göstermektedir. PV/T sistem ısı üretimi açısından yazın 60 °C'ye yakın çıkış sıcaklıklarına ulaşmış, kışın ise daha düşük sıcaklıklarda kalmıştır.
- PV panellerin ortalama yıllık elektriksel verimi %7.45 olarak hesaplanmış; bu oran Temmuz'da %8.58 ile zirve yapmış, Aralık'ta ise %5.42 ile en düşük değeri almıştır. PV/T sistemlerde ise ortalama olarak %13.9 elektriksel, %35.4 ısı, %49.3 toplam verim elde edilmiştir. Toplam verimlilik Temmuz'da %80.88 ile maksimuma, Aralık'ta %38.88 ile minimuma ulaşmıştır.
- Yıllık ısıtım profiline göre, en yüksek anlık ısıtım 1100 W/m² (Temmuz), en düşük ise 600–650 W/m² (Ocak-Aralık) olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, dış ortam sıcaklığı yazın 34 °C'ye kadar, kışın ise -1 °C'ye kadar düşmüştür. Bu fark, PV/T çıkış sıcaklıklarını, FDM'nin faz geçiş performansını ve enerji üretim dengesini doğrudan etkilemiştir.

- PV sistemin ortalama ekserji verimi %6.89, PV/T için elektriksel %13.9, ısı %9.4, toplamda ise en yüksek %40.07 (Temmuz), en düşük %23.51 (Aralık) olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemin sadece enerji üretmekle kalmayıp, yüksek iş yapabilir enerji (kaliteli enerji) sağladığını da göstermektedir.
- Yerden ısıtma sistemine entegre FDM, gündüz saatlerinde eriyerek enerji depolamış, gece ise donarken bu enerjiyi ortama salarak iç ortam sıcaklığını korumuştur. Ekim ayına ait yapılan sayısal analizlerde, FDM'li sistemin gece boyunca iç ortam sıcaklığını FDM'siz duruma kıyasla ortalama yaklaşık 3,5-4 °C daha yüksek tuttuğu belirlenmiştir.
- Kış aylarında menfezler kapatılmış cephe PV panellerinin arkasındaki ara hava sıcaklıkları, kış aylarında dış ortama göre 5-8 °C daha yüksek ölçülmüştür. Bu pasif ısı kazancı, iç ortama aktararak bina ısıtma yükünü azaltmıştır. Yaz aylarında menfezlerin açılması ile aşırı ısınma engellenmiştir.
- Ekserjiye dayalı enerji geri ödeme süresi 3.18 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu süre sonunda sistem, üretimiyle tüm kurulumda harcanan enerjiyi telafi etmektedir. FGÖ ise 8.9 yıl olup, sistemin yatırım maliyetinin yaklaşık 9 yılda amorti edildiği anlamına gelmektedir.
- EÜF yıllık bazda %32 olarak bulunmuş, yani sistem yılda gömülü enerjisinin %32'sini üretmektedir.
- Yaşam boyu EÜF = %6.3 olarak bulunmuş, yani 20 yılda sistem, ilk üretiminde harcanan enerjinin 6.3 katını üretmektedir.
- YDDV = %11.23 olarak bulunmuş, yani 20 yıl boyunca alınan tüm güneş enerjisinin %11.23'ü işe dönüşebilir (ekserji) enerjiye çevrilmiştir.
- YEM, sistemin ürettiği 1 kWh enerjinin kaç dolara mal olduğunu gösterir. Bu çalışmada: %5 faiz – 20 yıl kullanım senaryosunda YEM: 0.097 \$/kWh, %20 faiz 5 yıl kullanım senaryosunda YEM: 0.402 \$/kWh olarak bulunmuştur. Bu da sistemin uzun vadeli kullanımlarda ekonomik olarak çok daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.
- CO₂ azaltımı, sistemin yenilenebilir kaynaklı enerji üretmesi sayesinde yıllık toplamda 2812.76 kg CO₂ emisyonunun önlenmesini sağlamıştır. Bu miktar, yaklaşık 3 ton/yıl karbon salımının engellendiğini göstermektedir. Panel yüzey alanına göre CO₂ azaltımı, ortalama 142.1 kg/m²/yıl olarak hesaplanmıştır. Çevresel katkı değeri 219.39 USD/yıl olarak hesaplanmıştır.

ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve analiz edilen PV, PV/T ve FDM entegreli hibrit enerji sistemi, nSEB konsepti açısından oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak sistemin daha da geliştirilmesi, farklı iklim koşullarına uygulanabilirliğinin artırılması ve sürdürülebilir bina teknolojilerinin yaygınlaştırılması amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Kış aylarında cephe PV panellerinin arkasındaki ara hava boşluğu, iç ortama pasif ısı aktarımında etkili olmuştur. Bu etki, güneşe bakan yüzeylerde daha belirgindir. Bu nedenle, cephe sistemlerine düşük maliyetli termal geçiş panelleri, ısı borulu ara yüzeyler veya ısı geri kazanım menfezleri entegre edilerek pasif ısı kazancı daha da iyileştirilebilir.
- Kullanılan RT22HC gibi organik FDM'ler düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Gelecek çalışmalarda nano katkılı FDM'ler ile sistemin tepki süresi ve depolama verimliliği artırılabilir.
- Bu tezde kullanılan sistem, karasal iklimde test edilmiştir. Özellikle nemli ve rüzgarlı bölgelerde PV sıcaklığı daha düşük olacağı için elektrik verimi artabilir, ancak ısı üretimi düşebilir. Bu nedenle Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde sistemin simülasyon çalışmaları yapılabilir.
- Sistemin yıl boyu katkısını sürdürebilmesi için duvar ya da tavan içi FDM yerleşimleriyle alternatif çözümler denenebilir.
- Deney seti verileri kullanılarak yapay zeka entegreli çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] B.H. Lange, A Message from the Executive Director, SMPTE Motion Imaging J. 130 (2021) 6. <https://doi.org/10.5594/JMI.2021.3057266>.
- [2] E. Mıhlayanlar, S. Meral, Mevcut Binalarda Enerji Verimli Yenileme ve EKB Uygulaması, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilim. Derg. 9 (2023) 478–497. <https://doi.org/10.34186/klujes.1379762>.
- [3] Emissions Trends and Drivers, in: Clim. Chang. 2022 - Mitig. Clim. Chang., Cambridge University Press, 2023: pp. 215–294. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.004>.
- [4] H. Elarga, F. Goia, A. Zarrella, A. Dal Monte, E. Benini, Thermal and electrical performance of an integrated PV-PCM system in double skin façades: A numerical study, Sol. Energy 136 (2016) 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.074>.
- [5] K. Kant, R. Pitchumani, A. Shukla, A. Sharma, Analysis and design of air ventilated building integrated photovoltaic (BIPV) system incorporating phase change materials, Energy Convers. Manag. 196 (2019) 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.073>.
- [6] G. Guldentops, S. Van Dessel, A numerical and experimental study of a cellular passive solar façade system for building thermal control, Sol. Energy 149 (2017) 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.078>.
- [7] O. Sotehi, A. Chaker, C. Maalouf, Hybrid PV/T water solar collector for net zero energy building and fresh water production: A theoretical approach, Desalination 385 (2016) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.034>.
- [8] E. Bigaila, A.K. Athienitis, Modeling and simulation of a photovoltaic/thermal air collector assisting a façade integrated small scale heat pump with radiant PCM panel, Energy Build. 149 (2017) 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.045>.
- [9] M. Li, T. Ma, J. Liu, H. Li, Y. Xu, W. Gu, L. Shen, Numerical and experimental investigation of precast concrete facade integrated with solar photovoltaic panels, Appl. Energy 253 (2019) 113509. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113509>.
- [10] C. Arkar, T. Žizak, S. Domjan, S. Medved, Dynamic parametric models for the holistic evaluation of semi-transparent photovoltaic/thermal façade with latent storage inserts, Appl. Energy 280 (2020) 115994. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115994>.
- [11] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo, Passive and active performance assessment of building integrated hybrid solar photovoltaic/thermal collector prototypes: Energy, comfort, and economic analyses, Energy 209 (2020) 118435. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118435>.
- [12] G. Yu, H. Yang, Z. Yan, M. Kyeredey Ansah, A review of designs and performance of

- façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems, *Appl. Therm. Eng.* 182 (2021) 116081. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116081>.
- [13] F. Ascione, N. Bianco, T. Iovane, M. Mastellone, G.M. Mauro, The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review, *Sol. Energy* 224 (2021) 703–717. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.035>.
- [14] R. Hickel, Contribution à l'exploration radiologique des vertèbres lombaires agrandies et des quatre derniers interlignes vertébraux sur un seul film., *Presse Med.* 63 (1955) 619.
- [15] European Commission, Green Paper - A 2030 framework for climate and energy policies, COM(2013) 169 Final (2013) 1–16. http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/documentation_en.htm.
- [16] X. Cao, X. Dai, J. Liu, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128 (2016) 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.
- [17] M. Caldera, S.P. Corgnati, M. Filippi, Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings, *Energy Build.* 40 (2008) 1972–1983. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.005>.
- [18] A. Kasaeian, H. Sarrafha, Solar energy systems: An approach to zero energy buildings, Elsevier Inc., 2021. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821221-9.00003-7>.
- [19] J. Zuo, Z.Y. Zhao, Green building research-current status and future agenda: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30 (2014) 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021>.
- [20] L. Wells, B. Rismanchi, L. Aye, A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context, *Energy Build.* 158 (2018) 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.055>.
- [21] S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai, How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research, *Energy* 71 (2014) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.007>.
- [22] D. D'Agostino, L. Mazzarella, What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions, *J. Build. Eng.* 21 (2019) 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.019>.
- [23] W. Feng, Q. Zhang, H. Ji, R. Wang, N. Zhou, Q. Ye, B. Hao, Y. Li, D. Luo, S.S.Y. Lau, A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 114 (2019) 109303. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109303>.
- [24] S. Attia, E. Gratia, A. De Herde, J.L.M. Hensen, Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design, *Energy Build.* 49 (2012) 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>.

- [25] Y. Lu, S. Wang, K. Shan, Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings, *Appl. Energy* 155 (2015) 463–477. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.007>.
- [26] S. Attia, M. Hamdy, W. O'Brien, S. Carlucci, Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, *Energy Build.* 60 (2013) 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016>.
- [27] L.G. Valladares-Rendón, G. Schmid, S.-L. Lo, Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems, *Energy Build.* 140 (2017) 458–479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>.
- [28] S.B. Sadineni, S. Madala, R.F. Boehm, Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 3617–3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>.
- [29] U.S. Department of Energy, *Passive Solar Design Strategies: Guidelines for Home Building*, (2000) 97.
- [30] S. Yilmaz, H. Riza Ozcalik, O. Dogmus, F. Dincer, O. Akgol, M. Karaaslan, Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 997–1005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.090>.
- [31] Mohammad Arif Kamal, Shading: A Simple Technique For Passive Cooling And Energy Conservation In Buildings, *Sustain. Environ.* (2011) 1–6.
- [32] self shading, (n.d.). <https://www.arch-products.com/featured/article/33008051/self-shading-building-takes-cues-from-the-desert>.
- [33] I.G. Capeluto, Energy performance of the self-shading building envelope, *Energy Build.* 35 (2003) 327–336. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00105-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00105-6).
- [34] I.L. Wong, A review of daylighting design and implementation in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74 (2017) 959–968. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061>.
- [35] X. Sun, Z. Gou, S.S.-Y. Lau, Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building, *J. Clean. Prod.* 183 (2018) 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.137>.
- [36] A. de Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy Build.* 103 (2015) 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.
- [37] M.H. Zahir, K. Irshad, M. Shafiullah, N.I. Ibrahim, A.K.M. Kausarul Islam, K.O. Mohaisen, F.A.A. Sulaiman, Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review, *J. Energy Storage* 64 (2023) 107156. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107156>.
- [38] A.M.A. Soliman, M.S. Yousef, S. Ookawara, H. Hassan, Experimental study of using system of flat heat pipe-phase change material inclusion heat sink for thermal regulation of

