



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**BİR İKLİMLENDİRME SİSTEMİNDE GİZLİ ISI DEPOLAMA
TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ MAHAL SOĞUTMA
İHTİYACINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN TALU

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET SELÇUK MERT

**YALOVA
HAZİRAN 2022**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

BİR İKLİMLENDİRME SİSTEMİNDE GİZLİ ISI DEPOLAMA TEKNOLOJİSİ
KULLANIMININ MAHAL SOĞUTMA İHTİYACINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN TALU
185103008

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MEHMET SELÇUK MERT

YALOVA
HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Furkan TALU





ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Selçuk MERT'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım annem Asuman TALU'ya ve sevgili Esra TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2020/BAP/0022) teşekkür ederim.

Haziran – 2022

Furkan TALU





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
SİMGELER	ix
KISALTMALAR	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. DÜNYA, AVRUPA VE TÜRKİYE’NİN ENERJİ GÖRÜNÜMÜ.....	3
3. ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	7
3.1. Termal Enerji Depolama Yöntemleri	7
3.1.1. Duyulur ısı enerjisi depolama	9
3.1.2. Termokimyasal ısı enerjisi depolama	10
3.1.3. Gizli ısı enerjisi depolama	11
3.2. Termal Enerji Depolama Sistemlerinin Yararları ve Kıyaslanması	12
3.3. Faz Değiştiren Malzemeler	13
3.3.1. Faz değiştiren malzemelerin avantaj ve dezavantajları	15
3.3.2. Faz değiştiren malzeme seçimindeki önemli hususlar.....	16
4. İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN KULLANIMI.....	19
4.1. Pasif Sistemler	19
4.2. Aktif Sistemler	22
4.3. İklimlendirme Sistemlerinde Performans İyileştirme Çalışmaları	27
4.3.1. Gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları.....	29
5. DENEY SİSTEMİ TANITIMI VE YÖNTEM	33
5.1. Deney Sistemi Tanıtımı.....	33
5.2. Yöntem	37
6. DENEYSEL BULGULAR	43
6.1. FDM İçermeyen Plakalar ile Gerçekleştirilen Deneyler	43
6.2. FDM İçeren Plakalar ile Gerçekleştirilen Şarj Deneyleri	46



6.2.1. Giriş koşullarının şarj sürecine etkisi (eş zamanlı ve geri Dönüş Havalı)	49
6.2.2. Plakalar arası mesafenin şarj sürecine etkisi	66
6.3. FDM İçeren Plakalar ile Gerçekleştirilen Deşarj Deneyleri	70
6.3.1. Giriş koşullarının etkisi.....	70
6.3.2. Plakalar arası mesafenin deşarj sürecine etkisi.....	83
6.4. İklimlendirme Sistemlerinde FDM Kullanmanın Maddi Tasarrufa Etkisi	85
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	103





SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

a_m	: Erime oranı
C	: Birim enerji maliyeti (TL/kWh)
c_p	: Özgül ısı (kJ/kg.K)
c_{sp}	: İlk ve erime sıcaklığı arasındaki ortalama özgül ısı (kJ/kg.K)
c_{tp}	: Erime ve son sıcaklık arasında ortalama özgül ısı (kJ/kg.K)
h	: Saat (h)
h^{-1}	: Hava değişim katsayısı
P_f	: Fan gücü (W)
P_k	: Kompresör gücü (W)
$P_{k, FDM \text{ yok}}$	: FDM olmadan kompresör enerji giderleri (TL)
$P_{k, \text{puant}}$	: Kompresörün puant yükte enerji giderleri (TL)
Q	: Toplam ısı geçişi (kJ)
T_f	: Son sıcaklık (°C)
T_i	: İlk sıcaklık (°C)
T_m	: Maddenin erime sıcaklığı (°C)
Δh_m	: Birim kütle başına füzyon ısısı veya erime gizli ısısı (kJ/kg)
ΔT	: Sıcaklık farkı (°C)
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)

KISALTMALAR

A.B.D	: Amerika Birleşik Devletleri
CO ₂	: Karbondioksit
COP	: Performans katsayısı
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ERV	: Enerji geri kazanımlı havalandırma
EU-28	: 28 Avrupa Ülkesi
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
GWh	: Gigawatt saat
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
ktoe	: Kiloton Eşdeğer Petrol
Mtoe	: Milyon ton Eşdeğer Petrol
TED	: Termal Enerji Depolama

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1. 20°C sıcaklıkta bazı malzemelerin termal özellikleri	9
Tablo 3.2. TED sistemlerinin karşılaştırılması [5]	13
Tablo 3.3. Organik ve inorganik FDM avantaj ve dezavantajları [14]	15
Tablo 3.4. Parafin ve tuz hidratların karşılaştırılması [6]	16
Tablo 3.5. Faz değiştiren malzemede aranan özellikler[11,13]	17
Tablo 4.1. İklimlendirme sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları	27
Tablo 4.1. (devam) İklimlendirme sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları	28
Tablo 5.1. Kullanılan FDM özellikleri.....	35
Tablo 5.2. Ölçüm esnasında kullanılan cihazların detayları	37
Tablo 5.3. Soğutma deneyi sırasında FDM karakteristikleri	38
Tablo 5.4. Soğutma deney senaryoları.....	39
Tablo 5.5. Ölçüm noktalarından okunan parametreler.....	39
Tablo 6.1. 20 mm plaka mesafesinde şarj deneylerinin karşılaştırılması	54
Tablo 6.2. 10 mm plaka arası mesafede şarj deneylerinin karşılaştırılması.....	61
Tablo 6.3. Plakalar arası mesafenin ortalama ısı transfer hızına etkisi.....	69
Tablo 6.4. Plakalar arası mesafenin plakalardan absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarına etkisi	69
Tablo 6.5. 20 mm plaka mesafesinde deşarj deneylerinin kıyaslanması	75
Tablo 6.6. 10 mm plaka mesafesinde deşarj deneylerin karşılaştırılması.....	82
Tablo 6.7. Plaka mesafesinin ortalama ısı transfer hızına etkisi	83
Tablo 6.8. Plaka mesafesinin havadan absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarına etkisi	84
Tablo 6.9. Konfor sıcaklığına ulaşma süreleri	85
Tablo 6.10. 01.04.2022 tarihli EPDK kararı elektrik enerjisi birim fiyatı	86
Tablo 6.11. FDM olmadan günlük soğutma giderleri.....	86
Tablo 6.12. Gündüz tarifesinde ortam ve FDM'nin eş zamanlı soğutulması sırasındaki enerji maliyetleri	87
Tablo 6.13. Geri dönüş havalı soğutma sisteminde farklı koşullar için FDM şarj maliyetleri.....	87
Tablo 6.14. FDM yokluğunda puant tarife sırasında meydana gelen enerji giderleri	88
Tablo 6.15. FDM varlığında, puant yük tarifesinde kompresörün ilave çalışmasıyla oluşan enerji giderleri	88



Tablo 6.16. FDM deşarj sırasında ve puant yük tarifesinde dış hava emiş fanının enerji giderleri	89
Tablo 6.17. Eş zamanlı şarj durumunda elde edilen maddi tasarruf miktarları (TL)	89
Tablo 6.18. Geri dönüş havalı sistem kullanılması durumunda elde edilen tasarruf miktarları	90
Tablo 6.19. Eş zamanlı ve geri dönüş havalı sistemlerde şarj durumunda sağlanan yüzde enerji tasarruf miktarları	91





ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Açıklanan Politikalar Senaryosuna göre seçilen bölgelerde/ülkelerde elektrik enerjisi talebi görünümü, 2019-2030 [1].....	3
Şekil 2.2. Belirtilen Politikalar Senaryosuna göre yakıt ve bölgeye göre birincil enerji talebindeki değişiklikler, 2019-2030 [2]	4
Şekil 2.3. 2017 yılında Avrupa Birliği'nde sektöre bağlı son tüketici enerji kullanımı ve CO2 emisyonu [3]	4
Şekil 2.4. Türkiye'nin kaynağa bağlı elektrik enerjisi üretim değerleri [4].....	5
Şekil 2.5. Türkiye'nin sektöre bağlı enerji kullanımı [4]	6
Şekil 3.1. Enerji depolama teknolojileri [6]	7
Şekil 3.2. Termal enerji depolama teknolojisinin şematik gösterimi [5]	8
Şekil 3.3. Termal enerji depolama yöntemleri [6]	9
Şekil 4.1. Gizli ısı depolama sistemlerinde FDM kullanım yöntemleri.....	19
Şekil 4.2. Gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirmeleri	29
Şekil 5.1. Isıl enerji depolama ünitesine sahip iklimlendirme deney düzeneği şeması	34
Şekil 5.2. Makrokapsülleme plakaları.....	35
Şekil 5.3. FDM dolu plakalar için taşıyıcılar	36
Şekil 5.4. Kanallın EPS ile yalıtımı.....	37
Şekil 5.5. İklimlendirme deney düzeneği ölçüm noktaları	40
Şekil 5.6. Hava hızı ölçüm bölümleri	41
Şekil 5.7. Plakaların kanal içinde 10 mm mesafeyle konumlanışının teknik çizimi.....	41
Şekil 6.1. Deney-2 senaryosuna ait ortam sıcaklığı	44
Şekil 6.2. Deney-3 senaryosuna ait ortam sıcaklığı	44
Şekil 6.3. Deney-2 ve Deney-3'e ait kanal giriş hava sıcaklığının zamanla değişimi	45
Şekil 6.4. Deney-2 senaryosu için plaka sıcaklıkları	45
Şekil 6.5. Deney-3 senaryosu için plaka sıcaklıkları	46
Şekil 6.6. Eş zamanlı soğutma sistemi	47
Şekil 6.7. Geri dönüş havalı soğutma sistemi	47
Şekil 6.8. Geri dönüş havalı sistemin deneysel düzeneği	48
Şekil 6.9. Plakaların 10 mm mesafede konumu	48
Şekil 6.10. Plakaların 20 mm mesafede konumu	48
Şekil 6.11. Isıl çiftlerle plaka yüzeylerinden sıcaklık ölçümü	49



Şekil 6.12. Deney – 1 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	50
Şekil 6.13. Deney – 1 için plaka sıcaklıkları.....	50
Şekil 6.14. Deney – 1 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	51
Şekil 6.15. Deney – 3 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	51
Şekil 6.16. Deney – 3 için plaka sıcaklıkları.....	52
Şekil 6.17. Deney – 3 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	52
Şekil 6.18. Deney – 5 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	53
Şekil 6.19. Deney – 5 için plaka sıcaklıkları.....	53
Şekil 6.20. Deney – 5 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	54
Şekil 6.21. 20 mm plaka mesafesinde şarj deney senaryoları için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	55
Şekil 6.22. Deney – 7 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	56
Şekil 6.23. Deney – 7 için plakaların ısı davranışları	56
Şekil 6.24. Deney – 7 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	57
Şekil 6.25. Deney – 9 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	57
Şekil 6.26. Deney – 9 için plakaların ısı davranışları	58
Şekil 6.27. Deney – 9 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	58
Şekil 6.28. Deney – 11 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	59
Şekil 6.29. Deney – 11 için plakaların ısı davranışları	59
Şekil 6.30. Deney – 11 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	60
Şekil 6.31. 10 mm plaka mesafesinde şarj deney senaryoları için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	61
Şekil 6.32. Deney – 13 için plakaların ısı davranışları	62
Şekil 6.33. Deney – 14 için plakaların ısı davranışları	63
Şekil 6.34. Deney – 15 için plakaların ısı davranışları	64
Şekil 6.35. Deney – 16 için plakaların ısı davranışları	64
Şekil 6.36. Deney – 17 için plakaların ısı davranışları	65
Şekil 6.37. Deney – 18 için plakaların ısı davranışları	66
Şekil 6.38. Deney – 1 ve Deney – 7 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	67



Şekil 6.39. Deney – 3 ve Deney – 9 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	68
Şekil 6.40. Deney – 5 ve Deney – 11 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	68
Şekil 6.41. Deney – 2 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	71
Şekil 6.42. Deney – 2 için plakaların ısı davranışı	71
Şekil 6.43. Deney – 2 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	72
Şekil 6.44. Deney – 4 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	72
Şekil 6.45. Deney – 4 koşulları için plakaların ısı davranışı	73
Şekil 6.46. Deney – 4 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	73
Şekil 6.47. Deney – 6 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	74
Şekil 6.48. Deney – 6 koşulları için plakaların ısı davranışı	74
Şekil 6.49. Deney – 6 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	75
Şekil 6.50. 20 mm mesafe deşarj deneylerinde kanal çıkışı hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi.....	76
Şekil 6.51. Deney – 8 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	77
Şekil 6.52. Deney – 8 koşulları için plakaların ısı davranışı	78
Şekil 6.53. Deney – 8 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı	78
Şekil 6.54. Deney – 10 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	79
Şekil 6.55. Deney – 10 koşulları için plakaların ısı davranışı.....	79
Şekil 6.56. Deney – 10 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	80
Şekil 6.57. Deney – 12 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi	81
Şekil 6.58. Deney – 12 koşulları için plakaların ısı davranışı.....	81
Şekil 6.59. Deney – 12 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı.....	82
Şekil 6.60. 10 mm mesafe deşarj deneylerinde kanal çıkışı hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi.....	83



BİR İKLİMLENDİRME SİSTEMİNDE GİZLİ ISI DEPOLAMA TEKNOLOJİSİ KULLANIMININ MAHAL SOĞUTMA İHTİYACINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez kapsamında klasik mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimine sahip bir iklimlendirme sisteminde faz değiştiren malzeme kullanımının termal ve ekonomik incelenmesi deneysel olarak çalışılmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında gizli ısı enerjisi depolama ünitesine sahip bir iklimlendirme deney sistemi kurulmuştur. Böylece, iklimlendirme sistemleri için aktif sistem olarak nitelendirilen yöntem ile mahal soğutma giderlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Bunun için, görece yüksek enerji depolama kapasitelerine ve faz geçiş sıcaklıklarına sahip iki farklı faz değiştiren malzeme makrokapsülleme yöntemi kullanılarak iklimlendirme kanalı üzerinde tasarlanan enerji depolama ünitesine uygun şekillerde yerleştirilmiştir. Makrokapsülleme işlemi için dikdörtgen prizma geometrisine sahip alüminyumdan imal edilmiş metal plakalar kullanılmıştır. Gizli ısı enerji depolama ünitesinin ısı davranışının ve soğutma ihtiyacına etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmada, farklı koşullar ve plakalar arası mesafeler gözetilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir. Makrokapsüllenmiş FDM'lerin şarj işlemi, 1,5 – 2 - 2,5 m/s hava hızlarında (9°C, 11°C ve 13°C hava sıcaklıklarında) eş zamanlı ve geri dönüş havası kullanılarak (3, 6 ve 9°C hava sıcaklıklarında) gerçekleştirilmiştir. Deşarj işlemleri ise 1,5 – 2 - 2,5 m/s hava hızlarında (38°C, 34°C ve 32 °C hava sıcaklıklarında) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hem şarj hem de deşarj işlemlerinde 10 mm ve 20 mm olarak farklı plakalar arası mesafeler çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, enerji depolama ünitesine yerleştirilen plakaların arasındaki mesafelerin 20 mm'den 10 mm'ye daralmasıyla hava – FDM arasında ortalama ısı transfer hızlarında % 17 – 24 oranlarında artışlar olduğu ve FDM yüklenen tüm plakaların daha etkin kullanılmasına bağlı olarak ısı konfor şartlarına ulaşılma sürelerinin % 25 – 37 mertebelerinde artarak iyileştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, gerçekleştirilen ekonomik analiz neticesinde, elde edilen maddi tasarruf miktarlarının eş zamanlı şarj ve geri dönüş havalı şarj sistemlerinde farklılık gösterdiği bulunmuştur. Elde edilen veriler ışığında, hazırlanan gizli ısı depolama üniteli iklimlendirme sisteminde faz değiştiren malzeme kullanılmasıyla birlikte elektrik kullanım bedelinden farklı koşullar altında % 26,5'a varan miktarlarda tasarruf edilebilmesinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl enerji depolama, Faz değiştiren malzeme, İklimlendirme sistemleri



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE USING LATENT HEAT STORAGE TECHNOLOGY IN AN AIR CONDITIONING SYSTEM ON THE REQUIREMENT OF SPACE COOLING

ABSTRACT

In this study, the thermal and economic investigation of the use of Phase Change Materials (PCM) in an air-conditioning system with a classical mechanical vapour compression refrigeration cycle was experimentally studied. For this purpose, an air-conditioning system with a latent heat energy storage unit was established in the laboratory conditions. Thus, it was aimed to reduce the space cooling costs with the method, which is called as the active system for air conditioning systems. For this, two different phase change materials with relatively high-energy storage capacities and phase transition temperatures were placed in the energy storage unit designed on the air conditioning duct using the macroencapsulation method. Aluminium metal plates with rectangular prism geometry were used for the macro-encapsulation process. In this experimental study, to examine the thermal behaviour of the latent heat energy storage unit and its effect on the cooling need, performance tests were carried out by considering different air conditions and distances between plates. The charging process of the macroencapsulated PCMs was carried out simultaneously at 1.5, 2 and 2.5 m/s air velocities (at 9°C, 11°C and 13°C air temperatures) and using return air (at 3°C, 6°C and 9°C air temperatures). Discharge processes were carried out at 1.5 – 2 – 2.5 m/s air velocities (at 38°C, 34°C and 32°C air temperatures). In addition, different distances between the plates as 10 mm and 20 mm were studied in both charge and discharge processes. As a result of the experimental studies carried out; it was determined that with the narrowing of the distances between the plates placed in the energy storage unit, there was an increase of 17-24% in the average heat transfer rates between air and PCM, and the time to reach the thermal comfort conditions was improved by 25-37%, depending on the more effective use of all plates loaded with PCM. However, as a result of the economic analysis performed, it was found that the amount of savings obtained differ in simultaneous charging and return air charging systems. In the light of the data obtained, it was concluded that it was possible to save up to 26.5% of the electricity usage cost under different conditions, by using phase change material in the air-conditioning system with the latent heat storage unit.

Keywords: Thermal energy storage, Phase change material, Air-conditioning system



1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji ve buna paralel olarak artış gösteren nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak üzere gıda, endüstri ve ulaşım gibi sektörlerin enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Artan bu talebi karşılamak için fosil ve yenilenebilir enerji tabanlı enerji üretim sahaları tesis edilmiştir. Fosil kaynak tabanlı enerji üretim tesislerinin açığa çıkardığı sera gazları ekosistemimizi büyük bir tehdit olan küresel ısınma ile karşı karşıya bırakmıştır. Ülkeler, sadece belirli enerji üretim kaynaklarına bağlı kalmamak için enerji üretim yelpazelerini genişletme kararları alarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımlar yapmaktadırlar. Bu yatırımların yanı sıra enerjinin üretim aşamasından kullanım aşamasına kadar verimli ve etkili bir şekilde kullanılması için de çalışmalar yürütülmektedir.

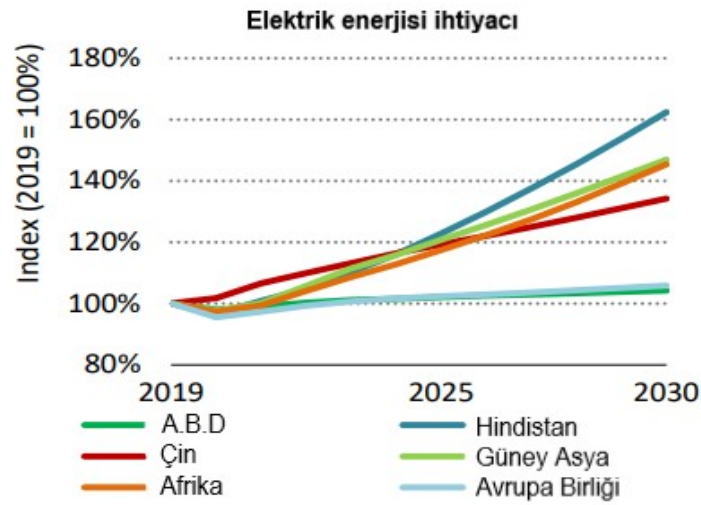
Enerjinin verimli kullanılması, israf edilmemesi amacıyla enerji depolama teknolojileri ilgi çekmiş ve önem kazanmıştır. Günümüzde, ısı depolama yöntemi de son zamanlarda enerji depolama teknolojileri arasında en çok çalışılan konulardan biri olmuştur. Isı depolama; duyulur, termokimyasal ve gizli ısı depolama sistemleri olmak üzere üç farklı yolla yapılabilmektedir. Duyulur ısı depolama sisteminde maddenin fazı değişmeden sadece sıcaklığının artması/azalması yoluyla, termokimyasal ısı depolama sisteminde kimyasal reaksiyonlar yoluyla, gizli ısı depolama sistemlerinde ise maddenin fazının değişimi sırasında açığa çıkardığı genellikle füzyon ısı veya buharlaşma gizli ısı sayesinde termal enerjinin depolanması mümkündür. Gizli ısı depolama sistemleri yüksek enerji depolama kapasiteleri ve sabit sıcaklıkta bu ısı enerjisini sağlayabilmelerinden dolayı diğer termal enerji depolama yöntemlerine kıyasla ön plana çıkmaktadır.

Gizli ısı depolama sistemlerinde, enerji depolama ortamı olarak Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) kullanılmaktadır. Organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılan bu maddeler yüksek miktarda ısı enerjinin depolanmasına ve sabit bir sıcaklıkta veya sıcaklık aralığında geri verilmesine olanak sağlarlar. Ürün yelpazesinin genişliği sayesinde her türlü alanda çalışabilme olanağı sunmaktadırlar. Ağırlıklı olarak medikal ve kan taşımacılığında, soğuk hava zincirlerinde, uzay çalışmalarında, solar enerji depolama sistemlerinde, içten yanmalı motorların soğutulmasında ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılmaktadır.

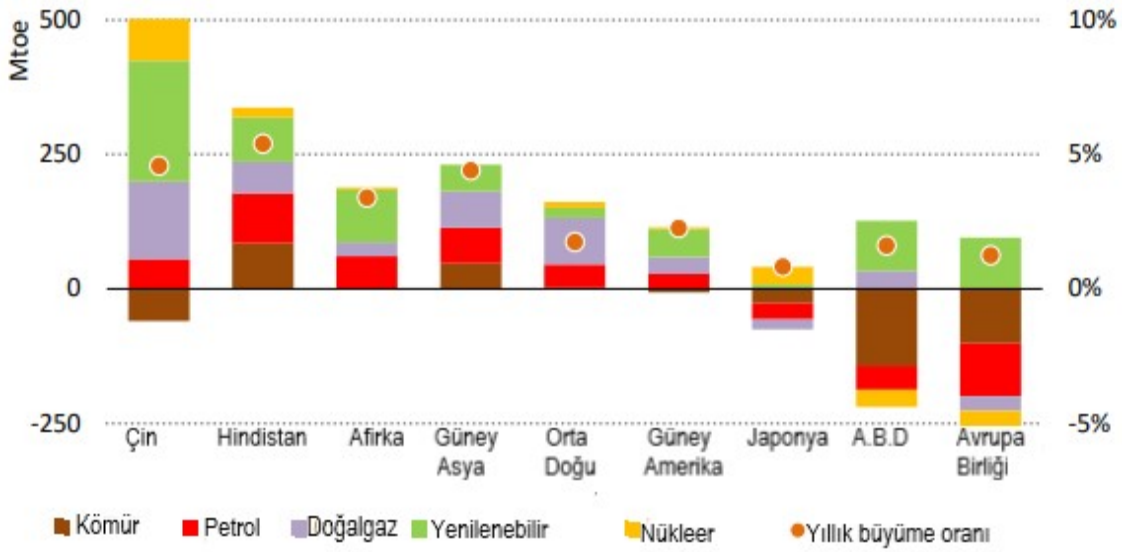
Bu tez çalışmasında iklimlendirme sistemlerinde gizli ısı depolama teknolojisi kullanımının mahal soğutma ihtiyacının karşılanması üzerindeki etkisi ve parasal tasarruf olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla, iklimlendirme sistemine entegre olan bir gizli ısı depolama ünitesi tasarlanmış ve faz değıştiren malzemeler makrokapsülleme plakaları ile birlikte gizli ısı depolama ünitesine dahil edilmiştir. Gece, gündüz ve puant elektrik tarifelerindeki birim enerji satış fiyatı farklılıklarından yola çıkarak parasal tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. Optimum koşulların tayin edilmesi için farklı giriş koşulları ve plakalar arası mesafeler altında ticari olarak temin edilen RT – 18 HC ve RT – 21 HC faz değıştiren malzemelerinin şarj ve deşarj süreçleri, iklimlendirme sistemine olan faydası ve beraberinde getirdiğı maddi tasarruf miktarları değerlendirilmiştir.

2. DÜNYA, AVRUPA VE TÜRKİYE’NİN ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

Artan Dünya nüfusu ve gelişen teknoloji ile beraber ülkelerin enerji ihtiyaçları da doğru oranda artış göstermiştir. IEA’nın (Uluslararası Enerji Ajansı) 2020 raporu istatistiksel verileri incelendiğinde, 2030 yılında dünya genelinde enerji talebinin büyük ölçüde artacağı öngörülmüştür. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere elektrik enerjisi talebinde Hindistan lider konumdayken onu Güney Asya, Afrika ve Çin takip etmektedir. Raporda, 2018 büyüme hedeflerinin devam etmesi halinde küresel enerji sistemlerine önemli ölçüde yük bineceği belirtilmiştir. Bu ihtiyacın karşılanması için fosil yakıt tabanlı enerji üretim sahalarının tesis edilmesi ile birlikte çevre kirliliği ve sera gazı etkisi artış göstermiş ve bu durum çalışmaları daha temiz enerji kaynaklarına doğru yönlendirmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, belirtilen 2019-2030 senaryoları kapsamında; enerji ve sanayi sektörlerinde kömür talebi Hindistan ve Güneydoğu Asya’da artmaya devam etmektedir. Avrupa Birliği, A.B.D gibi gelişmiş ekonomilerde, talebin 2019 seviyelerine dönmediği ve yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarının hızla artması ve bununla birlikte kömür kullanımının azalması söz konusudur. Bütün bölgelerde yenilenebilir enerjiye yatırımlar meydana gelmesi beklenmektedir. Doğalgaz ve petrol ihraç eden Orta Doğu ve Avrasya ülkelerindeki enerji talebinde meydana gelen artışın, yine gaz ve petrol ile karşılanabildiği raporda belirtilmiş fakat bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımı engellememiştir.

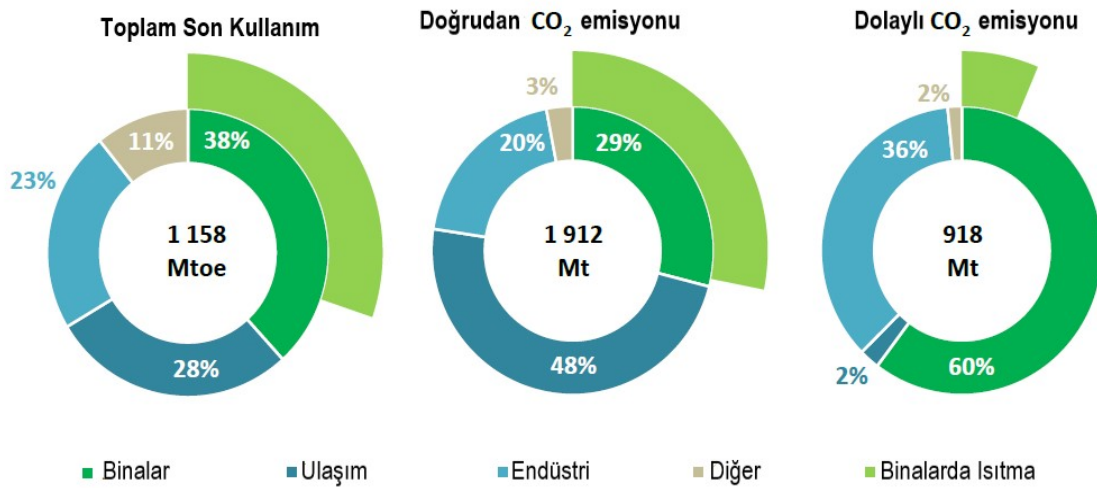


Şekil 2.1. Açıklanan Politikalar Senaryosuna göre seçilen bölgelerde/ülkelerde elektrik enerjisi talebi görünümü, 2019-2030 [1]



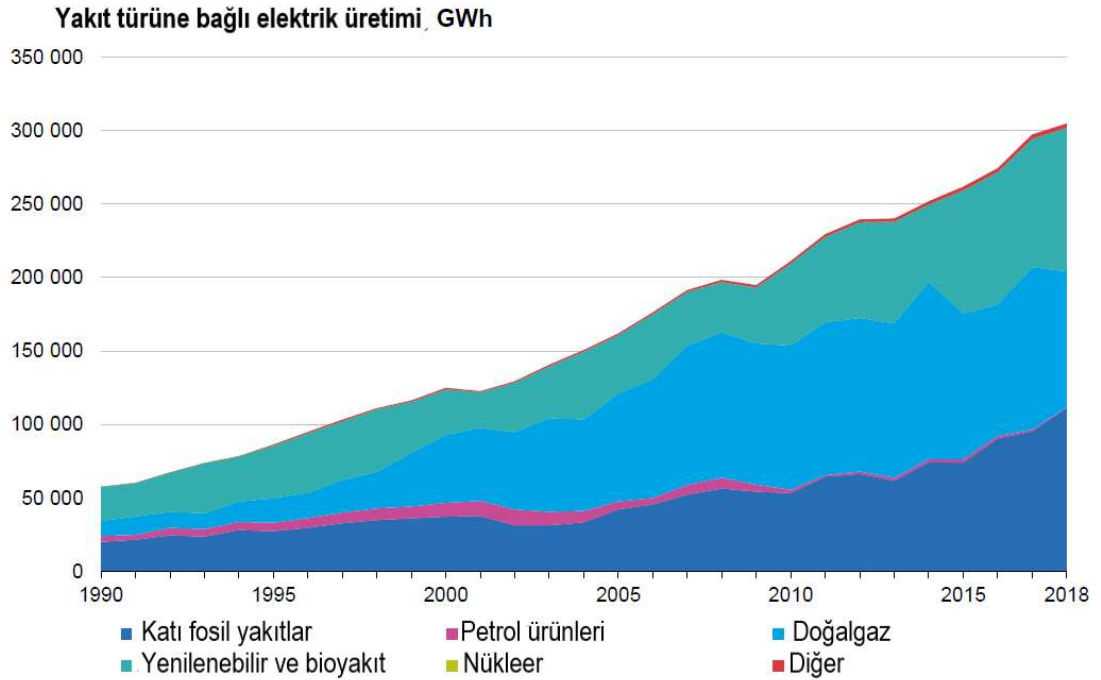
Şekil 2.2. Belirtilen Politikalar Senaryosuna göre yakıt ve bölgeye göre birincil enerji talebindeki değişiklikler, 2019-2030 [2]

IEA 2019 raporunda belirtildiği üzere Avrupa Birliği'nde toplam kullanılan enerjinin % 38'i binalarda, % 28'i ulaşımda, % 23'ü endüstride, % 11'i ise diğer alanlarda kullanılmaktadır. Binalarda kullanılan enerjinin % 80'i iklimlendirme sistemlerinde sarf edilmektedir [3]. Bununla birlikte, ikinci en yüksek karbondioksit salınımına sebep olan sektör olarak da gösterilmektedir (Şekil 2.3). En fazla enerji kullanımının binalarda iklimlendirme sistemlerinde olması sebebiyle araştırmacılar bu alanda enerjinin daha etkin kullanımı için çalışmalar yürütmektedirler.

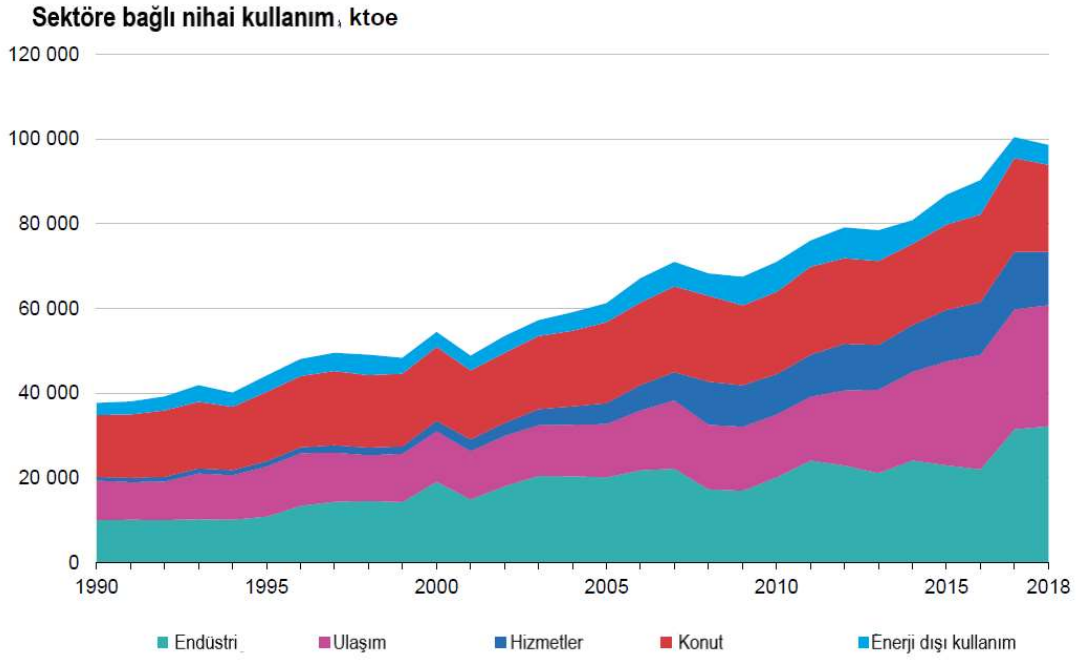


Şekil 2.3. 2017 yılında Avrupa Birliği'nde sektöre bağlı son tüketici enerji kullanımı ve CO2 emisyonu [3]

Avrupa İstatiksel Veri Ajansı Eurostat'ın 2020 Enerji Verileri raporunda [4], Türkiye'nin de içinde bulunduğu EU – 28 ülkeleri için enerji üretim ve kullanım değerleri detaylı şekilde araştırılmıştır. Şekil 2.4'te, Türkiye'nin elektrik enerjisini ürettiği kaynakların enerji üretimindeki payı gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin 2018 yılı itibariyle ~100.000 GWh değerine ulaştığı görülmektedir. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim artmış olsa da katı yakıt ve doğalgaz ile enerji üretiminin payı önemli ölçüdedir. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, üretilen enerjinin sektörlerde kullanım miktarı gösterilmiştir. Enerjinin en çok kullanıldığı yer endüstri iken onu binalar, hizmet sektörü, ulaşım ve enerji dışı kullanım takip etmektedir. Enerji dışı kullanım, beyaz ispiroto, parafin mumları, yağlayıcılar, bitüm ve diğer ürünler gibi diğer petrol ürünlerinin kullanımını kapsamaktadır. Sonuç olarak; ülkemizde katı yakıt ve doğalgazın önemli bir payının ithal edilmesi ve bu ithal edilen kaynakla üretilen enerjinin büyük çoğunluğunun harcandığı binalar ve bu binalardaki iklimlendirme sistemleri göz önüne alındığında, enerjinin bu alanda etkin ve verimli kullanılmasının ülke ekonomisine katkısının büyük olacağı değerlendirilmektedir.



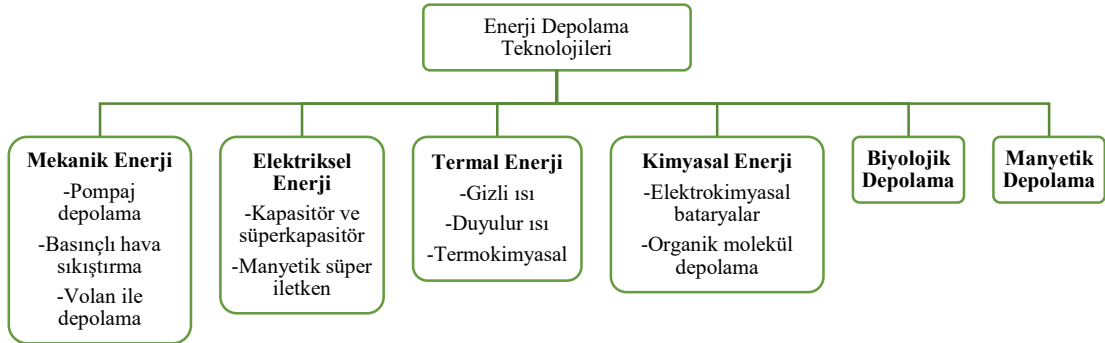
Şekil 2.4. Türkiye'nin kaynağa bağlı elektrik enerjisi üretim değerleri [4]



Şekil 2.5. Türkiye'nin sektöre bağı enerji kullanımı [4]

3. ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı karşısında ve buna bağlı olarak fosil kaynakların giderek tükenmesi sonucunda etkin enerji depolama teknolojilerine olan ihtiyaç artmıştır. Enerjinin korunumu yasası gereği; enerji yoktan var veya vardan yok edilemez sadece başka bir forma dönüşür. Enerji depolama tekniği, enerji talebinin yoğun olmadığı durumlarda (off – peak) depolanarak, gerekli olduğu yoğun durumlarda (peak) kullanılabilmesi için uygundur [5]. Bu enerji depolama teknolojilerini Dinçer ve Rosen [6], Şekil 3.1’de olduğu gibi mekanik, elektriksel, termal, kimyasal, biyolojik ve manyetik depolama olarak sınıflandırmıştır. Mekanik enerji depolama; enerjinin doğrusal ya da dönme hareketinden yararlanarak kinetik enerji, belli bir yükseklik kazandırılarak potansiyel enerji veya belli bir basınçta sıkıştırılarak sıkıştırma enerjisi olarak depolanmasıdır. Kimyasal enerji depolama bir ya da daha fazla kimyasal bileşiğin tepkimeye girerek enerji emmesi veya salması şeklindedir. Piller en sık kullanılan kimyasal enerji depolama yöntemidir. Biyolojik depolama, biyolojik prosesler sonucunda enerjinin kimyasal formda depolanması yöntemidir. Manyetik depolama, enerjinin elektromıknatıs ile manyetik alan içinde depolanması olarak nitelendirilmektedir [6].

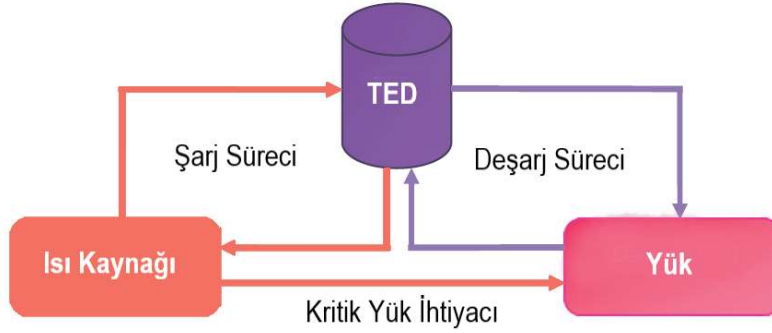


Şekil 3.1. Enerji depolama teknolojileri [6]

3.1. Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Kalaiselvam ve Parameshwaran [5], termal enerji depolama teknolojisini; bünyesinde enerjiyi sıcaklık ve soğukluk olarak depolayan ve gerektiği durumda son kullanıcıya ulaştıran verimli bir sistem olarak; Dinçer ve Rosen [6], yüksek veya düşük sıcaklıktaki termal enerjinin geçici şekilde depolanması olarak tanımlamıştır. Burada ifade edilen termal terimi, depolama ortamı ile enerji kaynağı arasındaki enerji

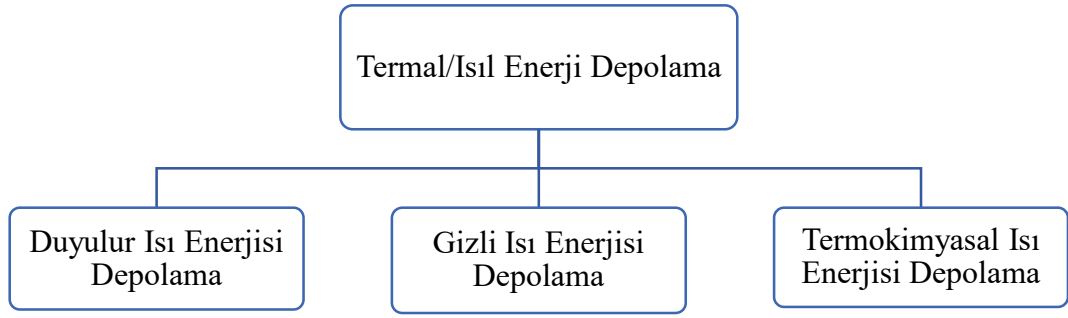
etkileşimlerine bağlı olarak sıcak veya soğuk anlamına gelmektedir. Termal Enerji Depolama (TED) sistemlerinin basit çalışma mantığı Şekil 3.2’de olduğu gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Termal enerji depolama teknolojisinin şematik gösterimi [5]

TED sistemleri şarj, depolama ve deşarj olarak üç farklı süreçte incelenebilir. Şarj sürecinde kaynaktaki termal enerji, depolama ünitesindeki madde üzerinde geçici olarak depolanır. Deşarj sürecinde ise depolanan bu termal enerji ihtiyacı karşılamak üzere madde üzerinden salınır. Depolama sürecinde ise uygulamaya ve sıcaklık aralığına bağlı olarak farklı maddeler kullanılabilir. Örneğin; duyulur ısı depolama sistemlerinde her ne kadar suyun özgül ısısı bazı katı maddeler kadar yüksek olmasa da su sıvılar arasında yüksek bir özgül ısı değerine sahiptir. Bu yüzden su, termal enerji depolama yöntemlerinde sıklıkla kullanılır. Bu sistemlerde su kullanılmasının diğer bir avantajı ise, depolanan enerjinin transferinin sadece bir pompa aracılığıyla yapılabilmesidir. İleri enerji depolama teknolojisi olan TED, yer ısıtma, sıcak su, soğutma ve ısıtma gibi termal uygulamalarda kullanılarak daha da ilgi çekmiştir. Dinçer ve Rosen [6], TED teknolojisinin termal enerji elemanlarının etkin kullanımını artırma potansiyeline sahip olduğunu ve termal enerji arz – talep dengesindeki uyuşmazlıklara çözüm olabileceğini belirtmiştir. Kalaiselvam ve Parameshwaran [5], TED sistemlerinin üretim ve talep yükü arasında bulunmasının termal enerji israfını büyük ölçüde önleyeceğini ve sera gazları salınımlarının önemli ölçüde azalacağını vurgulamışlardır.