- simulated PV, Exp. Heat Transf. 36 (2023) 648–664. <https://doi.org/10.1080/08916152.2022.2071359>.
- [39] H. Selvnnes, Y. Allouche, R.I. Manescu, A. Hafner, Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials, Therm. Sci. Eng. Prog. 22 (2021) 100807. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100807>.
- [40] J. Luo, D. Zou, Y. Wang, S. Wang, L. Huang, Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review, Chem. Eng. J. 430 (2022) 132741. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741>.
- [41] C. Liu, J. Zhang, J. Liu, Z. Tan, Y. Cao, X. Li, Z. Rao, Novel Hybrid Hypercrosslinked Polymer Assisted Highly Efficient Thermal Energy Storage, (2021). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-152851/v1>.
- [42] P. Jaffar Abass, S. Muthulingam, Incorporation of Phase Change Materials into Building Materials and Envelopes for Thermal Comfort and Energy Optimization: A Comprehensive Review, J. Build. Eng. (2025) 112106. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112106>.
- [43] E.M. Shchukina, M. Graham, Z. Zheng, D.G. Shchukin, Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems, Chem. Soc. Rev. 47 (2018) 4156–4175. <https://doi.org/10.1039/C8CS00099A>.
- [44] S.E. Kalnæs, B.P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, Energy Build. 94 (2015) 150–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>.
- [45] T. Zhang, Y. Tan, H. Yang, X. Zhang, The application of air layers in building envelopes: A review, Appl. Energy 165 (2016) 707–734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.108>.
- [46] X. Zhang, S.-K. Lau, S.S.Y. Lau, Y. Zhao, Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review, Sol. Energy 170 (2018) 947–968. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.067>.
- [47] T. Ibn-Mohammed, S.C.L. Koh, I.M. Reaney, A. Acquaye, G. Schileo, K.B. Mustapha, R. Greenough, Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies, Renew. Sustain. Energy Rev. 80 (2017) 1321–1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>.
- [48] A.K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system, Energy Build. 128 (2016) 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.077>.
- [49] No Title, (n.d.). <https://arka360.com/ros/photovoltaic-modules/>.
- [50] S. Preet, Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 82 (2018) 791–807.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.021>.
- [51] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Sol. Energy* 83 (2009) 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
- [52] A.K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, Recent advancement in BIPV product technologies: A review, *Energy Build.* 140 (2017) 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>.
- [53] A. Kasaeian, G. Nouri, P. Ranjbaran, D. Wen, Solar collectors and photovoltaics as combined heat and power systems: A critical review, *Energy Convers. Manag.* 156 (2018) 688–705. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.064>.
- [54] T.M. Sathe, A.S. Dhoble, A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>.
- [55] L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, F. Asdrubali, Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 114 (2019) 109318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>.
- [56] J. Baumeister, J. Weise, S. Myslicki, E. Kieseritzky, G. Lindenberg, PCM-Based Energy Storage System with High Power Output Using Open Porous Aluminum Foams, *Energies* 13 (2020) 6198. <https://doi.org/10.3390/en13236198>.
- [57] A. Hasan, S.J. McCormack, M.J. Huang, B. Norton, Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method, *Energy Convers. Manag.* 81 (2014) 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.042>.
- [58] M. Faden, A. König-Haagen, S. Höhle, D. Brüggemann, An implicit algorithm for melting and settling of phase change material inside macrocapsules, *Int. J. Heat Mass Transf.* 117 (2018) 757–767. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.033>.
- [59] <https://www.mgm.gov.tr/>.
- [60] https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/1976a1e3-bfaa-48f8-b4a8-1059ee439aec/en-604562016?srltid=AfmBOodd00LNoT_IWM6aVFzVyMu8EDjw4Mi3PphrkD4oT8lwDhT28YV.
- [61] tüketim harcaması türlerinin harcamaya göre sıralı %20_lik gruplara göre dağılımı, (n.d.).
- [62] Ansys Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc., USA Release 20 (2020) 814. http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm.
- [63] M. Gür, E. Gürgeç, H. Coşanay, H.F. Öztö, Solar-assisted radiant heating system with nano-B4C enhanced PCM for nearly zero energy buildings, *Case Stud. Therm. Eng.* 65 (2025) 105544. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105544>.

- [64] M. Gür, H.F. Öztop, F. Selimefendigil, Analysis of solar underfloor heating system assisted with nano enhanced phase change material for nearly zero energy buildings approach, *Renew. Energy* 218 (2023) 119265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119265>.
- [65] A. Hamada, M. Emam, H.A. Refaey, M. Moawed, M.A. Abdelrahman, Investigating the performance of a water-based PVT system using encapsulated PCM balls: An experimental study, *Energy* 284 (2023) 128574. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128574>.
- [66] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, M. Mahdavi Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, *Sol. Energy* 118 (2015) 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.038>.
- [67] T.T. Chow, G. Pei, K.F. Fong, Z. Lin, A.L.S. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover, *Appl. Energy* 86 (2009) 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.016>.
- [68] T. Maatallah, R. Zachariah, F.G. Al-Amri, Exergo-economic analysis of a serpentine flow type water based photovoltaic thermal system with phase change material (PVT-PCM/water), *Sol. Energy* 193 (2019) 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.063>.
- [69] V. Tirupati Rao, Y. Raja Sekhar, Comparative analysis on embodied energy and CO₂ emissions for stand-alone crystalline silicon photovoltaic thermal (PVT) systems for tropical climatic regions of India, *Sustain. Cities Soc.* 78 (2022) 103650. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103650>.
- [70] M. E.A.E. Ahmed, S. Abdo, M.A. Abdelrahman, O.A. Gaheen, Finned-encapsulated PCM pyramid solar still – Experimental study with economic analysis, *J. Energy Storage* 73 (2023) 108908. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108908>.
- [71] M.S. Yousef, H. Hassan, An experimental work on the performance of single slope solar still incorporated with latent heat storage system in hot climate conditions, *J. Clean. Prod.* 209 (2019) 1396–1410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.120>.
- [72] M.S. Yousef, M. Sharaf, A.S. Huzayyin, Energy, exergy, economic, and enviroeconomic assessment of a photovoltaic module incorporated with a paraffin-metal foam composite: An experimental study, *Energy* 238 (2022) 121807. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121807>.
- [73] S. Tiwari, S. Agrawal, G.N. Tiwari, PVT air collector integrated greenhouse dryers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90 (2018) 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.043>.
- [74] No Title, (n.d.). [https://iklim.gov.tr/tuik-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri-yayinlandi-haber-1122#:~:text=2023 Sera Gazi Emisyon Envanteri,yüzde 7%2C7 artış göstermiştir.](https://iklim.gov.tr/tuik-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri-yayinlandi-haber-1122#:~:text=2023%20Sera%20Gazi%20Emisyon%20Envanteri,yüzde%207%2C7%20artış%20göstermiştir.)
- [75] H. Zaghoul, M. Emam, M.A. Abdelrahman, M.F. Abd Rabbo, Optimization and parametric analysis of a multi-junction high-concentrator PV cell combined with a straight fins heat

- sink, Energy Convers. Manag. 243 (2021) 114382. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114382>.
- [76] M.E.A.E. Ahmed, M.A. Abdellatif, A.A.A. Attia, A.F. Deifalla, M.E.A. Elsayed, M.A. Abdelrahman, Evaluation of small hydropower turbines installed downstream of Nile River branches (Egypt), Sci. Rep. 13 (2023) 15061. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41775-1>.
- [77] J.P. Holman, Experimental methods for engineers. 8th ed. New York: McGraw Hill Publishers, 2012.