Termal enerji depolama; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı enerjisi olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilir (Şekil 3.3). Maddenin sıcaklığını artırarak veya azaltarak duyulur ısı, halini/fazını değiştirerek gizli ısı, bir kimyasal reaksiyon aracılığıyla termokimyasal ısı enerjisi şeklinde depolanabilir.



Şekil 3.3. Termal enerji depolama yöntemleri [6]

3.1.1. Duyulur ısı enerjisi depolama

Duyulur ısı depolama, maddede faz değişimi meydana gelmeden sıcaklığının artması yoluyla bünyesinde ısı enerjisinin depolanmasıdır. Madde depolayacağı ısı enerjisini dış ortamdan almakta ve sıcaklığında artış meydana gelmektedir. Sıcaklığının artmasıyla birlikte ısı enerjisini üzerinde depolamaktadır. Bu depolama çift yönlü olarak gerçekleşmekte ve ısı enerjisine ihtiyaç duyulduğu takdirde maddenin sıcaklığı azalarak ısı enerjisi dış ortama geri verilmektedir. Bu sistemlerde kullanılan malzemelerin her birinin kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Tablo 1.1’de bazı maddelerin ısı kapasiteleri verilmiştir. Isıl kapasite malzemenin birim hacminde 1°C sıcaklık artışı olması için verilmesi gereken ısı enerjisi miktarı olarak tanımlanmaktadır. Tablo 3.1’de görüldüğü gibi ısı kapasitesi en yüksek olan malzemelerden biri sudur. Çünkü malzeme için ısıyı depolama kapasitesi $\rho \times c_p$ değerine bağlıdır [6]. Suyun ısı kapasite değeri yüksektir ve temini kolaydır. Bu yüzden duyulur ısı depolamada en sık tercih edilen malzemedir. Eşitlik 3.1’de duyulur ısı enerjisi depolama sistemlerinde, madde üzerinde depolanabilen ısı enerjisi miktarının formülü verilmiştir.

Tablo 3.1. 20°C sıcaklıkta bazı malzemelerin termal özellikleri

Malzeme	Yoğunluk ($\rho, kg/m^3$)	Özgül ısı ($c_p, \frac{J}{kg \cdot K}$)	Volumetrik ısı kapasite ($10^6 \frac{J}{m^3 \cdot K}$)
Su	998	4182	4,17
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Çelik	7840	465	3,68

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de;

Q = toplam ısı enerjisi geçişi (kJ)

m = depolama malzemenin kütlesi (kg)

c_p = malzemenin özgül ısı değerini (kJ/kg.K)

ΔT = Sıcaklık farkı değerini göstermektedir. (°C)

Sistemde depolanan enerji miktarı malzemenin kütlesi, özgül ısı değeri ve sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. İki farklı malzeme her ne kadar aynı kütleye ve aynı sıcaklık farkı değerine sahip olsa da özgül ısı değeri her malzeme için farklı olduğundan sistemde depolanan ısı enerjisi miktarı da farklı olacaktır. Duyulur ısı depolama katı, sıvı ve gaz haldeki malzemelerin hepsinde uygulanabilmektedir. Bununla birlikte uygun bir malzeme seçerken; yoğunluk, özgül ısı, termal iletkenlik, buhar basıncı, kimyasal kararlılık ve kap malzemeleriyle uyumluluk göz önünde bulundurulmaktadır [7].

3.1.2. Termokimyasal ısı enerjisi depolama

En az iki farklı kimyasal madde reaksiyona girdiğinde, maddelerin reaksiyon başlangıcı ve sonunda bir entalpi farkı oluşur. Bu entalpi farkı reaksiyon ısısı olarak bilinmektedir. Kimyasal reaksiyonlar endotermik (ısı alan) ve ekzotermik (ısı veren) olmak üzere ayrılmaktadır. Reaksiyon ürünleri depolanabiliyor ve depolanan ısı enerjisi ters reaksiyonla serbest bırakılabiliyorsa, reaksiyon ısısı yüksek herhangi bir kimyasal reaksiyon termal enerji depolama için kullanılabilir [8]. Bu kimyasal reaksiyonlarda, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve ters-reaksiyon gerçekleştirebilmesi gerekmektedir [9].

Termokimyasal ısı enerjisi depolama sistemlerinin, her ne kadar enerji depolama kapasitesi yüksek olsa da reaksiyon sırasında oluşabilecek yan reaksiyonlar bu sistemi zorlayıcı hale getirmektedir [10].

3.1.3. Gizli ısı enerjisi depolama

Maddenin faz değişimi sırasında açığa çıkardığı ısı gizli ısı olarak bilinmektedir. Maddenin sıcaklığının artması veya azalmasıyla iç enerjisinde meydana gelen değişim, faz değişimi olarak tanımlanmaktadır. Faz değişimi; katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz veya tam tersi biçimde olabilir. Katı-katı faz değişimi sırasında madde bir kristal yapıdan diğer bir kristal yapıya geçmektedir. Bu geçiş sırasında küçük hacim değişimleri olmakta ve katı-sıvı faz değişimine göre daha az miktarda ısı enerjisi depolanabilmektedir [11]. Gizli ısı depolama sisteminde faz değiştiren malzeme (FDM) üzerinde enerji depolanmaktadır. Bu faz değiştiren malzemelere tuz hidratlar ve organik bileşenler örnek olarak verilebilir. Gizli ısı depolama sistemlerinde faz değiştiren malzeme üzerinde depolanan ısı enerjisi miktarı Eşitlik 3.2’de olduğu gibi hesaplanabilir.

$$Q = m[c_{sp}(T_m - T_i) + a_m\Delta h_m + c_{lp}(T_f - T_m)] \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de;

Q = toplam ısı enerjisi geçişi (kJ)

m = depolama maddesinin miktarını (kg)

a_m = maddenin erime oranını

Δh_m = birim kütle başına füzyon ısısı veya erime gizli ısısı (kJ/kg)

T_i = ilk sıcaklık (°C)

T_f = son sıcaklık (°C)

T_m = maddenin erime sıcaklığı (°C)

c_{sp} = ilk ve erime sıcaklığı arasındaki ortalama özgül ısı (kJ/kg.K)

c_{lp} = erime ve son sıcaklık arasında ortalama özgül ısı (kJ/kg.K) değerini belirtmektedir.

Gizli ısı enerjisi depolama tekniği TED sistemleri arasında; yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlaması ve FDM’nin faz değişimini sabit bir sıcaklık değerinde yapması sebebiyle ilgi çekici olduğu belirtilmiştir [11]. Gizli ısı depolama sistemleri duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha küçük hacim kaplarlar. Bu küçük

hacimde gizli ısı depolama üniteleri, duyulur ısı depolama ünitelerine göre avantaj sunmaktadır. En sık kullanılan FDM olarak su örnek verilecek olursa, suyun füzyon ısısı (katı-sıvı) 333,55 kJ/kg iken, suyun ısı kapasitesi (duyulur ısısı) 4,17 kJ/kg.K'dir. Bu durum bize aynı miktarda bulunan su ve buz arasında; buzun erimesi için gereken enerji miktarı, suyun sıcaklığını 1°C artırmak için gereken enerji miktarının ortalama 80 katı olduğunu ve gizli ısı depolama sistemlerinde duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha fazla enerji depolanabileceğini göstermektedir.

3.2. Termal Enerji Depolama Sistemlerinin Yararları ve Kıyaslanması

Termal enerji depolama sistemleri sürdürülebilir bir geleceğe ulaşma amacı doğrultusunda bir takım faydaları beraberinde taşımaktadır. Bu faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilir; [5]

- Fosil yakıt kullanımının azalması
- Sera gazı salınımının azalması
- Ekipman/tesis işletme maliyetlerinin azalması
- Yakıt fiyatlarının azalması
- Yükün yoğun olduğu durumdan kısmi yük koşullarına kaydırılması yoluyla mevcut ısıtma/soğutma sistemleri üzerindeki yüklerin azalması
- İklimlendirme ekipmanlarının boyutlarının küçülmesi
- Isıtma ve soğutma sistemlerinin enerji verimliliğinin artması
- Yenilenebilir enerji üretim santrallerine enerji depolamak için entegre edilebilmesi
- Fazla olan elektrik/mechanik ekipmanların azaltılması
- Çevre kirliliğinin azaltılması

Dinçer ve Rosen [6], gelecekte TED sistemlerinin iklimlendirme elemanlarına dahil edilmesi doğrultusunda, iklimlendirme sistemlerinin daha verimli çalışmasından dolayı ısıtma/soğutma sistemleri miktarının % 50-70 arasında azalacağını öngörmektedir. TED sistemlerinin kendi bünyelerinde sağladıkları bir takım avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bilinen üç farklı TED sistemlerini Kalaiselvam ve Parameshwaran, Tablo 3.2'de olduğu gibi kıyaslamışlardır.

Tablo 3.2. TED sistemlerinin karşılaştırılması [5]

	Duyulur Isı	Gizli Isı	Termo-kimyasal
Depolama elemanı	Su, çakıl, toprak	Organik, inorganik	Metal klorid, metal hidrit, oksitler
Çeşitler	- Su-tabanlı sistem - Kaya veya yeraltı depolama	- Aktif sistem - Pasif sistem	Kimyasal reaksiyon
Avantajlar	- Çevre dostu ve ucuz malzeme - Basit çalışma düzeneği - Kontrol kolaylığı	- Duyulur ısıdan daha fazla enerji yoğunluğuna sahip - Sabit sıcaklıkta ısı enerjisi sağlar	- En yüksek enerji yoğunluğu - Kompakt sistem - Çok düşük ısı kayıpları
Dezavantajlar	- Düşük enerji yoğunluğu - Yüksek depolama hacmi gerekliliği - Isı kaybı problemleri	- Düşük termal kararlılık - Kristalleşme - Korozyon - Depolama malzemesinin pahalılığı	- Düşük ısı transferi - KontROLSÜZ reaksiyon - Depolama malzemesinin pahalılığı

3.3. Faz Değiştiren Malzemeler

Geçmişten günümüze birçok farklı malzeme ve madde potansiyel bir faz değiştiren malzeme (FDM) olarak düşünülmüştür. Bilinen en eski gizli ısı depolama uygulaması; Budapeşte’de bulunan Macar parlamento binasının sıcak günlerde soğutulması için Balaton Gölü’nden kışın buz hasadı yapılmasıdır [6]. Günümüz teknolojisiyle birlikte farklı sıcaklık aralıklarında ve farklı depolama kapasitelerine sahip FDM’ler ticari olarak satışa sunulmaktadır. FDM’ler kendi aralarında organik, inorganik ve ötektik olmak üzere sınıflandırılabilir.

- **Organik Faz Değiştiren Malzemeler**

Parafinler ve Parafin olmayan malzemeler organik gruba örnek olarak verilebilir.

Parafinler; düz zincir yapısına sahip (C_nH_{2n+2}) n-alkanlardan meydana gelmektedir. Moleküller arası zincirin kırılması sonucu büyük miktarda gizli ısı açığa çıkar. Zincir ne kadar uzunsa açığa çıkacak gizli ısı miktarı da o kadar yüksektir. Bu malzemeler birbirini tekrar eden erime ve donma sürecini defalarca bozulmadan tekrar edebilirler. Parafinler güvenli ve ucuz olmasının yanı sıra aşındırıcı değildir. Kimyasal olarak inert ve 500°C altında kararlı yapıdadırlar [11]. Erime esnasında çok küçük hacim değişimleri meydana gelmektedir ve düşük buhar basıncına sahiptirler. Bu özellikler doğrultusunda parafin kullanılan sistemlerin erime ve donma süreleri uzundur [12].

Parafin olmayan malzemeler; çok benzer özelliklere sahip olan parafinlerden farklı olarak kendilerine özgü özelliklere sahiptir [11]. Bu kategoride çok fazla sayıda kullanıma aday FDM bulunmaktadır. Parafin olmayanlar grubu esterler, yağ asitleri ve alkoller olmak üzere alt başlıklarda incelenebilir [13].

- **İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler**

İnorganik FDM'ler tuz hidratlar ve metalikler olmak üzere iki farklı başlıkta incelenebilir.

Tuz hidratlar; geniş çalışma alanına sahip malzemelerdir. En ilgi çekici özellikleri: birim hacim başına yüksek gizli ısı değerine, yüksek termal iletkenlik değerine (parafinlerin neredeyse iki katı) ve erime esnasında küçük hacim değişimine sahip olmalarıdır. Aşındırıcı olmamakla birlikte plastik malzemelerle de uyum içindedirler ve çok pahalı değildir. Parafinlerle çalışırken karşılaşılan en büyük sorunlardan biri uyumsuz şekilde erimeleridir. Bu soruna; mekanik karıştırma yardımıyla, FDM'nin kapsüllenmesiyle, katılaştırma ajanları ekleyerek tuzun çökmesini engelleme yollarıyla çözümler getirilmiştir [11].

Metalikler; ağırlıklarının fazla olması sebebiyle FDM teknolojisinde fazla tercih edilmemektedirler. Diğer FDM'ler ile aralarındaki en büyük fark yüksek termal iletkenliğe sahip olmalarıdır. Metalik FDM'lerin başlıca özellikleri; birim kütle başına düşük gizli ısı miktarı, birim hacim başına yüksek gizli ısı miktarı, yüksek

termal iletkenlik, düşük özgül ısı ve düşük buhar basıncı değerlerine sahip olmalarıdır [11].

- **Ötektik Faz Değiştiren Malzemeler**

İki ya da daha fazla bileşiğin minimum erime noktası bileşimi ötektik olarak tanımlanmaktadır. Ötektikler neredeyse her zaman yapısında ayrışma olmadan erir ve donar [11]. Ötektik malzeme; inorganik-inorganik, organik-inorganik ya da organik-organik malzemelerin karışımıyla elde edilebilmektedir. Bu durum farklı özelliklere sahip birçok ötektik malzeme üretimini mümkün kılar. Erime ve donma sırasında eş zamanlı olarak faz değiştirdikleri için bu malzemelerde faz ayrımı gözlemlenmez [13].

3.3.1. Faz değiştiren malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Gizli ısı depolama sistemleri sabit sıcaklıkta ısı enerjisi sağlama, daha fazla ısı enerjisi depolama, daha küçük depolama hacimleriyle işlem yapma ve kolay uygulanabilir olması bakımından duyulur ısı ve termokimyasal ısı enerjisi depolama teknolojilerine karşı üstün konumdadır. FDM'ler hafif, taşınabilir ve güvenilirdir. Fan ya da pompa gibi harici bir ekipmana ihtiyaç duymamaktadırlar [15]. Zalba ve diğ.[14], Tablo 3.3'te organik ve inorganik faz değiştiren malzemelerin avantaj ve dezavantajlarından bahsetmiştir. Dinçer ve Rosen [6], Tablo 3.4.'te parafinler ve tuz hidratları avantaj ve dezavantajları bakımından kıyaslamıştır.

Tablo 3.3. Organik ve inorganik FDM avantaj ve dezavantajları [14]

Organik	İnorganik
<i>Avantaj</i> • Aşındırıcı değildir. • Aşırı soğutma yapmazlar.(sub-cooling) • Kimyasal ve termal olarak kararlıdır.	<i>Avantaj</i> • Daha yüksek faz değişim entalpisine sahiptir.
<i>Dezavantaj</i> • Düşük faz değişim entalpisi ve • Düşük termal iletkenlik değerlerine sahiptir.	<i>Dezavantaj</i> • Aşındırıcıdır. • Faz ayrışması meydana gelmekte • Düşük termal kararlılığa sahiptir.

Tablo 3.4. Parafin ve tuz hidratların karşılaştırılması [6]

Parafinler	Tuz Hidratlar
<i>Avantaj</i> • Özgül ısıları daha yüksektir • Kristalleşmenin meydana gelmesi daha hızlıdır • Aşırı soğuma (sub-cooling) etkisi çok az görülür • Kimyasal kararlıdır • Aşındırıcı değildirler.	<i>Avantaj</i> • Hidrasyon ile füzyon ısısı artar. • Daha yüksek termal iletkenlik • Daha yüksek yoğunluk • Yüksek buhar basıncı • Zehirli veya parlayıcı değildir • Daha yüksek faz değişim entalpisi
<i>Dezavantaj</i> • Düşük buhar basıncına sahiptirler bu durum yanıcılığa sebep olur. • Oksijen varlığında parlayıcıdır.	<i>Dezavantaj</i> • Bazı tuz hidratlar suyun olduğu ortamda aşındırıcı olurlar. • Kristalleşme hızının düşük olmasından dolayı enerji depolama oranını sınırlamaktadır.

3.3.2. Faz değiştiren malzeme seçimindeki önemli hususlar

Faz değiştiren malzemeler kendi aralarında organik, inorganik ve ötektik olmak üzere ayrılırlar. Bu malzemelerin her birinin kendine ait termal, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikleri bulunmaktadır. Farklı erime ve donma sıcaklıkları, gizli ısı depolama kapasiteleri, kapladıkları alan ve hacim ve uygulama alanı doğrultusunda uygun seçimin yapılması gerekmektedir. İklimlendirme sistemlerinde kullanılan FDM'ler fiziksel açıdan incelendiğinde erime sıcaklığının 20-24°C (konfor şartları) arasında olması gerekmektedir. Termodinamik özellik bakımından ise hacim başına yüksek gizli ısı depolama kapasitesine ve etkin bir ısı transferi için yüksek termal iletkenlik değerine sahip olmalıdır. Birbiri ardına gelen termal döngüler sonrasında kimyasal formunu korumalıdır. Ekonomik olarak kolay ulaşılabilir ve ucuz olmalıdır. Akeiber ve diğ. [13] ve Shukla ve diğ. [11], FDM'lerin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken birtakım özellikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Faz değiştiren malzemede aranan özellikler[11,13]

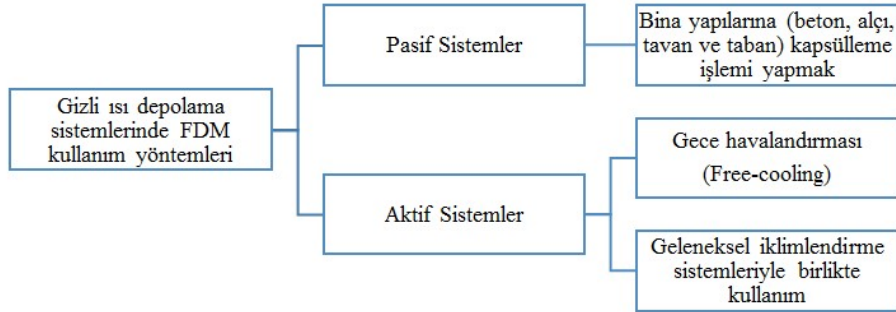
Termofiziksel zellikler	❖ Yüksek termal iletkenlik ❖ Uygun erime sıcaklığı arasında olmalı ❖ Birim hacim başına yüksek füzyon ısısı ❖ Yüksek yoğunluk ve özgül ısı ❖ Faz değişimi sırasında küçük hacim değişimleri
Kimyasal zellikler	❖ Aşındırıcı olmamalı ❖ Parlayıcı olmamalı ❖ Kimyasal kararlı olmalı ❖ Zehirli olmamalı ❖ Erime döngülerinden sonra yapısı bozulmamalı
Kinetik zellikler	❖ Aşırısı soğumanın önüne geçmek için çekirdekleşme hızı yüksek olmalı
Ekonomik zellikler	❖ Kolay ulaşılabilir olmalı ❖ Fiyatı ucuz olmalı



4. İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN KULLANIMI

Çeşitli teknolojilerin gelişmesi, enerjinin daha etkin ve verimli şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Yüksek enerji yoğunluğu ve küçük sıcaklık değişimlerinden ötürü gizli ısı depolama sistemleri termal enerjinin en verimli şekilde depolanabildiği sistem olarak görülmüştür [16]. Gizli ısı depolama sistemlerinde termal enerji, maddenin faz değişimi sayesinde depolanmaktadır. Sabit bir erime/donma sıcaklığı, geniş ürün yelpazesıyla farklı erime/donma sıcaklığı değer aralığına imkan sağlayan ve yüksek termal enerji yoğunluğu sebebiyle FDM'ler araştırmalara konu olmuştur [17].

Faz değıştiren malzemeler ile birlikte enerjinin en çok kullanıldığı iklimlendirme elemanlarının soğutma/ısıtma yüklerinin azaltılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, önümüze iki farklı yöntem çıkmaktadır. Iten ve Liu [18], Şekil 4.1'de olduğu gibi aktif ve pasif sistemler olmak üzere bu depolama yöntemlerini sınıflandırmıştır.



Şekil 4.1. Gizli ısı depolama sistemlerinde FDM kullanım yöntemleri

4.1. Pasif Sistemler

Pasif sistemler, konvansiyonel enerjiye ihtiyaç duyulmadan binaların tavan, taban, duvar, çatı vb. yapılarının faz değıştiren malzemeler ile birlikte kapsülasyon yapılarak ısı enerjinin depolanması yöntemidir. Kış mevsiminde dış hava sıcaklığı düşük olsa da güneş ışınması sayesinde üzerinde enerji depolayabilmektedir. Pasif sistemler, iklimlendirme ekipmanlarının boyutlarının küçülmesinde ve ısıtma/soğutma talebinin azaltılmasında önemli rol almaktadırlar [19].

Neeper [20], deneysel çalışmasında binalarda FDM kullanımının kilit noktalarını ve katkılarını göstermeyi amaçlamıştır. % 20 ve % 10 oranında FDM emdirilmiş 12,7

cm kalınlığa sahip duvar karoları bina duvarlarına monte edilmiştir. Kullanılan FDM'nin erime sıcaklığı, optimum oda sıcaklığı olan 25°C olarak belirlenmiştir. Karoların gizli ısı depolama kapasitelerinin 400 kJ/m² olduğu belirtilmiştir. Oda sıcaklığı ve FDM'nin erime sıcaklığı birbirine ne kadar yakın değerlerde olursa depolanacak termal enerji miktarının o kadar yüksek olacağı sonucuna varmışlardır.

Chen ve diğ. [21], Kuzey Çin bölgesinde sıradan bir evin kuzey cephesinde bulunan duvarın i yüzeyine, 30 mm kalınlığında, 23 °C erime sıcaklığına ve 60 kJ/kg faz değişim entalpisine sahip FDM uygulaması yapmışlardır. alışmalarını hem simülasyon hem de deneysel ölçekte gerçekleştirmiş ve mevsimsel ısıtma düzeyinde % 17 oranında bir enerji tasarrufu sağlamışlardır. Kalınlığın ve faz değişim entalpisinin artması ile enerji tasarruf oranının da artacağını belirtmişlerdir.

Kuznik ve diğ. [22], duvar uygulamalarında kullanılan karoların optimum kalınlığını CODYMUR adlı bilgisayar programıyla incelemişlerdir. Dupont de Nemours topluluğu tarafından üretilen, % 60 oranında mikrokapsüllenmiş parafin içeren, erime sıcaklığı 22 °C olan bir FDM kullanılmıştır. Optimum karo kalınlığını 24 saat süren test süresi sonunda 1 cm olarak hesaplamışlar ve bu kalınlığa sahip karonun 287,6 kWh/m² enerji depolayabildiğini gözlemlemişlerdir. FDM kullanımı ile beraber i ortamda meydana gelen sıcaklık dalgalanmalarının da önüne geçmişlerdir.

Saffari ve diğ. [23], Madrid şehrinde bulunan bir binanın çatı ve duvarlarına FDM yerleştirerek, FDM kullanımının iklimlendirme sistemlerinin enerji kullanımına ve ısı konfor şartlarına olan etkisini incelemek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu alışmada, Fanger ısı konfor modelini ele almışlardır. Farklı erime sıcaklığlarına (23 °C, 25 °C, 27 °C) ve farklı kalınlıklara (5 mm, 10 mm) sahip organik tabanlı FDM kullanarak 24 saat süren bir test gerçekleştirmişlerdir. Erime sıcaklığı 27 °C ve kalınlığı 5 mm olan RT-27 maddesi % 10-15 arasında en yüksek enerji tasarrufunu göstermiştir. RT-27'yi, RT-25 ve RT-23 maddeleri sırasıyla % 10-13, % 8-10 enerji tasarrufu oranı ile takip etmiştir.

Karim ve diğ. [24], bina içi ısıtma esnasında enerji tasarrufu sağlamak için taban tablaların termal direncini artırmayı hedeflemişlerdir. Tablaların iini silindirik şekilde oymuş ve bu oyukları % 85 oranında parafin içeren bir FDM ile doldurmuşlardır. Çalışmada kullanılan FDM'nin erime sıcaklığı 27 °C, faz değişim entalpisi 110 kJ/kg olarak belirtilmiştir. Tablaların içi boş ve FDM ile dolu iken bir

kıyaslama yapmışlardır. Tabladaki oyukların içi boş iken 0,8 saat, içi FDM ile dolu iken 3,7 h boyunca ortam ısısı korunmuştur. FDM sıvı fazda iken meydana gelen kaçakların polimer kompozit malzeme ilavesiyle önüne geçmişlerdir.

Alawadhi ve Alqallaf [25], Kuveyt iklim koşullarında çatıdan binaya olan ısı akısının önüne geçmek için FDM'lerin yüksek gizli füzyon ısısından yararlanarak, binanın soğutma yükünü azaltmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada n-oktadekan, n-eicosane ve P116 FDM'leri kullanılmıştır. Bu FDM'ler silindirik ve konik şekilde çatıya yerleştirilmiş ve geometrik şeklin ısı enerji depolama miktarına olan etkisi incelenmiştir. Silindirik şekilden konik şekle geçişte termal performansta bir artış meydana gelmiştir. Üç farklı FDM içerisinde n-eicosane maddesi en yüksek performansı göstermiş ve çatıdan binaya olan ısı akısının % 39 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Tokuç ve diğ. [26], İstanbul ilinde bulunan bir binada FDM kullanımının konfor koşullarına olan etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yaz iklim koşullarında çatıdan binaya olan ısı akısını engellemek için farklı kalınlıklara sahip olan (1, 2, 3, 4 ve 5 cm) RT-27 FDM'sini kullanmışlardır. Kalınlık sırası küçükten büyüğe doğru (1-5) artarken, çatıdan binaya olan ısı akısı sırasıyla % 17,8, % 36,1, % 43,2, % 49,7, % 56,6 oranında azalmıştır. Optimum kalınlığın 2 cm olduğu belirtilmiştir. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında yüksek sıcaklıktan dolayı katılaşamayan RT-27 bu aylarda duyulur ısı depolama gibi etki göstermiştir. RT-27'nin en etkin performansını Mayıs ve Eylül ayında sergilemiştir.

Pasif sistemlerin bina bileşenlerine uygulanmasında karşılaşılan en büyük sorun; hava ve FDM arasında yüksek ısı aktarımının gerçekleşmemesidir. Aşırı sıcak iklim koşullarında pasif yöntemin uygulanması zorlaşır çünkü dış ortam sıcaklığı, geceleri FDM'nin donma sıcaklığı değerinin altına düşmemektedir [18]. Stetiu ve Feustel, geceleri dış ortam sıcaklığının 18 °C civarında olmasının, bina bileşenlerinde bulunan FDM ve hava arasında etkin bir ısı transferi gerçekleşebileceğini belirtmiştir [27].

4.2. Aktif Sistemler

Aktif sistemler konvansiyonel ısıtma/soğutma elemanlarından ya da doğal dış ortamdan ısı enerjisi almak kaydıyla iki farklı başlık altında incelenebilir. Doğal dış ortamdan ısı enerjisini (sıcak ya da soğuk) alarak üzerinde termal enerji depolayan sistemler literatürde serbest soğutma (free-cooling) veya gece havalandırması olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem gece gündüz arasındaki sıcaklık farkından yararlanılmasına dayanmaktadır. Gece vaktinde düşük dış ortam sıcaklığı sayesinde malzeme fazını değiştirerek üzerinde “soğuk enerjiyi” depolar ve gündüz vaktinde dış ortam havası FDM üzerinden geçirilir. Bu sayede gün içinde, özellikle enerji talebinin pik olduğu zaman aralıklarında, iklimlendirme sisteminin yükünü azaltır. Bu sistemin en büyük avantajları; sera gazı salınımını azaltması ve iç hava kalitesiyle birlikte konfor kalitesini artırmasıdır [28]. Serbest soğutma (gece havalandırması) sistemlerinde FDM, ısıl konfor şartlarını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Örneğin; yaz mevsimi için ısıl konfor şartları 23-27 °C arasındadır. Isı transferinin etkin bir şekilde gerçekleşmesi için dış ortam sıcaklığı ve FDM erime sıcaklığı arasında 3-5 °C fark olması gerekmektedir [29].

Mosaffa ve diğ. [30], İran iklim koşullarında çoklu FDM kullanan bir termal enerji depolama sisteminin performansının iyileştirilmesi için ısı kapasitesi metodunu ele alarak çalışmışlardır. Dikdörtgen şeklindeki RT-25 içeren FDM tabakaları arasında ısı transfer akışkanı geçirerek ısı transferinin gerçekleşmesini sağlamışlardır. Araştırma süreci boyunca; FDM plaka kalınlığının, uzunluğunun ve ısı transfer akışkanının geçtiği boşluğun ısıl performansa olan etkisi incelenmiştir. Daha kısa ve ince FDM tabakaları kullanıldığında COP değeri artış göstermiştir. Gündüz 36 °C, gece 25 °C olan hava sıcaklığı karşısında sistemin COP değeri 7 olarak hesaplanmıştır. Bu değerin, kullanılan soğutma cihazının COP değerinden yüksek olduğu vurgulanmıştır.

Barzin ve diğ. [31], Auckland Üniversitesi kampüsünde, iki farklı deney kulübesi tesis etmişlerdir. Bu kulübelerden birinde PT-20 FDM emdirilmiş alçı levhalar kullanılırken, diğer kulübede sıradan alçı levhalar kullanılmıştır. İlk başta (serbest soğutma) gece havalandırması sistemi çalıştırılmadan, geleneksel iklimlendirme ekipmanları çalıştırılarak FDM'nin şarj edilmesi sağlanmış fakat elektrik enerjisinden az miktarda tasarruf sağlandığı tespit edilmiştir. Öte yandan gece

havalandırması yöntemi ile birlikte FDM'nin şarj işlemi gerçekleştirilmiş ve haftalık bazda elektrik enerjisi kullanımında % 73 oranında bir tasarruf sağlanmıştır. Geceleri düşük hava sıcaklığına sahip bölgelerde gece havalandırması yönteminin kullanılmasının yararlı olacağını vurgulamışlardır.

Weng ve diğ. [32], ısı borularındaki elektronik ekipmanların soğutulması amacıyla FDM kullanımının etkisini deneysel olarak analiz etmişlerdir. Trikosan ve su maddelerini farklı hacimlerde kullanmışlardır. Isı borusundaki soğutucu fanın enerji sarfiyatının trikosan maddesi kullanılması durumunda % 46 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Takeda ve diğ. [33], Japonya'da 8 farklı ilçe için deneysel ve sayısal açıdan gece havalandırması metodunu test etmişlerdir. GR-25 FDM'si granül halde bina tabanına döşenmiş hava ile direkt teması sağlanarak ısı transferi gerçekleştirilmiştir. Dış ortam koşullarının termal enerji depolama kapasitesine etkisini ortaya koymuşlardır. 8 şehir arasından Kyoto şehrinde yapılan testler sonucu % 62,8 oranında, diğer şehirlerden ikisinde ise % 42,8 ve % 46,2 oranında soğutma yükünün azaldığı görülmüştür. Enerji tasarruf oranının ortalama sıcaklık değişimlerinden ziyade günlük sıcaklık değişimlerine bağlı olduğuna vurgu yapmışlardır.

Nagano ve diğ. [34], tabandan soğutma sistemi üzerine Hekzadekan ($C_{16}H_{34}$) ve oktadekan ($C_{18}H_{38}$) karışımı, faz değişim sıcaklığı 20 °C ve füzyon entalpisi 201 kJ/kg olan bir FDM karışımı ile deneysel bir çalışma ortaya koymuşlardır. Isı transferini oranını yüksek tutmak için FDM yüzey alanını artırarak granül halde yerleştirme yapmışlardır. FDM hava ile direkt temas halindedir. 24 saat süren gözlem boyunca gece vaktinde 1,79 MJ/m² enerji depolaması gerçekleştirilmiş olup bu değer günlük soğutma yükünün % 89'unu karşılık gelmektedir.

Butala ve Stirith [35], tavana ve tabana yerleştirdikleri RT-20 parafin FDM'si ile gece havalandırması metodunu farklı hava akış hızları ve iç sıcaklık değerleriyle test etmişlerdir. Kullanılan FDM, 20-22 °C erime sıcaklık değerine sahiptir. 3,6 kg RT-20 üzerinde 743,9 kJ enerji depolanmıştır. Çalışma başladıktan 200 dakika sonra iç ve dış ortam sıcaklıkları eşitlenmiştir. İç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkı ne kadar büyük olursa, soğutma için geçen sürenin o kadar kısa olacağını belirtmişlerdir. Çalışma esnasında karşılaşılan en büyük sorun FDM'lerin çok yüksek hacim kaplaması olmuştur.

Waqas ve Kumar [36], Güney Asya bölgesinde yaz geceleri oluşan düşük sıcaklıktan yararlanarak gündüz vaktinde mahal soğutmasını hedefleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sırasında hava akış hızı ve FDM erime noktalarının konfor şartlarına olan etkisini analiz etmişlerdir. FDM erime sıcaklığı konfor şartlarına ne kadar yakın olması durumunda, termal enerji depolama performansının maksimum olduğunu vurgulamışlardır. FDM olarak 10 kg SP-29 kullanmışlardır. FDM deşarj işlemi sırasında hava akış hızı $10 \text{ m}^3/\text{h}$, şarj işlemi sırasında ise 10, 15 ve 20 ve $40 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak belirlemiş ve performansa olan etkisi incelenmiştir. Şarj işlemi sırasında hava akış hızı arttıkça Reynolds, Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısı artmıştır. Artan Nusselt sayısı ile birlikte ısı transfer katsayısı ve buna bağlı olarak FDM ile hava arasındaki ısı transferi oranı da artmıştır. Sonuç olarak; kısa yaz gecelerinde FDM'nin kısa sürede katılaşmasını sağlamak için şarj işlemi sırasında hava akış hızının, deşarj işlemi sırasında hava akış hızından büyük olması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Arkar ve Medved [37], mekanik havalandırma sistemine dolgu yatak düzeneğinde ve 50 mm çapında küresel şekilde RT-20 entegre ederek numerik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmanın amacı termal performansa etki eden parametrelerin saptanmasıdır. Numerik yaklaşım sonucunda erime sıcaklık aralığı 20-22 °C olan FDM'lerin gece havalandırması metodu için en uygun maddeler olduğunu belirtmişlerdir. Birim alanda (m^2), ısı konfor şartlarının sağlanması için 6,4 kg FDM kullanılmıştır. Kullanılan iklimlendirme elemanının sağladığı performansı değerinin sağlanması için gece havalandırması metodunda hava değişim katsayısının 5h^{-1} değerinde olması gerektiğini bulmuşlardır.

Chaiyat ve Kiatsiriroat [38], Tayland'da bulunan geleneksel bir iklimlendirme cihazının soğutma performansını, FDM kullanarak artırmayı hedeflemişlerdir. Kullanılan FDM RT-20 olup; 160-180 kJ/kg füzyon ısısına, 20-22 °C donma/erime sıcaklığına sahiptir. FDM'ler dikdörtgen şeklindeki yatak yapısının içine küresel şekilde yerleştirilmiştir. Farklı yatak kalınlıklarının (20 cm, 30 cm, 40 cm) şarj ve deşarj süresine etkisi gözlenmiş ve kalınlık arttıkça şarj ve deşarj süresinin de arttığı saptanmıştır. Modifiye edilen iklimlendirme sisteminin enerji kullanımında 3,09 kWh/gün azalma meydana gelmiştir. Yapılan yatırımın geri dönüş süresi 4,15 yıl olarak belirtilmiştir.

Mosaffa ve Farshi [39], soğutma sistemine üç farklı FDM (RT-27, S27, SP-25) entegre edip şarj ve deşarj süreçlerini enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel yönden analiz etmişlerdir. Evaporatör çıkışına entegre edilen gizli ısı depolama ünitesi içine FDM'ler levha halinde dizilmiş ve belirli ölçüde hava geçiş kanalları boyutlandırılmıştır. En yüksek performans katsayısı ($COP = 3,43$) SP-25 kullanılan sistemde, en yüksek ekserji verimliliği (% 2,93) RT-27 kullanılan sistemde, en düşük maliyet ise S-27 kullanılan sistemde elde edilmiştir.

Rahdar ve diğ. [40], R-12 buhar sıkıştırırmalı iklimlendirme sistemini iki farklı stratejiyle analiz etmişlerdir. İlkinde; buz termal enerji depolama, ikincisinde ise RT-3HC FDM'si sisteme dahil edilerek sistem; ekserji, ekonomi ve çevresel açılardan ele alınmıştır. Ekserji verimliliği; buz kullanıldığında % 46,93, RT-3HC kullanıldığında % 53,44 olarak hesaplanmıştır. Konvansiyonel soğutma sisteminin güç kullanımında; buz ve FDM kullanılması durumunda sırasıyla % 4,59 ve % 7,58 oranında azalma kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak CO_2 emisyonları azalma göstermiştir. FDM kullanılan sistemin geri ödeme süresi 5,56 yıl, buz kullanılan sistemin ise 3,16 yıl olarak hesaplanmıştır. Her ne kadar FDM'ler pahalı olsa da küresel ısınma sebebiyle ilerleyen yıllarda fiyatlarının düşmesi beklenmektedir.

Yüksel ve Avcı [41], Bursa'da güneş enerjisini faz değiştiren malzemeler ile depolayarak güneş fırınlarında kullanım potansiyelini araştıran deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan FDM'nin füzyon ısısı 189 kJ/kg, erime sıcaklığı ise 56 - 58,5 °C'dir. Çalışmalar yaz mevsiminde gerçekleşmiştir. Gün içinde fırın yüzey sıcaklığı 111 °C'ye kadar ulaşmış ve bu sıcaklık ertesi gün sabah 52 °C'ye ulaşmıştır. Güneş fırınlarının 24 saat boyunca başka bir enerji girdisine ihtiyaç duymadan pişirme, ısıtma gibi işlemleri rahatlıkla yapabileceği belirtilmiştir.

Osterman ve diğ. [42], binalarda ısıtma/soğutma enerji kullanımlarını azaltmak amacıyla hem yaz hem de kış mevsiminde konfor şartlarını sağlamak şartıyla güneş enerjisi destekli hava ısıtıcı bir gizli ısı depolama sistemi kurmuşlardır. Yaz geceleri depolanan ısı enerjisi gün içinde ortamı soğutmak amacıyla kullanılacaktır. Kış mevsiminde ise sabah ve akşam vakitlerinde solar hava ısıtıcılarıyla ortama sıcak hava sağlanacaktır. Çalışmalarında RT-22HC parafin, plaka tipli ısı değiştirici aracılığıyla ısı enerjisini üzerinde depolamıştır. Araştırmalar sonucunda; kış mevsiminde en yüksek ısı enerjisi Mart ayında depolanırken, yaz mevsiminde Gece

gündüz arasında sıcaklık dalgalanmalarının çok olmasında dolayı Temmuz ve Ağustos aylarında depolanmıştır. Yıllık 142 kWh enerji tasarrufu sağlandığını hesaplamışlardır.

Nie ve diğ. [43], konvansiyonel iklimlendirme sistemlerinde RT 18 HC FDM kullanarak performans iyileştirmesi yapmayı hedeflemişlerdir. Deneysel çalışmalarını sıcaklık dalgalanmaları, bağıl nem, performans katsayısı, enerji tasarrufu, acil ısıtma/soğutma kapasitesi ve geri dönüş süresi bakımından ele alarak analiz etmişlerdir. FDM kullanımı sayesinde; sıcaklık dalgalanmalarının azalmasıyla birlikte bağıl nem dalgalanmaları da azalma göstermiş kompresörün çalışıp durma aralığı % 27 oranında ve toplam elektrik enerjisi kullanımı da % 17,82 azalmış, bununla birlikte performans katsayısı (COP) %19,05 artış göstermiştir. Acil durum soğutma ihtiyacı, konvansiyonel sisteme göre 9 kat daha hızlı şekilde 95 dakika içinde karşılanmaktadır. Bütün bu avantajları sağlayan sistemin geri ödeme süresi sadece 3,3 yıl olarak hesaplanmıştır.

Navidbakhsh ve diğ. [44], konvansiyonel iklimlendirme sistemlerine FDM ile desteklenmiş buz termal enerji depolama sistemi dahil edilerek hibrit bir sistem oluşturulmuş ve performans parametreleri enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel bakımdan analiz edilerek konvansiyonel sistem ile hibrit sistem karşılaştırılmıştır. Ekserji verimliliği öngörülen değerin altında kalırken, hibrit sistemin elektrik enerji kullanımı konvansiyonel sistemle kıyasla % 17,1 oranında, CO_2 emisyonu % 17,5 oranında azalmıştır. Hibrit sistemin geri ödeme süresi ise 3,97 yıl olarak hesaplanmıştır.

Sun ve diğ. [45], Çin’de bulunan telekomünikasyon baz istasyonlarının soğutma yükünü FDM’ler ile ısı enerjisi depolayarak azaltmayı hedeflemiştir. İlk başta bir matematiksel modelle yola koyulmuş ve sonrasında birebir ölçekte bu baz istasyonunu inşa ederek deneysel süreci başlatmıştır. Kıyaslama yapabilmek için Enerji Verimliliği Oranı (EER) ve Ayarlanmış Enerji Verimliliği Oranı (AEER) kriter olarak kullanılmıştır. FDM kullanılan sistemde ayarlanan enerji verimliliği oranı 14,04 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4500 W güç değerinden daha küçük soğutma kapasitelerine sahip cihazlarda 3,2 değerindedir. Bu değerler ışığında baz istasyonlarında, gizli ısı depolama sistemi kullanımıyla % 50 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini belirtilmiştir.