ÖZGEÇMİŞ

Muhammed GÜR

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID	: 0000-0002-0032-3518
Danışman Orcid ID	: 0000-0002-2161-0639

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

✓	KD2 PRO, DSC, VİSKOZİMETRE
✓	ANSYS, SOLIDWORKS,AUTOCAD

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:	
1.	Coşanay, H., Öztop, H. F., Gür, M., & Bakır, E. (2022). Analysis of turbulent wall jet impingement onto a moving heated body. <i>International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow</i> , 32(9), 2938-2963.
2.	Öztop, H. F., Bakır, E., Selimefendigil, F., Gür, M., & Coşanay, H. (2023). Effects of inclined plate in a channel to control melting of PCM in a body inserted on the bottom wall. <i>Experimental Techniques</i> , 47(1), 123-137.
3.	Kurt, K., Öztop, H. F., Abu-Hamdeh, N., & Gür, M. (2023). An experimental study on cooling of model data center building by using eutectic phase change material in their walls. <i>Journal of Thermal Analysis and Calorimetry</i> , 148(14), 7233-7258.

4. Oztop, H. F., Gür, M., Selimefendigil, F., & Coşanay, H. (2023). Analysis of melting of phase change material inserted a block via impinging turbulent slot jet. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 33(10), 3467-3491.
5. Gür, M., Öztop, H. F., & Selimefendigil, F. (2023). Analysis of solar underfloor heating system assisted with nano enhanced phase change material for nearly zero energy buildings approach. *Renewable Energy*, 218, 119265.
6. Öztop, H. F., Gür, M., Selimefendigil, F., & Coşanay, H. (2024). Impacts of inclined plate on melting time for phase change material filled blocks: Experimental and numerical analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102427.
7. Öztop, H. F., Gürgeç, E., & Gür, M. (2024). Thermophysical properties and enhancement behavior of novel B4C-nanoadditive RT35HC nanocomposite phase change materials: Structural, morphological, thermal energy storage and thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 272, 112909.
8. Gür, M., Gürgeç, E., Coşanay, H., & Öztop, H. F. (2024). Novel nano-Y2O3/myristic acid nanocomposite PCM for cooling performances of electronic device with various fin designs. *Journal of Energy Storage*, 100, 113646.
9. Kandilli, C., Gür, M., Yilmaz, H., & Öztop, H. F. (2025). Experimental and numerical analyses of a model Trombe wall employing the natural zeolite/perlite composite plate as a thermal mass for nearly zero energy buildings. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 160, 108386.
10. Gür, M., Gürgeç, E., Coşanay, H., & Öztop, H. F. (2025). Solar-assisted radiant heating system with nano-B4C enhanced PCM for nearly zero energy buildings. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105544.
11. Gurgenc, E., Gur, M., Cosanay, H., Gurgenc, T., & Oztop, H. F. (2025). Effects of position of semi-circular body on melting of a novel B4C/RT44HC PCM nanocomposite in a closed space. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105628.
12. Gur, M., Oztop, H., Biswas, N., & Selimefendigil, F. (2025). Three-dimensional analysis of turbulent twin-swirling jets onto a heated rectangular prism in a channel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*.

Projeler:

1. Isıl Enerji Depolama Özelliğine Sahip Enerji Geri Kazanımı Sağlayabilen Döküm Potası Park İstasyonu Tasarımı ve Prototip Üretimi – Tübitak 1501-Araştırmacı
2. Isıl enerji depolamalı yaklaşık sıfır enerjili binalarda binaya entegre fotovoltaiik/termal (BEPVT) sistemlerin performansının sayısal ve deneysel analizi TEKF. 23.01- Araştırmacı
3. Akım Çizgili Tasarıma Sahip Kap Tasarımının Faz Değiştiren Maddenin Erime-Katılaşma Prosesine ve Kabın Şekil Değiştirmesine Etkisinin İncelenmesi- Tübitak 1001- Araştırmacı
4. Bor Bileşiği Nanoparçacık Katkısının Konsantre Güneş Enerjisi Sistemlerinde Tercih Edilen Erimiş Tuzlar ve İkili Karışımlarından Oluşan Hibrit Erimiş Tuzların Termal ve Yüksek Sıcaklık Korozyon Özelliklerine Etkisinin Araştırılması – Tübitak 1001-Araştırmacı
5. Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar(Nseb) Kapsamında Doğal Zeolit Plakalı Kompozit Duvar Sisteminin Üretimi, Performansının Değerlendirilmesi ve Optimizasyonu- Tübitak 1005-Bursiyer