4.3. İklimlendirme Sistemlerinde Performans İyileştirme Çalışmaları

Uluslararası Enerji Ajansı 2018 raporuna göre; önümüzdeki yıllarda iklimlendirme sistemlerinin artan enerji talebi küresel elektrik ağını sarsacaktır. Bu sistemlerde herhangi bir performans artırma çalışmasının yapılması enerji ağına binen yükün ve fiyatların azalmasını sağlayabilecektir. Ticari binaların enerji talebinin % 50'si iç ortam konfor şartlarının sağlanması için harcanmaktadır [46]. İnsanların vaktinin çoğu kapalı alanlarda geçtiği göz önünde tutulursa bu alanda yapılacak bir iyileştirmenin enerji arz-talep dengesine hayli etkisi olacaktır. Literatür incelemesi yapıldığında ısıtma/soğutma sistemlerinde performans artırma amacıyla izlenen yollardan bazıları aşağıdaki gibidir;

- İç ısı değiştirici ekleme
- Evaporatif hava soğutma
- Isı geri kazanımı
- Farklı iş akışkanları kullanma
- Kaskad ve absorpsiyon sistem kullanma
- Nano akışkanlar kullanma
- Termal enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanım

Bu performans iyileştirmeleri doğrultusunda yapılan çalışmalar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. İklimlendirme sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları

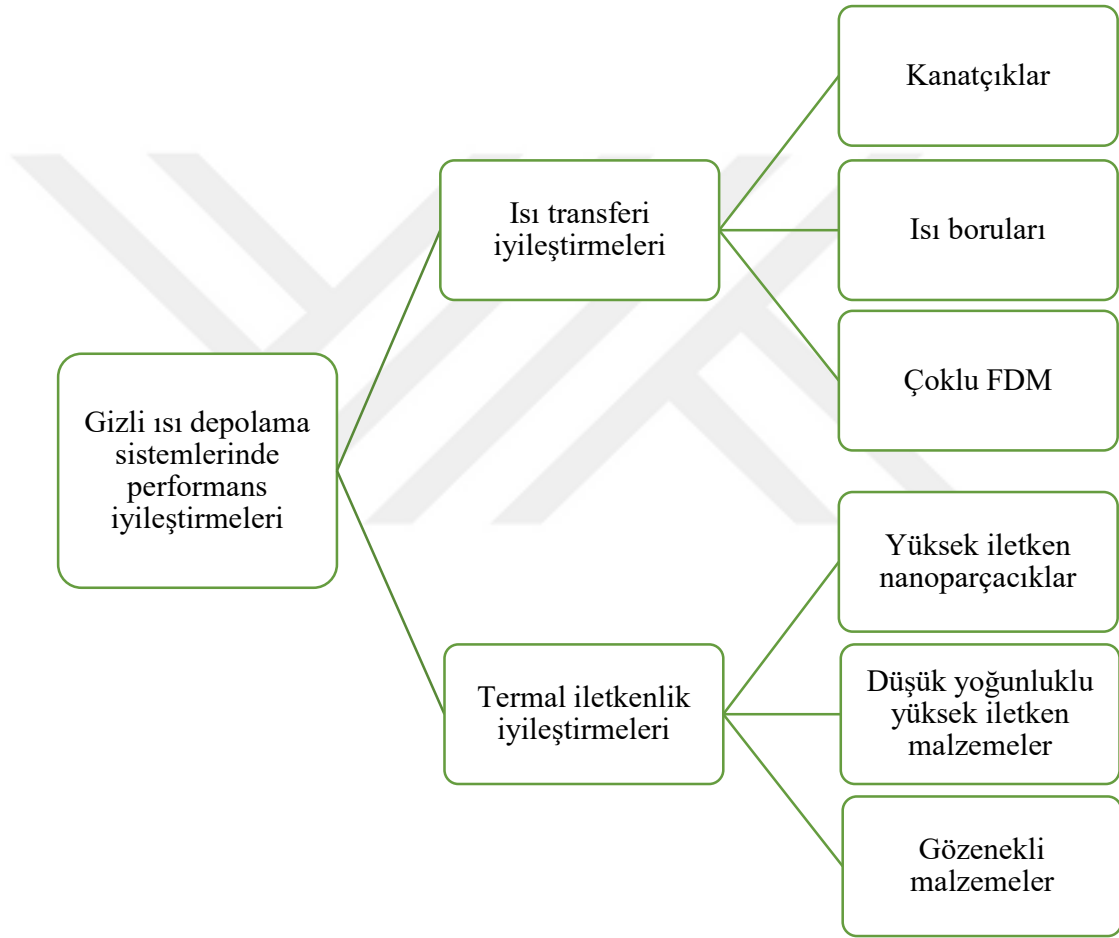
Yöntem	İçerik	Bulgular	Referans
İlave ısı değiştirici ekleme	Malezya'da bulunan konfor şartlarını sağlayamayan kütüphane klimasına borulu ısı değiştirici eklenerek performans iyileştirme hedeflenmiştir.	• Optimum boru sayısı 8 olarak bulunmuştur. • Konfor şartları yeniden sağlanmış ve yıllık 236,9 MWh enerji tasarrufu sağlanmıştır.	[47]
İç ısı değiştirici ekleme	Otomobil klimalarında R-134a akışkanına alternatif olarak R1234yf iş akışkanı analiz edilmiş ve iç ısı değiştirici eklenerek performans etkileri gözlenmiştir.	• En yüksek ekserji tahribi (2,34 kW) R-134a akışkanında meydana gelmiştir. • Eklenen iç ısı değiştirici ve R1234yf akışkanıyla buharlaştırıcıdaki ekserji tahribi 2,07 kW olmuştur.	[48]

Tablo 4.1. (devam) İklimlendirme sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları

Yöntem	İçerik	Bulgular	Referans
İç ısı değiştirici eklemesi	Transkritik CO_2 iş akışkanına sahip iklimlendirme sistemine bir iç ısı değiştirici ekleyerek, soğutma kapasitesi ve performans katsayısı (COP) üzerindeki etkisini incelenmiştir.	Sistemin performans katsayısı (COP) % 14,5 iken, içi ısı değiştirici eklenmesiyle bu değer % 18,5 olmuştur.	[49]
Evaporatif hava soğutma	Sıcak iklim koşullarında hava soğutmalı kondenserlerin verimliliğini, evaporatif soğutmalı kondenser kullanarak artırmayı hedeflemişlerdir. Evaporatif soğutma sistemi eski sisteme entegre edilmiş ve sistem performansında meydana gelen değişiklikler analiz edilmiştir.	Evaporatif soğutulan hava; güç kullanımının % 20 oranda azalmasını ve performans katsayısının (COP) % 50 oranında artmasını sağlamıştır.	[50]
Isı geri kazanımı	Enerji geri kazanım ventilatörü (ERV) yıllık soğutma ve ısıtma enerjisi kullanımı üzerindeki etkisi, dört Amerikan şehrinde 10 katlı bir ofis binası modellenerek araştırılmıştır.	- ERV kullanımı ile nem geri kazanımı sayesinde ısıtma sırasında harcanan enerji miktarı % 40 oranında azalma göstermiştir. - ERV ile nem uzaklaştırma sayesinde soğutma sırasında harcanan enerji miktarında % 20 oranda azalma meydana gelmiştir.	[51]
Farklı iş akışkanı (Nano akışkanlar)	Solar enerji destekli iklimlendirme sisteminde R407c akışkanına, hacimce % 5 oranında tek duvarlı karbon nanotüp eklenmiş ve performansları olan etkileri değerlendirilmiştir.	- Kompresör % 34 daha az çalışmıştır. - Sistem performans katsayısı (COP) % 4,59 oranında artmıştır.	[52]
Kaskad-absorpsiyon sistem	$NH_3 - H_2O$ ve $LiBr - H_2O$ akışkanları ile düşük sıcaklıkta atık ısı kullanarak $-40^\circ C$ 'de soğutma yapmak için Kaskad-Absorpsiyon soğutma sistemini termodinamik açıdan analiz etmişlerdir.	- Maksimum COP değeri 0,19 olmuştur. - Ekserji verimliliğini ise % 9,71 olarak hesaplamışlardır.	[53]

4.3.1. Gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirme çalışmaları

Gizli ısı depolama sistemlerinde, FDM ve iş akışkanı arasında verimli bir ısı transferi sağlamak için iyi tasarlanmış bir ısı değiştirici tasarımına ihtiyaç vardır. Bu tasarım yapılırken ısı değiştiricideki iş akışkanının formu, tasarımın ilk adımı olarak söylenebilir. Örneğin, hava veya su iş akışkanı olacaksa tasarım buna göre ilerlemelidir. İbrahim ve diğ. [54], gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirmeleri için gerekli yöntemleri Şekil 4.2'deki gibi sıralamıştır.



Şekil 4.2. Gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirmeleri

İklimlendirme sistemlerinde FDM kullanımı her ne kadar avantajlı olsa da, FDM'lerin düşük termal iletkenliği ısı transferini, FDM katılaşma/erime süresini olumsuz yönde etkilemektedir. FDM'lerin bu düşük termal iletkenlik değerleri yüksek iletken nanoparçacık ilavesi, düşük yoğunluğa sahip yüksek iletken malzeme ilavesi ve gözenekli malzeme kullanımıyla artırılabilir. Mettawee ve Assasa [55], FDM içerisine alüminyum pudra ilavesi ile FDM şarj süresinin % 60 kısaldığını

görmüştür. Shaikh ve diğ. [56], FDM içine katkılanmış karbon nano-parçacıkların (tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüp, karbon nanofiber) gizli ısı depolama sisteminin termal performansına olan etkisi incelenmiştir. Karbon nanoparçacık eklenmesiyle gizli ısı depolama miktarının önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Wang ve diğ. [57], parafin içeren nanokompozit ve çok duvarlı karbon nanotüplerin termal özellikleri incelemiştir. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analiz sonuçları; termal iletkenliğin sırasıyla % 35 ve % 40 oranında arttığını göstermiştir. Metallerle göre düşük yoğunluğa sahip olmaları sayesinde karbon fiberlerin FDM'lere katkı olarak eklenmesi, FDM'nin termal iletkenliğini artırmaktadır. Buna karşın FDM'lerde termal iletkenliğini artırmak yerine ısı değiştirici tasarımının iyileştirilmesi gerektiğini savunan Lazaro ve diğ. [58], gerçek ölçekli 2 farklı hava – FDM ısı değiştiricisi prototipi tasarlamışlardır. Prototip 1'de belli kalınlığa sahip alüminyum poşetlere inorganik FDM, daha gelişmiş bir tasarım olan Prototip 2'de ise buruşuk levhali alüminyum panellere organik FDM eklenmiştir. Organik FDM'nin düşük ısı iletkenliği nedeniyle, Prototip 2'de Prototip 1'e göre daha az enerji depolanmıştır. Prototip 2 daha gelişmiş bir tasarıma sahip olduğundan; üzerinde daha az enerji depolanmış olmasına rağmen Prototip 1'den daha fazla soğutma yüküne ve daha kısa erime sürelerine sahip olduğu görülmüştür.

Gizli ısı depolama sistemlerinde en sık kullanılan ısı değiştirici tiplerinin spiral, sarmal, çift – borulu, plaka, kompakt ve gövde-borulu olduğu görülmüştür. Regin ve diğ. [59], düz plakalı, gövde – borulu(iç, paralel ve karşıt akışlı) ve küre yataklı olmak üzere bazı ısı değiştirici tasarımları öne sürmüşlerdir. Erek ve diğ. [60], termal enerji depolama sistemlerine en uygun ısı değiştirici modelinin gövde-borulu tip olduğunu belirtmiştir. Isı değiştiriciler bir iklimlendirme sisteminin kalbi gibi nitelendirilebilir. Üretilen veya kazanılan ısı bir başka akışkana ne kadar büyük oranda aktarılırsa sistem performansı da o kadar yüksek olacaktır. İbrahim ve diğ. [54], gizli ısı depolama sistemlerinde verimli bir ısı transferinin yapılabilmesi için faz dönüşüm sürecinde ısı transfer özelliklerinin iyi bilinmesi ve sistemin buna göre tasarlanması gerektiğini belirtmişlerdir.

Gong ve Mujumdar [61], bir gizli ısı depolama sisteminde kullanılan gövde – borulu ısı değiştiricide paralel ve karşıt akışın ısı transfer oranına etkisini incelemiştir. Paralel akışta; FDM'de (% 85 LiF ve % 19,5 CaF) % 5 daha fazla şarj/deşarj

sağlanmıştır. Yüzey alanı arttıkça ısı transfer oranı da artmaktadır. Fath [62], düz plakalı yüzeyi çift borulu tip ısı değiştirici ile değiştirerek yüzey alanını artırmış ve bununla birlikte ısı transferini de artırmıştır. Dolado ve diğ. [63], hava – FDM ısı değiştiricisinde FDM levha uzunluğu ve buruşukluğunun ve hava akış hızının ısı transferine olan etkisini gözlemlemişlerdir. Levha uzunluğu, buruşukluğu ve hava akış hızı artarken; FDM levha kalınlığı ve ara boşluğun azalmasıyla birlikte daha yüksek ısı transfer hızlarına ulaştıklarını raporlamışlardır.

Bu çalışmada, RT-18 HC ve RT-21 HC FDM'leri makrokapsülleme yoluyla iklimlendirme sistemine entegre edilerek farklı hava hızı, sıcaklık ve plakalar arası mesafe altında enerji depolama ünitesinin ortamın soğutma ihtiyacını karşılama potansiyeli ve beraberinde getirdiği parasal tasarruf miktarı incelenmiştir.



5. DENEY SİSTEMİ TANITIMI VE YÖNTEM

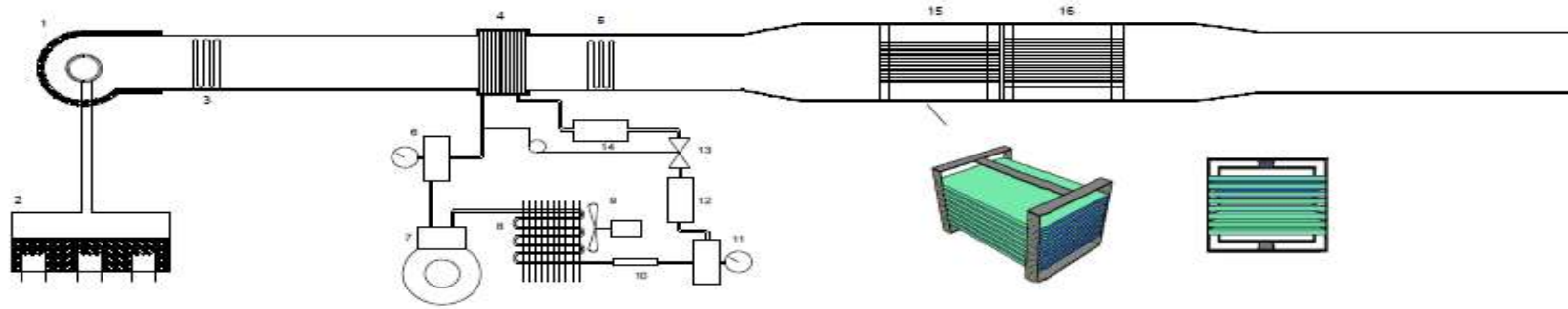
5.1. Deney Sistemi Tanıtımı

İklimlendirme sistemlerinde gizli ısı depolama teknolojisi kullanımının mahal soğutma ihtiyacına etkisinin incelenmesi amacıyla laboratuvar ortamında gizli ısı depolama ünitesine sahip bir deney sistemi kurulmuştur. Sistemin kurulumunda, P.A. Hilton A573 model iklimlendirme sistemi deney düzeneğinden yararlanılmıştır. Deney düzeneği üç faz (380 V) elektrik sistemiyle çalışmakta ve düzenekte bulunan ekipmanların özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Hava nemlendirme ünitesi (2+2+1 kW)
- Hava ön ısıtıcısı (1+1 kW)
- Soğutma çevrimi (Kompresör gücü: 0,410 kW, buharlaştırıcı gücü: 2,15 kW)
- Hava son ısıtıcısı (0,5+0,5 kW)
- Hız ayarlı santrifüj tip fan (120 W)

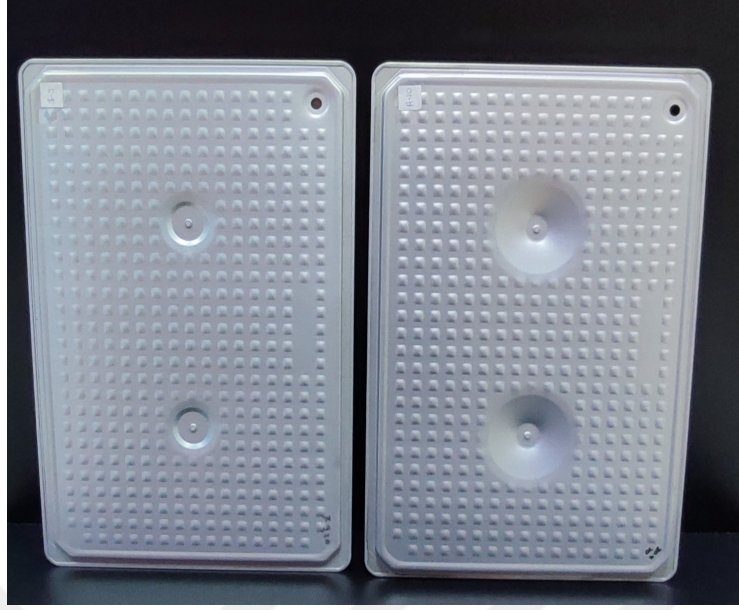
P.A. Hilton A573 deney düzeneği 260 x 260 mm kanal ölçülerine ve 5 mm et kalınlığına sahiptir. Isıl enerji depolama malzemelerinin konumlanacağı 390 (G) x 360 (Y) x 1500 (U) mm boyutlarında tasarlanan ve karbon çelik malzemeden imalatı gerçekleştirilen kanal, redüksiyonlar yardımıyla deney düzeneği kanalına sabitlenmiştir. Kanal bağlantılarında hava sızdırmazlığını sağlamak için kanal flanşlarına sünger conta yapıştırılmıştır. Deney sisteminin teknik çizimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

Makrokapsülleme yöntemi ile hem ısı enerjisi depolamak hem de ısı iletkenliği artırmak mümkündür. Makrokapsülleme için kullanılan modüller, RubiTherm GmbH şirketinden, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, 15’er adet 300(G) x 450(U) x 10(K) mm ve 300(G) x 450(U) x 15(K) mm boyutlarında toplamda 30 adet olmak üzere tedarik edilmiştir. Farklı kalınlıklardaki bu plakaları kanalın içinde belirlenmiş farklı mesafelerde tutması amacıyla iki adet plaka taşıyıcısı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Her iki tip plaka için de plakalar arası mesafe 10 mm ve 20 mm olacak şekilde tasarlanan taşıyıcı malzeme de karbon çelikten imal edilmiştir. Taşıyıcı malzemenin kanala kolay şekilde konulup gerekli durumlarda geri alınabilmesi için kanalın üst kısmı kapaklı şekilde tasarlanmıştır.



1-Fan	5-Hava son ısıtıcı	9-Yoğuşturucu fanı	13-Termostatik genişleme vanası
2-Hava nemlendirme ünitesi	6-Manometre	10-Kurutucu	14-Termometre
3- Hava ön ısıtıcı	7-Kompresör	11-Manometre	15-Gizli ısı depolama ünitesi
4-Buharlaştırıcı	8-Yoğuşturucu	12-Debimetre	16-Gizli ısı depolama ünitesi

Şekil 5.1. Isıl enerji depolama ünitesine sahip iklimlendirme deney düzeneği şeması



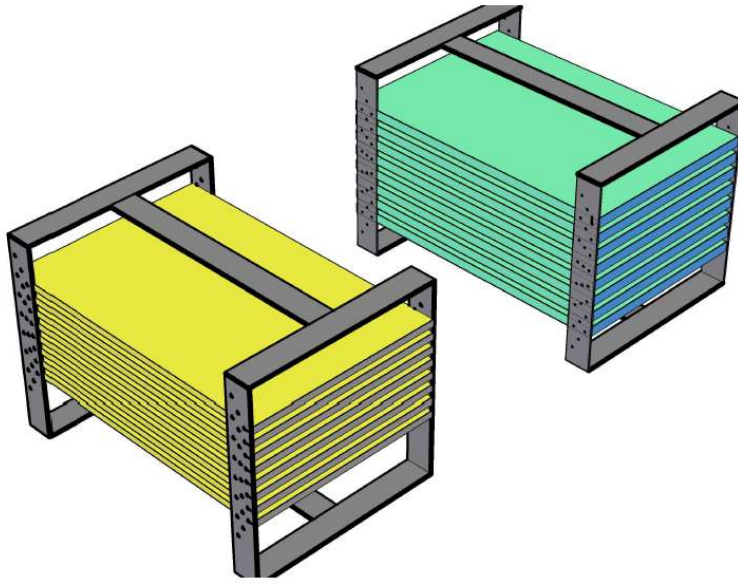
Şekil 5.2. Makrokapsülleme plakaları

Faz değıştiren malzeme olarak inorganik RT – 18HC ve RT – 21HC RubiTherm GmbH tarafından tedarik edilmiştir. Kullanılan faz değıştiren malzemelerin özellikleri Tablo 5.1’de [64] detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan FDM özellikleri

Özellik	FDM	RT – 18HC	RT – 21HC
Erime noktası (°C)		17-19	20-23
Donma noktası (°C)		19-17	21-19
Isıl enerji depolama kapasitesi (kJ/kg)		260 ± %7,5	190 ± %7,5
Yoğunluk (sıvı) (kg/L)		0,77	0,77
Yoğunluk (katı) (kg/L)		0,88	0,88
Isıl iletkenlik (W/m.K)		0,2	0,2
Gizli ısı enerjisi depolama sıcaklık aralığı (°C)		11-26	13-28

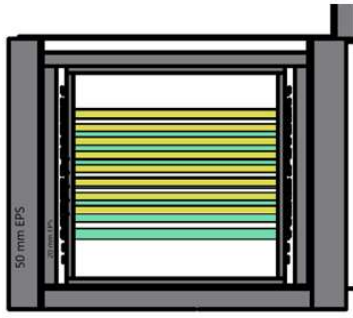
Makrokapsülleme işlemi yapıldıktan sonra içleri faz değiştiren malzemelerle doldurulan plakalar, farklı mesafelerde konumlandırılarak test düzeneğine dahil edilmiştir. Plakalar arası bu mesafeleri ayarlamak için iki adet 320 mm (Y) x 450 mm (U) x 320 mm (G) ölçülere sahip plaka taşıyıcısı imal edilmiştir. Her iki tip plaka içinde plakalar arası mesafe 10 mm, 15 mm ve 20 mm olabilecek şekilde tasarlanan taşıyıcı malzemenin teknik çizimi Şekil 5.3'te verilmiştir



Şekil 5.3. FDM dolu plakalar için taşıyıcılar

FDM'ler kanal içine belirlenen mesafelerde konulduktan sonra kanalın yalıtım işlemi yapılmıştır. Kanalın içinden 20 mm, kanalın dışından ise 50 mm kalınlığa sahip StarTherm marka, grafit takviyeli EPS levhalar ile yalıtım sağlanmıştır. Kullanılan EPS levhaların ısı iletkenlik katsayısının 0,032 W/m.K'den düşük olduğu ürün veri dosyasında belirtilmiştir. Yalıtım işleminin görseli Şekil 5.4'te verilmiştir.

Kanal içinden akan havanın sıcaklık, hız, nem ve plaka yüzey sıcaklık değerlerinin ölçülerek kaydedilmesi için GraphTech GL 480 marka veri kayıt cihazı kullanılmıştır. Veri kayıt cihazına hava hızı, sıcaklık-nem ve ısı çift bağlantıları yapılmıştır. Hava hızı ve sıcaklık-nem sensörlerinin enerjileri 24 V DC güç kaynağından beslenmiştir. Fan, ısıtıcı ve kompresör-fan grubunun güç kullanımı 3 adet pens ampermetre yardımıyla izlenerek kayıt altına alınmıştır. Plakaların ve içinde bulunan FDM'lerin sıcaklıkları ısı çiftleri yoluyla ölçülerek kaydedilmiştir. Deney sisteminde ölçüm için kullanılan cihazlar Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Kanalin EPS ile yalıtımı

Tablo 5.2. Ölçüm esnasında kullanılan cihazların detayları

Cihaz Detayı	Kullanım Detayı	Adet	Ölçüm Aralığı	Doğruluk
GraphTech GL 480	Veri kayıt cihazı	1	-	-
K tipi ısıl-çift (2x0,5mm)	Sıcaklık ölçümü	16	-40...+375 °C	% 0,75 °C
BlitzSens VS- C2	Hava hız transmitteri	2	0-20 m/s	% 3
CEM DT 8893	Termo- Anemometre	1	0 – 30 m/s	% 3
BlitzSens TH2-3P	Sıcaklık ve nem transmitteri	2	-40...+70°C Sıcaklık 0-%100 bağıl nem	±0.3°C ±% 2-3 rH
Brymen BM- 151 Pens ampermetre	Akım-Gerilim-Güç- Güç Faktörü	3	600 V'a kadar AC/DC ve 40A'e kadar AC	% 0,5 ve % 1

5.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında makrokapsülleme yöntemi kullanılarak faz değiştiren malzemelerin iklimlendirme sistemine yerleştirilmesiyle soğutma yükünün azaltılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında gizli ısı depolama ünitesine sahip bir iklimlendirme deney sistemi kurulmuştur. Bu sistemde, makrokapsülleme için kullanılan plakalar klasik mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi buharlaştırıcısının çıkış konumuna yerleştirilmiştir. RubiTherm GmbH tarafından tedarik edilen 15 mm ve 10 mm kalınlığa sahip plakaların içerisine belirli ve önerilen miktarlarda FDM konulmuştur. FDM'lerin genleşme oranları da göz önünde bulundurulduğunda 15 mm kalınlığa sahip plakalar 1'er kg, 10 mm kalınlığa

sahip plakalar ise 0,5 kg organik FDM alabilmektedir. 15 mm kalınlığa sahip plakalara A-1, A-2,..., A-8; 10 mm kalınlığa sahip plakalara ise B-1, B-2,..., B-7 kodları verilmiştir.

Kodlama işlemi tamamlanan plakaların kapasitelerine göre RT – 18 HC ve RT – 21 HC FDM’leri hassas terazide tartılarak içleri doldurulmuş ve FDM’nin kapsüllenmesi sağlanmıştır. Görece daha yüksek ısı depolama kapasitesi sebebiyle 15 mm plakalara 0,95 kg RT – 18 HC, 10 mm plakalara ise 0,5 kg RT – 21 HC konulmuştur. Doldurma işlemi tamamlandıktan sonra plakaların doldurma delikleri kapatılarak sızdırmazlıkları sağlanmıştır. Soğutma işlemleri sırasında kullanılan FDM ve depolanan enerji miktarı Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.3. Soğutma deneyi sırasında FDM karakteristikleri

	RT-18 HC	RT-21 HC	<i>TOPLAM</i>
Toplam Miktar (kg)	7,6	3,5	11,1
Toplam Depolanan Enerji (kJ)	1976	665	2641
Toplam Depolanan Enerji (Wh)	547,2	185,5	732,7

RT-18 HC ve RT-21 HC’nin şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmek için P.A. Hilton A573 deney düzeneğinin ekipmanları kullanılmıştır. Şarj işlemi sırasında fan – kompresör grubu; deşarj işlemi sırasında fan – ısıtıcı grubu çalıştırılmıştır. Bu iki malzemenin şarj – deşarj işlemleri farklı plakalar arası mesafe, hava hızı ve sıcaklıklar altında incelenmiştir. Tablo 5.4’te yapılan deney senaryoları verilmiştir. Kompresör on-off yöntemiyle FDM içeren plakaların şarj işlemleri eş zamanlı soğutma ve geri dönüş havası kullanımı olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Eş zamanlı soğutmada hem ortamın soğutma ihtiyacı karşılanmış hem de FDM’in şarjı sağlanmıştır. Geri dönüş havalı sistemde ise plakalar kapalı çevrim altında çıkış havası kullanılarak şarj edilmiştir.

Deney sisteminde sıcaklık, nem, hız ve güç parametreleri belirlenen noktalardan ölçülmüş ve veri kayıt cihazı ile kaydedilmiştir. Plakaların yüzeyinden giriş-çıkış olmak üzere ısı çiftler yoluyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçüm noktaları ve deney düzeneğinin görünüşü Şekil 5.5’te verilmiştir. Tablo 5.5’te de bu ölçüm noktalarına ait detaylardan bahsedilmiştir.

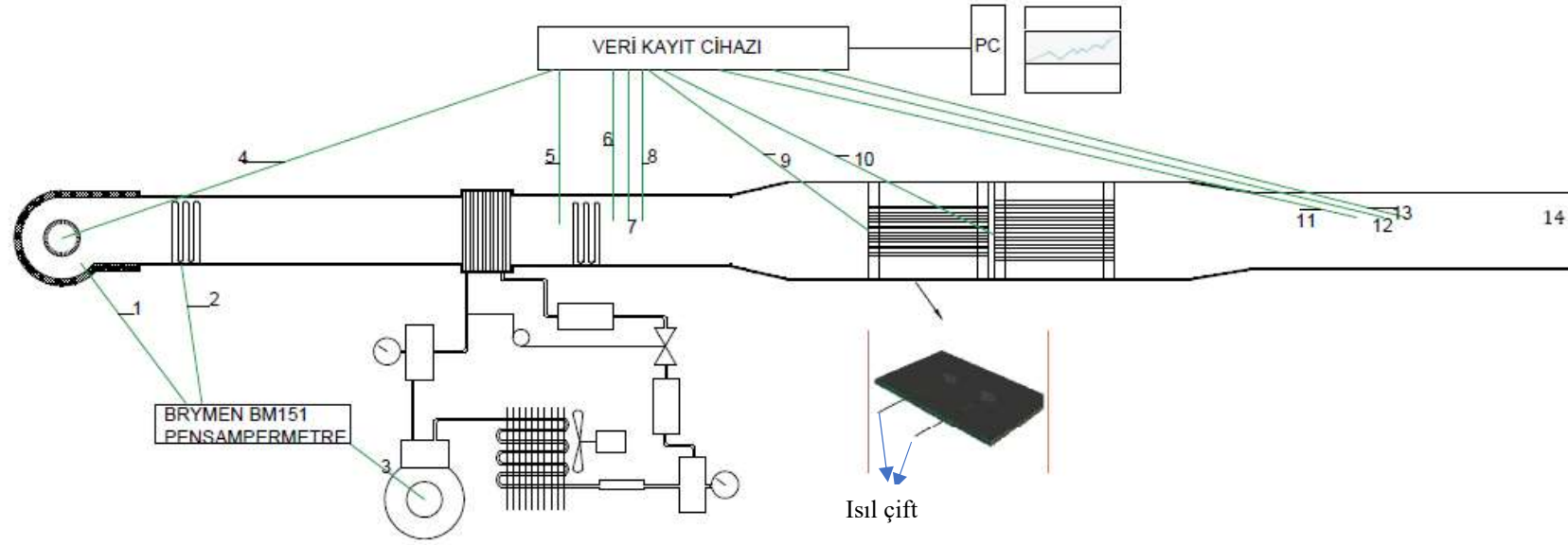
Tablo 5.4. Soğutma deney senaryoları

Soğutma (Kompresör On-Off Yöntemi)

Deney No	FDM ŞARJ (Eş zamanlı)					
	Mesafe (mm)	FDM	Ortalama Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Isıtıcı	Evaporatör
1	20	RT18-HC (8 Adet 15mm Plaka)	1,5	9	Kapalı	Açık
3			2	11		
5			2,5	13		
7	10	RT 21-HC (7 Adet 10 mm Plaka)	1,5	9		
9			2	11		
11			2,5	13		
Deney No	FDM Şarj (Geri Dönüş Havalı)					
	Mesafe (mm)	FDM	Ortalama Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Isıtıcı	Evaporatör
13	20	RT18-HC (8 Adet 15mm Plaka)	1,5	9	Kapalı	Açık
14			2	11		
15			2,5	13		
16	10	RT 21-HC (7 Adet 10 mm Plaka)	1,5	9		
17			2	11		
18			2,5	13		
Deney No	FDM Deşarj					
	Mesafe (mm)	FDM	Ortalama Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Isıtıcı	Evaporatör
2	20	RT18-HC (8 Adet 15mm Plaka)	1,5	38	Açık (1 kW)	Kapalı
4			2	34		
6			2,5	32		
8	10	RT 21-HC (7 Adet 10 mm Plaka)	1,5	38		
10			2	34		
12			2,5	32		

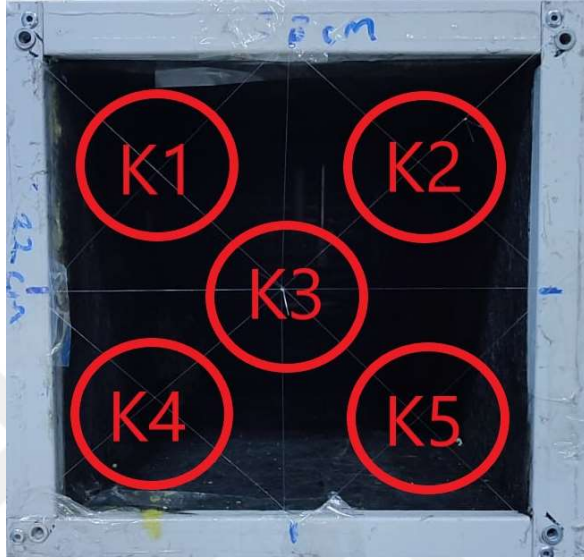
Tablo 5.5. Ölçüm noktalarından okunan parametreler

Ölçüm Noktası	Ölçülen Parametre	Ölçümde Kullanılan Ekipman
1, 2, 3	Güç	Brymen BM151 Pens ampermetre
4, 5, 9, 10	Sıcaklık	K tipi ısıl çift
6, 11	Hava hızı	BlitzSens VS-C2
7, 8, 12, 13	Sıcaklık, Nem	BlitzSens TH2-3P
14	Hava hızı	CEM DT 8893



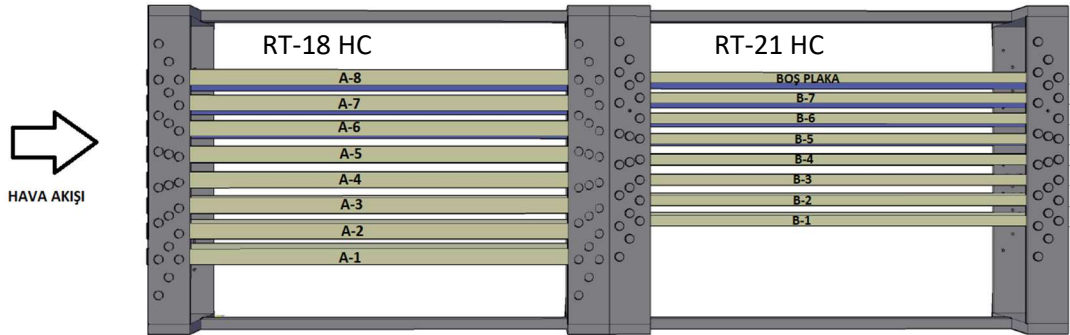
Şekil 5.5. İklimlendirme deney düzeneği ölçüm noktaları

P.A. Hilton A573 deney düzeneği ile hava istenilen sıcaklık ve hızlara şartlandırılarak FDM üzerine gönderilmiştir. Hava hızları kanal çıkışında yani ortama üfleme bölümünde 5 farklı noktadan CEM DT 8893 Anemometre ile ölçülmüş ve ortalama hava hızı hesaplanmıştır. Kanal çıkışından hava hızı ölçüm bölmeleri Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6. Hava hızı ölçüm bölmeleri

FDM’lerin kanal içine dizilimi sırasında erime sıcaklığı düşük olan RT – 18 HC içeren plakalar kanal girişine, erime sıcaklığı nispeten daha yüksek olan RT – 21 HC hemen arkasına konumlandırılmıştır. Bu plakaların dizilişini içeren teknik çizim Şekil 5.7’de verilmiştir. RT – 21 HC konulmuş olan plakalar toplamda 7 adettir. Hava akış rejimini bozmamak için EPS’den benzer ölçüde kesilmiş parça B-7 numaralı plakanın üst kısmına konulmuş ve boş plaka olarak adlandırılmıştır.



Şekil 5.7. Plakaların kanal içinde 10 mm mesafeyle konumlanışının teknik çizimi

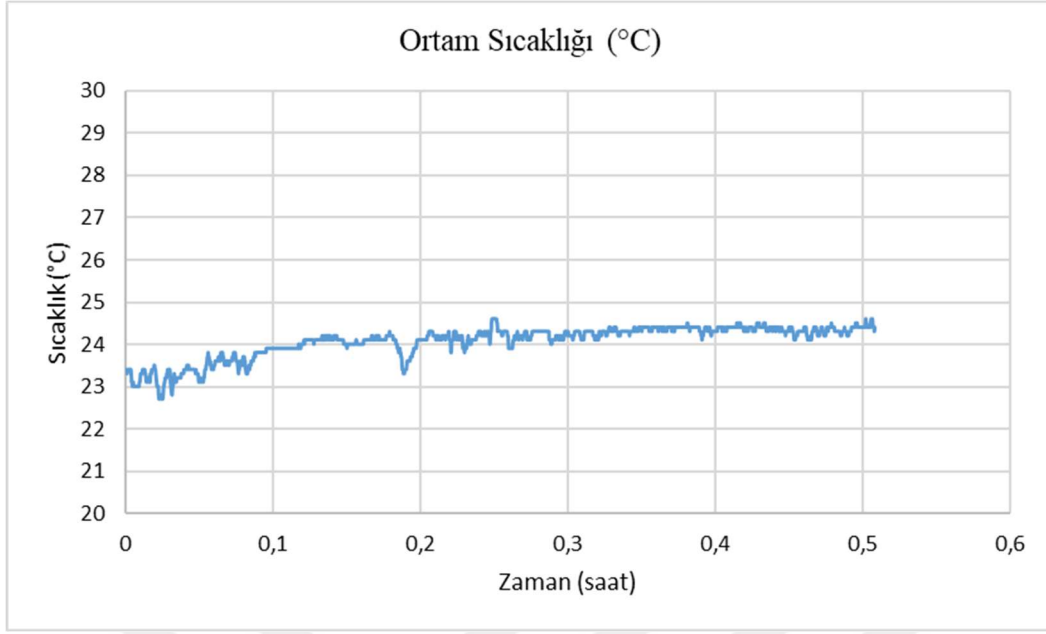


6. DENEYSEL BULGULAR

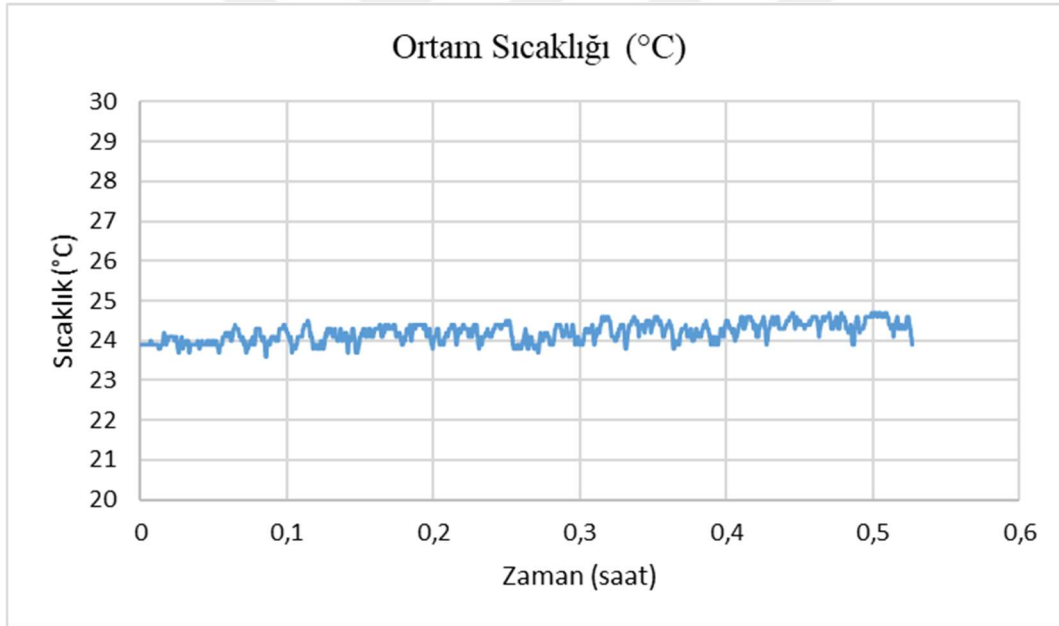
Bu bölümde, gizli ısı enerjisi depolama ünitesine sahip iklimlendirme deney sisteminde farklı senaryolar altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular verilmiştir. Yüksek enerji depolama kapasitelerine ve uygun faz geçiş sıcaklıklarına sahip RT – 18 HC (~260 kJ/kg, 17-19 °C) ve RT – 21 HC (~190 kJ/kg, 19-23 °C) faz değiştiren malzemeleri ile doldurulmuş alüminyum plakaların depolama ünitesindeki dizilimi ve konumunun, hava giriş hızı ve sıcaklığının soğutma performansına olan etkileri incelenmiştir. Bu etkileri ve sistemin rejime girmesini daha rahat gözlemlemek için bütün deney senaryolarına ait içinde FDM bulunmayan plakalar kullanılarak boşa çalışma deneyleri yapılmıştır. Boşa çalışma deneylerinde kanal giriş – çıkış sıcaklığı eşitlenene yani sistem ısı dengeye ulaşınca kadar, ortam sıcaklığı, plaka yüzey sıcaklıkları, hava hız ve sıcaklıkları ölçülmüş ve bir veri kayıt sistemi kullanılarak bu veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Boşa çalışma deneyleri tamamlandıktan sonra plakaların içi FDM ile doldurularak farklı şarj ve deşarj koşulları altında sistem performansı incelenmiştir.

6.1. FDM İçermeyen Plakalar ile Gerçekleştirilen Deneyler

İklimlendirme deney sisteminin ve sistem elemanlarının özellikle ısı davranışının daha iyi analiz edilebilmesi için FDM içermeyen plakalar kullanılarak boşa çalışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için Tablo 5.4'te belirtilen deney koşullarında (farklı hava hızı, sıcaklık, plakalar arası mesafe) ısıtma-soğutma deneylerinin her biri için boşa çalışma deneyleri yapılmış ve ölçümler kayıt altına alınmıştır. Burada, elde edilen bulgular incelendiğinde benzer nitelikte olması sebebiyle Deney-2 ve Deney-3 senaryolarına ait bulgular örnek olarak sunulmuştur. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de Deney-2 ve Deney-3 senaryosuna ait deneylerin yapıldığı laboratuvar ortamına ait sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Deneysel çalışma esnasında, ortam sıcaklıklarının diğer deney senaryoları için de benzer şekilde ~24 °C civarında sabit kalması sağlanmış hemen hemen aynı koşullarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

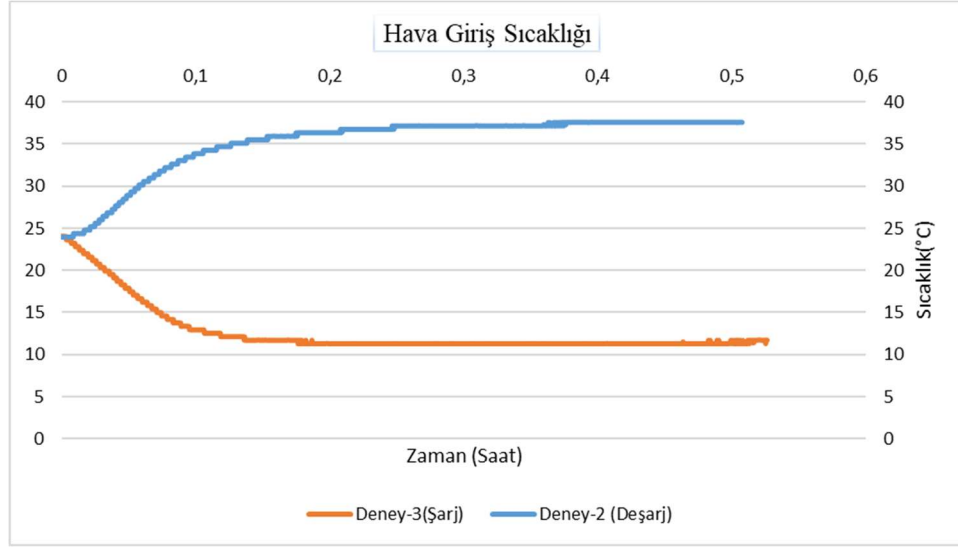


Şekil 6.1. Deney-2 senaryosuna ait ortam sıcaklığı



Şekil 6.2. Deney-3 senaryosuna ait ortam sıcaklığı

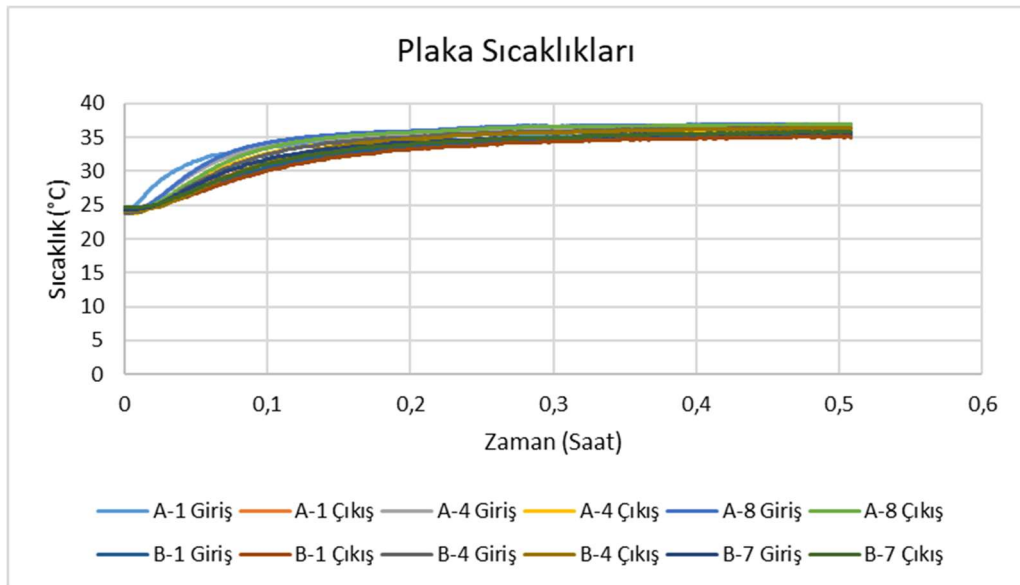
Bu bölümde, kanal içerisine konulan ve içleri boş olan plakalar üzerinden deney senaryosuna göre şartlandırılmış hava gönderilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney-2 (deşarj boştaki çalışma) için; 38 °C sıcaklık ve ortalama 1,5 m/s hız; Deney-3 (şarj boştaki çalışma) için 11 °C sıcaklık ve ortalama 2 m/s hız değerine şartlandırılmış hava içi boş plakalar üzerinden geçirilmiştir. Deney – 2 ve Deney – 3 için şartlandırılmış havaya ait grafik Şekil 6.3’te verilmiştir. Şekil 6.3’te görüldüğü üzere şartlandırılan hava, ortalama 0,2 saat (12 dakika) içerisinde rejime girmiştir.



Şekil 6.3. Deney-2 ve Deney-3'e ait kanal giriş hava sıcaklığının zamanla değişimi

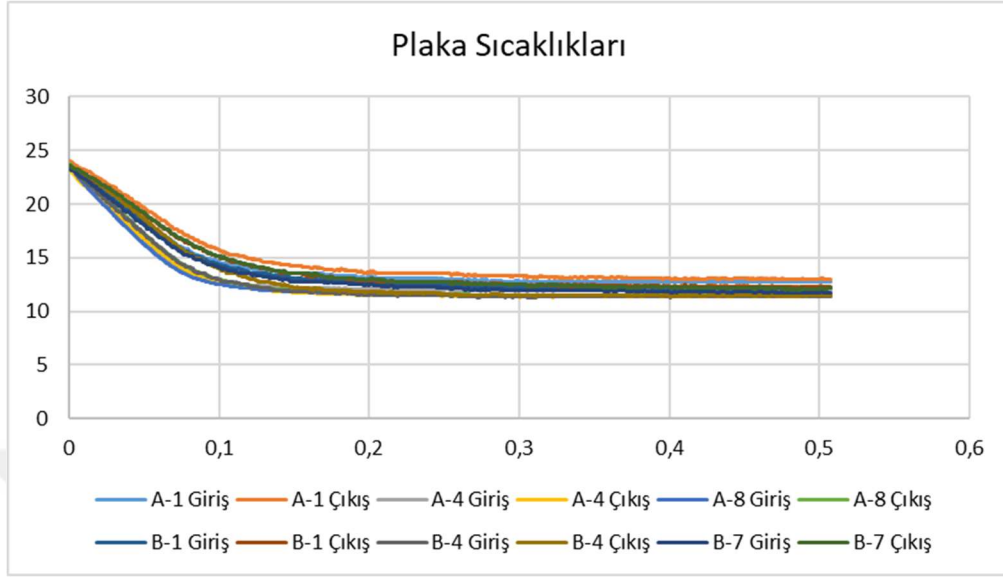
Deney-2, plakalar içine konulacak olan FDM'nin erime yani deşarj koşullarından biri olan 38°C hava sıcaklığı, 1,5 m/s hava hızını kapsamaktadır. Deney-3 ise plaka içine konulacak olan FDM'nin katılaşması yani şarj koşullarından biri olan 11 °C hava sıcaklığı, 2 m/s hava hızını içermektedir. Diğer koşullarda yapılan boşta çalışma deneyleri incelendiğinde de sistemin rejime girme süresinin ortalama 12 dakika olduğu gözlenmiştir.

Plakaların farklı mesafelere göre kanal giriş – çıkış sıcaklıkları incelenmiştir. 38 °C hava sıcaklığı, 1,5 m/s hava hızı ve 20 mm plakalar arası mesafe koşulları altında (Deney – 2, deşarj) plaka sıcaklıklarına ait veriler Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Deney-2 senaryosu için plaka sıcaklıkları

11°C hava sıcaklığı, 2 m/s hava hızı ve 20 mm plakalar arası mesafe koşulları altında (Deney-3, şarj) plaka sıcaklıklarına ait veriler Şekil 6.5’de verilmiştir.



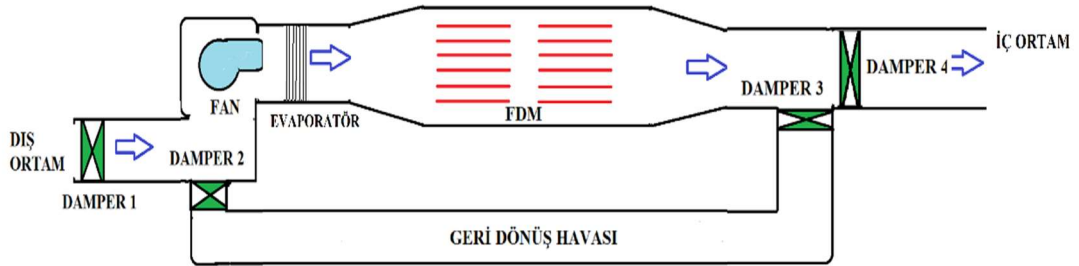
Şekil 6.5. Deney-3 senaryosu için plaka sıcaklıkları

Her iki farklı deney durumunda da görüldüğü gibi kanal giriş sıcaklığı ve plaka sıcaklıklarının ısıl dengeye gelmeleri 0,2 saat (12 dakika) civarında sürmüştür. Boşta çalışma deneyleri tamamlandıktan sonra plakaların içleri FDM’ler ile doldurulmuştur. Plaka taşıyıcılarının en üst, orta ve en alt raflarından bulunan plakaların giriş – çıkış noktalarından ısıl çiftler yoluyla sıcaklık ölçümleri alınmış ve FDM’lerin erime ve katılaşma süreleri incelenmiştir. Boşta çalışma deneylerinde ölçüm alınan bütün plakalara ait detaylar FDM ile dolu plakalar ile gerçekleştirilen deneyler için bir referans noktası olmuştur.

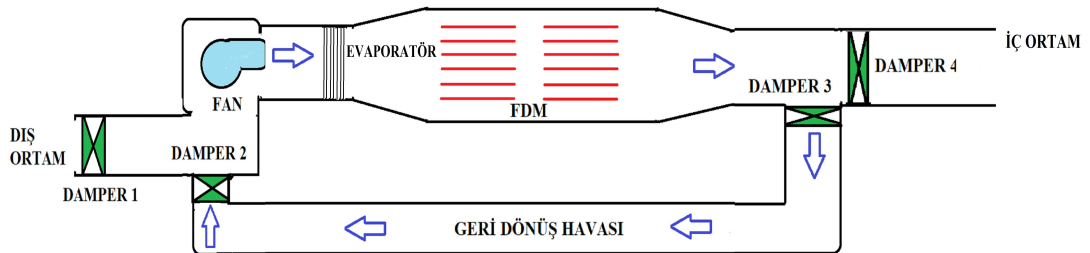
6.2. FDM İçeren Plakalar ile Gerçekleştirilen Şarj Deneyleri

Şarj deneylerinde eş zamanlı soğutma ve geri dönüş havalı soğutma olmak üzere iki farklı senaryo altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Eş zamanlı soğutma sisteminde ortamın soğuk hava ihtiyacı ve FDM’nin katılaşması aynı anda gündüz saatlerinde sağlanırken; geri dönüş havalı soğutma sistemi kullanılarak yapılan şarj işleminde ise gece saatlerinde sistem kapalı döngü haline getirilmiştir. Eş zamanlı ve geri dönüş havalı sistemin şematik gösterimi Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.6.’da görüldüğü üzere eş zamanlı sistem çalışırken Damper – 1, Damper – 4, fan ve kompresör açık; Damper – 2 ve Damper – 3 kapalı durumdadır. Dış ortam havası

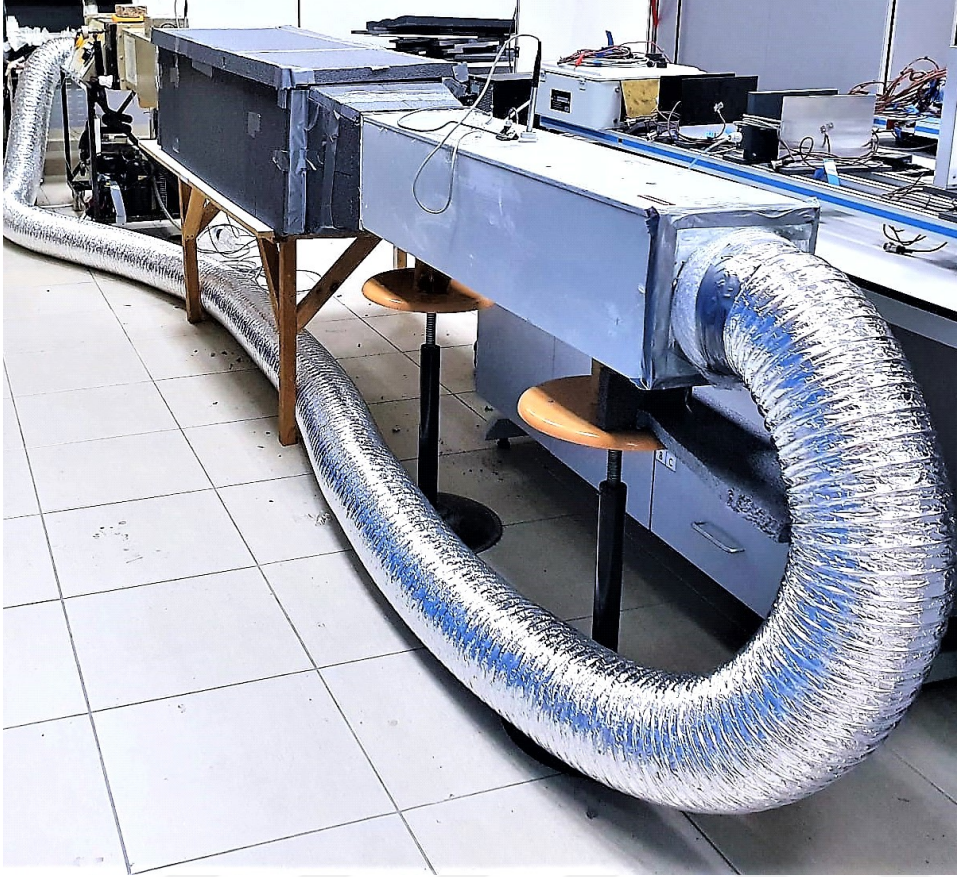
evaporatör üzerinden soğutularak kanal içerisinde iç ortama yönlendirilmiştir. Şekil 6.7’de ise geri dönüş havası kullanılmıştır. Bu şarj işlemi ise Damper – 2, Damper – 3, fan ve kompresör açık; Damper – 1 ve Damper – 4 kapalı durumda olacak şekilde modellenmiştir. Şekil 6.8’de geri dönüş havalı sistemin deneysel düzeneği gösterilmiştir. FDM’ler plakalara doldurulduktan sonra her bir plaka numaralandırılmış ve kanal içine plaka taşıyıcılar vasıtasıyla yerleştirilmiştir. FDM’lerin katılma (şarj) ve erime (deşarj) olayları farklı sıcaklık ve hızlar altında incelenmiştir. Bu bölümden sonra katılma süreci şarj, erime süreci isedeşarj olarak adlandırılacaktır. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da plakaların farklı mesafelerde konumuna ait teknik çizim verilmiştir. Şekil 6.11’de görüldüğü gibi FDM’lerin katılma süreleri incelenirken plakaların yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ancak, FDM içeren plakaların tamamen şarj olduğundan emin olunmalıdır. Bu durumdan emin olmak için plaka sıcaklıkları ve FDM plakaların girişi ve çıkışındaki hava sıcaklığı ölçülerek kaydedilmiştir. Eş zamanlı soğutma sisteminde şartlandırılan havanın kanal giriş ve çıkış sıcaklığı eşit olduğu durumda bir başka deyişle sistemin ısı dengeye ulaştığı anda sıcaklık farkı olmayacağından ve ısı transferi gerçekleşmeyeceğinden FDM’nin katıldığı kabul edilmiştir.



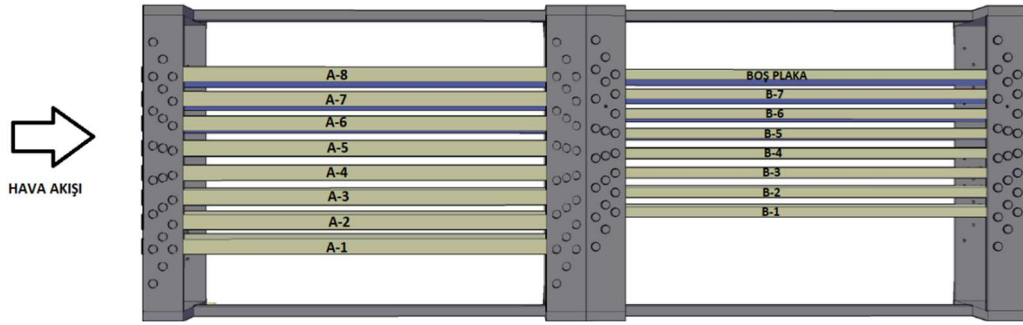
Şekil 6.6. Eş zamanlı soğutma sistemi



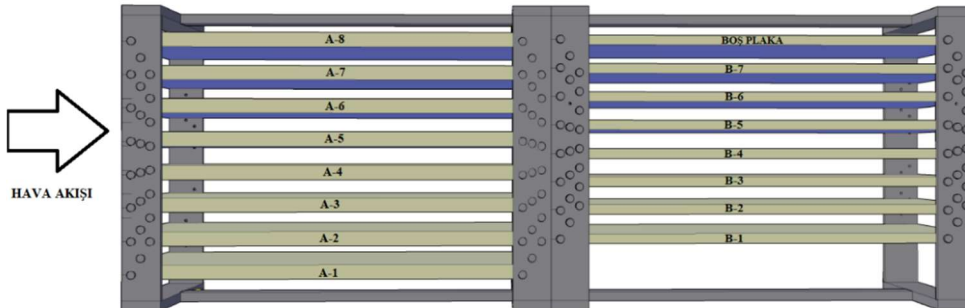
Şekil 6.7. Geri dönüş havalı soğutma sistemi



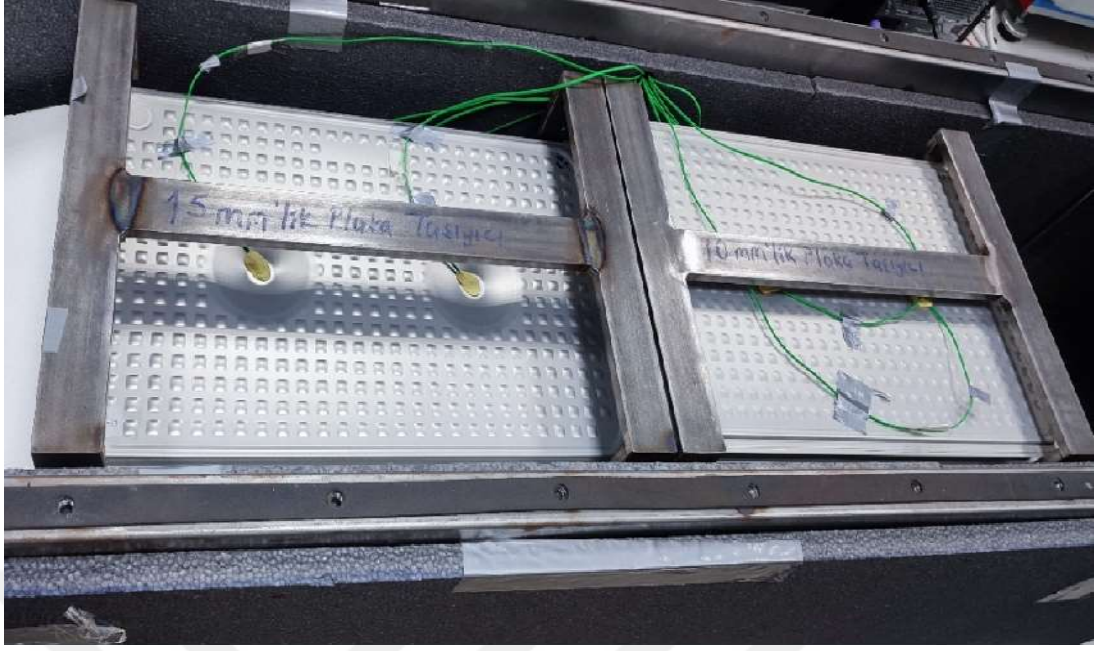
Şekil 6.8. Geri dönüş havalı sistemin deneysel düzeneği



Şekil 6.9. Plakaların 10 mm mesafede konumu



Şekil 6.10. Plakaların 20 mm mesafede konumu



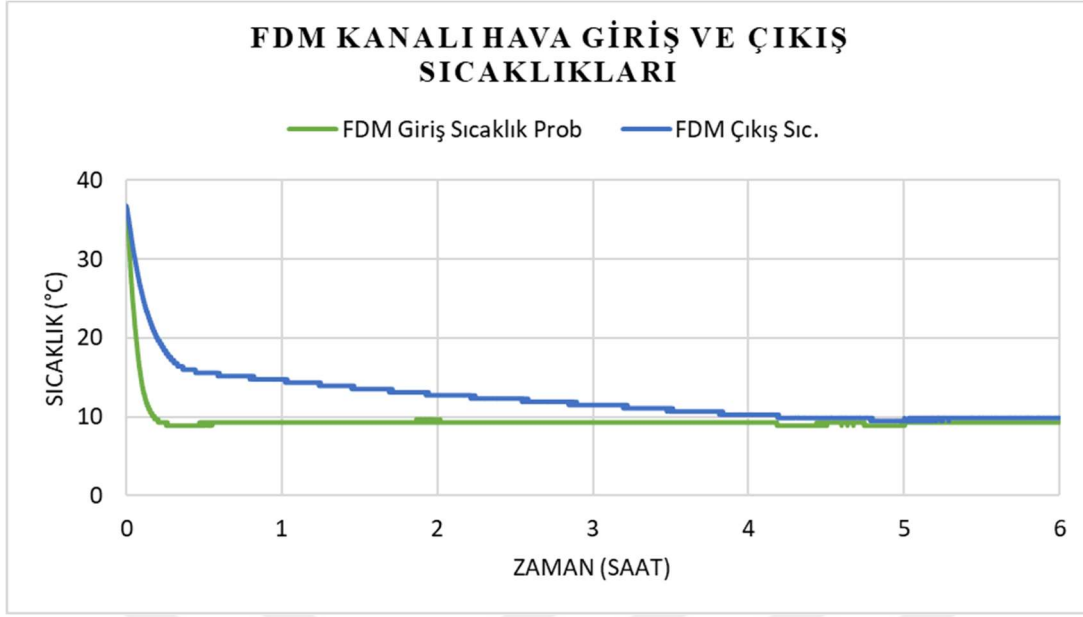
Şekil 6.11. Isıl çiftlerle plaka yüzeylerinden sıcaklık ölçümü

6.2.1. Giriş koşullarının şarj sürecine etkisi (eş zamanlı ve geri Dönüş Havalı)

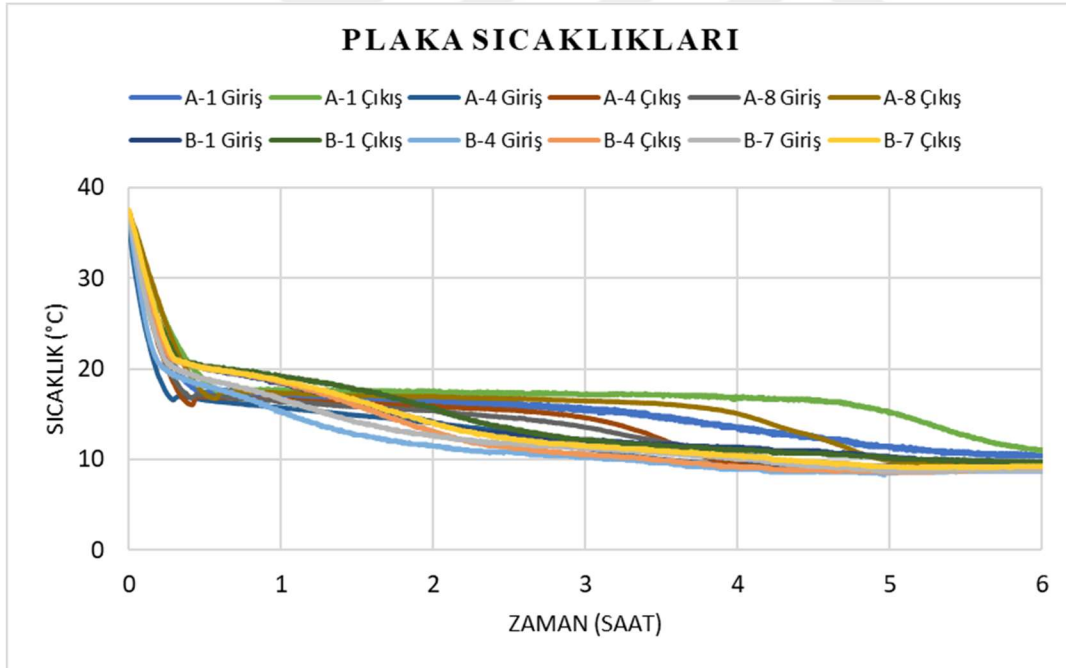
FDM içeren plakaların şarj süreci üç farklı hava hızı ve sıcaklık koşulları altında incelenmiştir. Eş zamanlı soğutma sisteminde hava giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının $\Delta T \sim 0,5$ °C değerinin altına düştüğü nokta, sistemin ısıl dengeye ulaştığı zaman olarak kabul edilmiştir. Deney numaraları (1 – 3 – 5 – 7 – 9 – 11) olanlar eş zamanlı soğutmayı, (13 – 14 – 15 – 16 – 17 – 18) olanlar ise geri dönüş havalı sistemi temsil etmektedir. Bu bölümde eş zamanlı soğutma şarj deney senaryoları ele alınmıştır.

- **Deney – 1**

Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 1,5 m/s hız 9 °C sıcaklık ve % 70 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.12’de görüldüğü gibi sistem ısıl dengeye 4,89 saat (293 dakika) içerisinde ulaşmıştır. Şekil 6.13’te bu hava şartları altında plakaların ısıl davranışları verilmiştir.

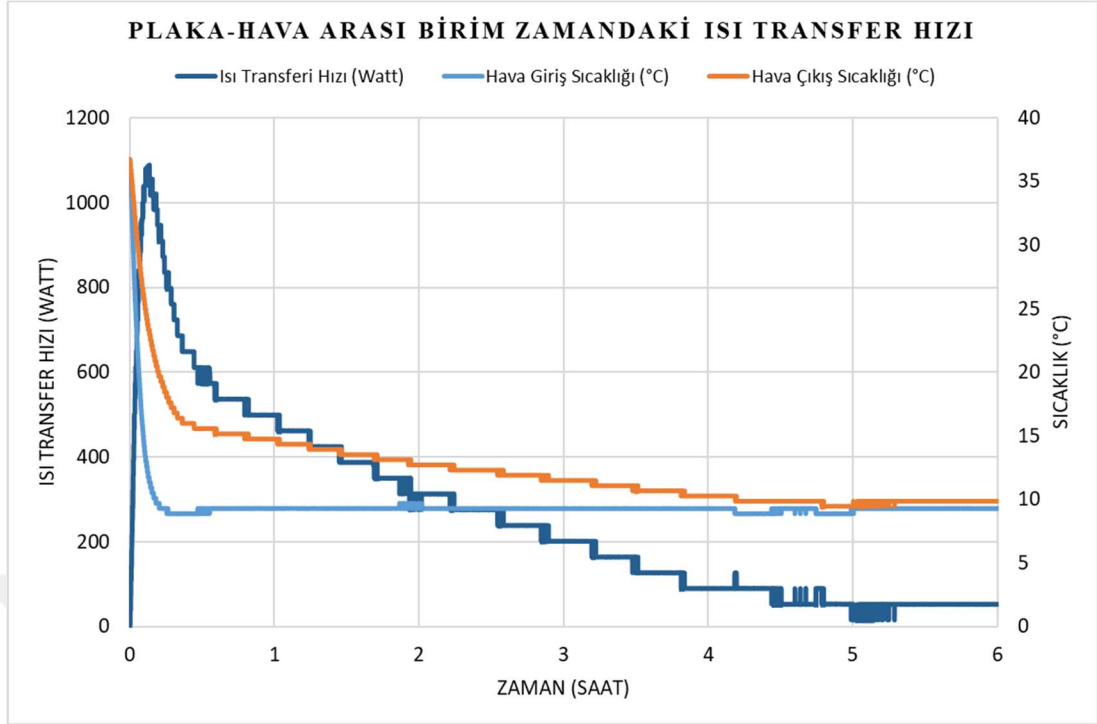


Şekil 6.12. Deney – 1 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.13. Deney – 1 için plaka sıcaklıkları

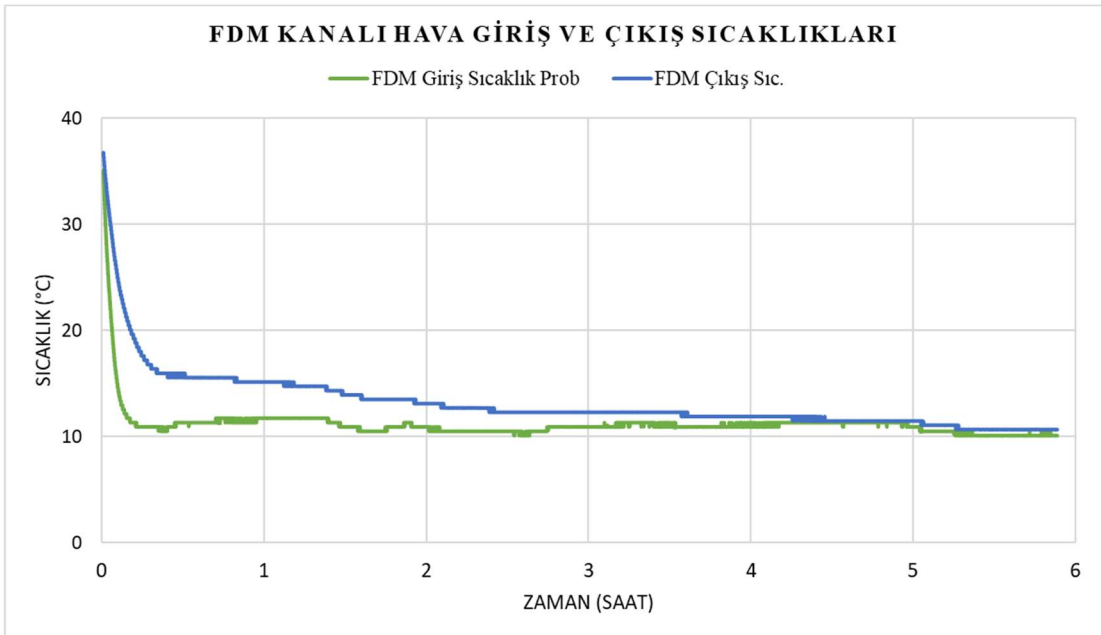
Kanal giriş ve çıkış sıcaklıklarının ölçülüp kaydedilmesiyle hava ile FDM içeren plakalar arasında zamana göre ısı transferini gözlemlemek mümkün olmuştur. Şekil 6.14'te şartlandırılan havanın FDM'yi katılaştırmak için plakadan zamana bağlı absorbe ettiği ısı enerjisi miktarı verilmiştir.



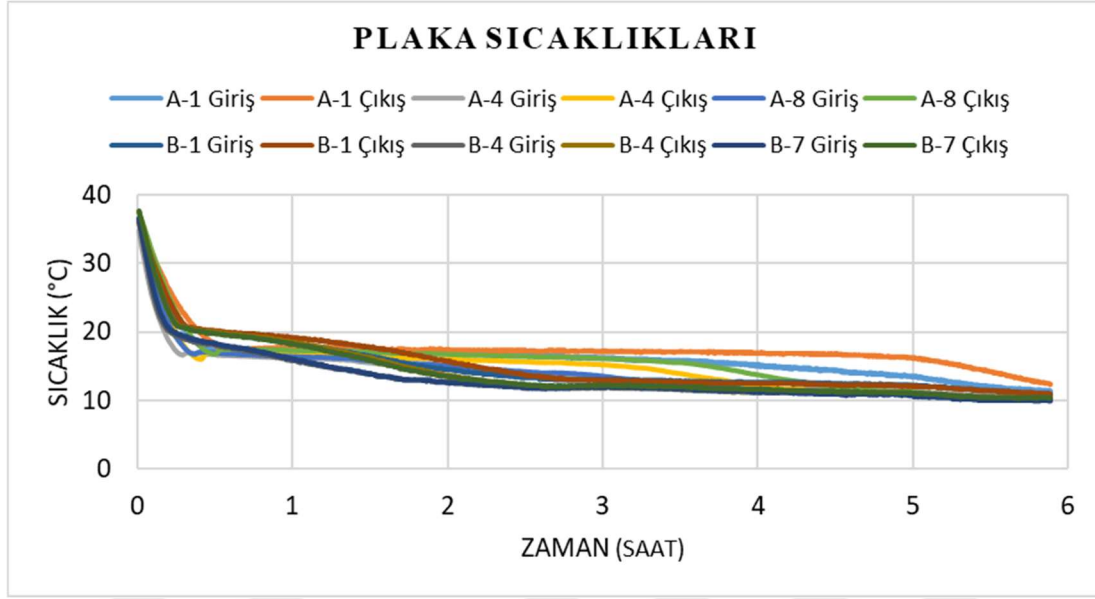
Şekil 6.14. Deney – 1 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

• Deney – 3

Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 2 m/s hız, 11 °C sıcaklık ve % 65 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.15’de görüldüğü gibi sistem ısı dengeye 4,17 saat (250 dakika) içerisinde ulaşmıştır.

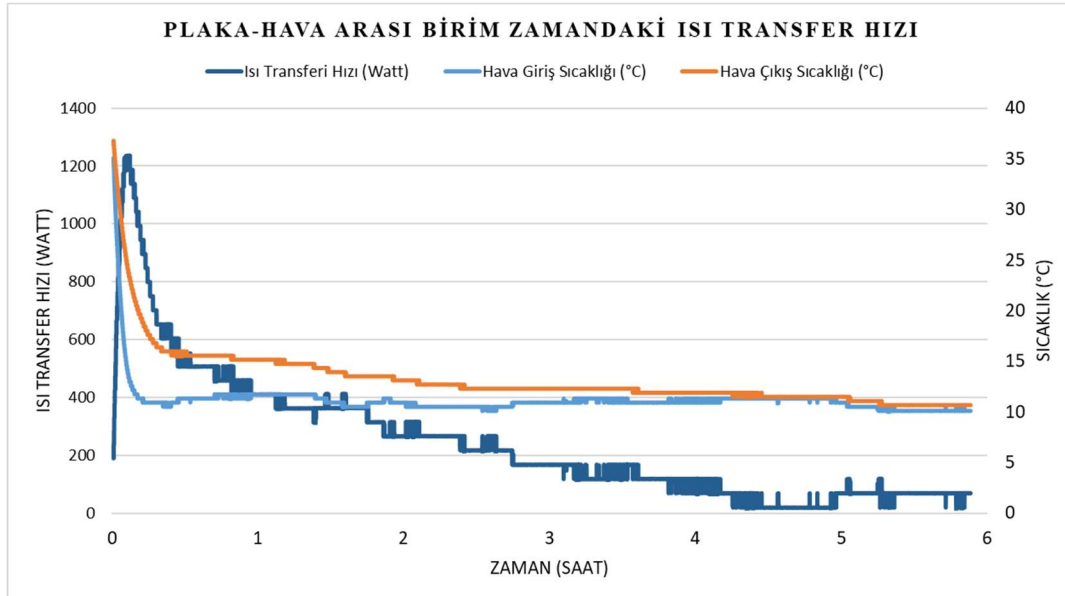


Şekil 6.15. Deney – 3 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.16. Deney – 3 için plaka sıcaklıkları

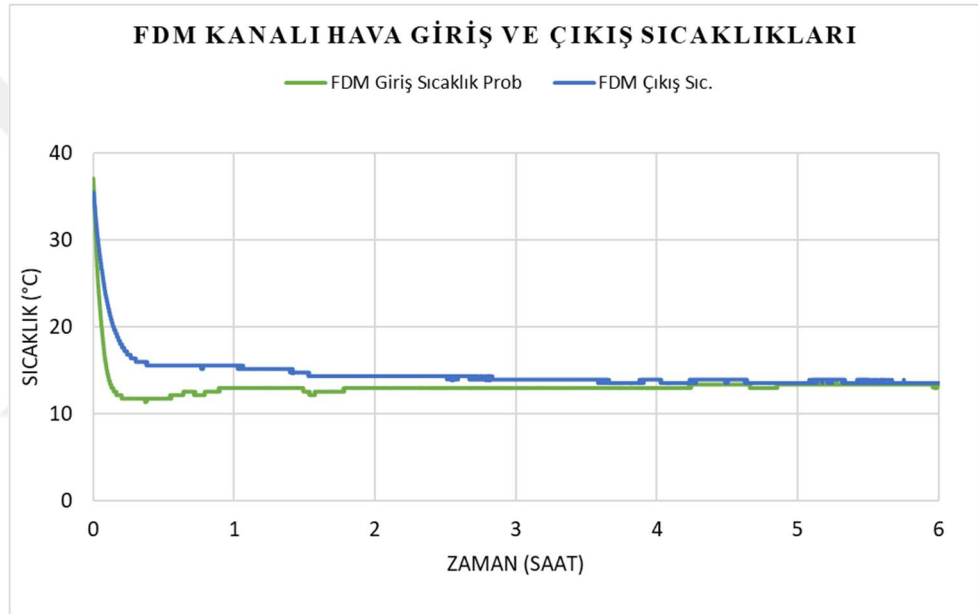
Şekil 6.16’da görüldüğü üzere A kodlu plakalar arasında katılaşmasını en hızlı tamamlayan plaka A-4 kodlu plaka iken, B kodlu plakalarda B-4 kodlu plaka olmuştur. Çünkü her iki plakada akışla temasın etkili olduğu bölgede yani orta konumdadır. Havanın plakadan zamana bağlı absorbe ettiği ısı enerjisi miktarı Şekil 6.17’de verilmiştir.



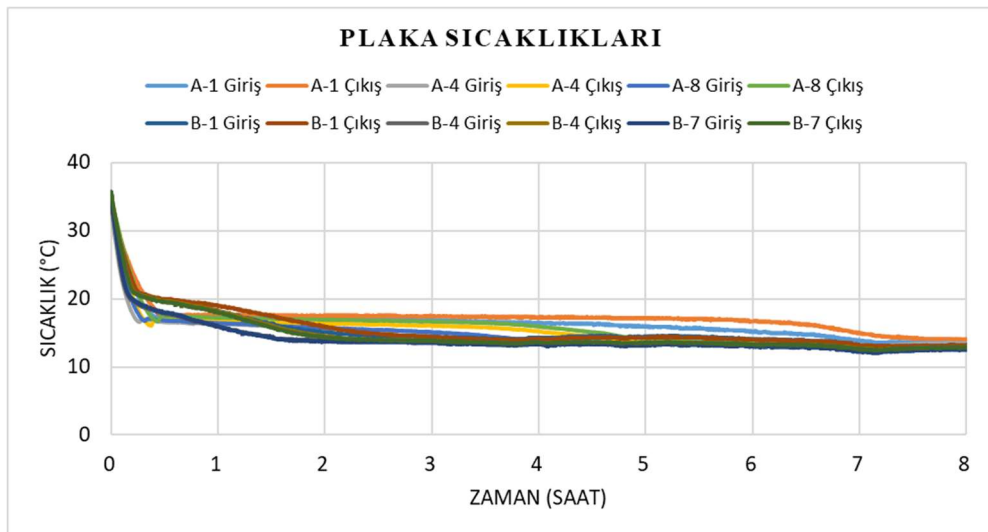
Şekil 6.17. Deney – 3 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

• Deney – 5

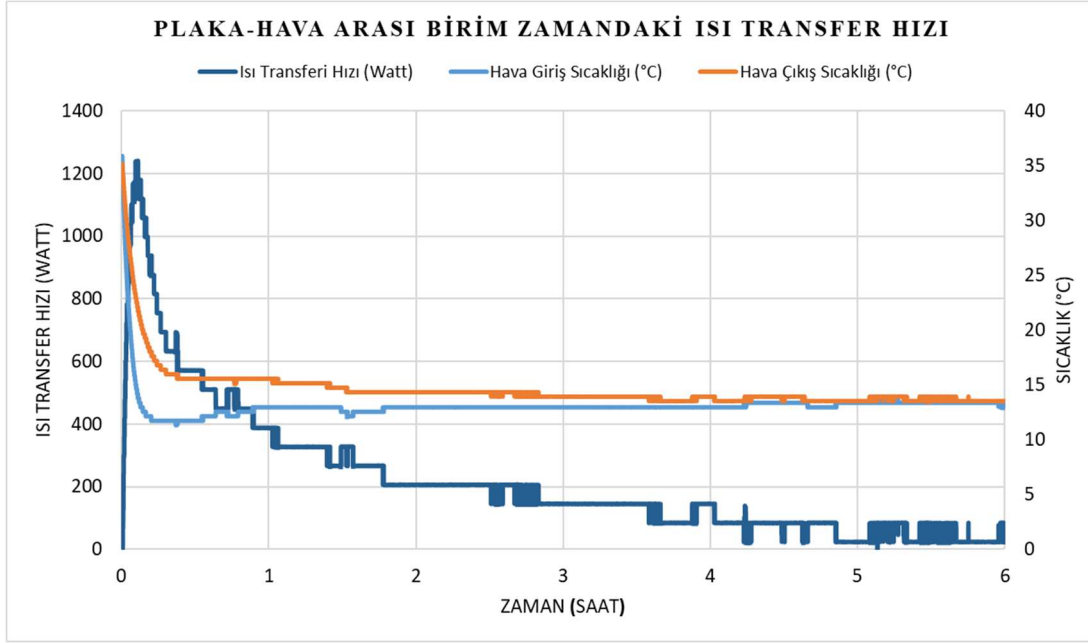
Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 2,5 m/s hız, 13 °C sıcaklık ve % 55 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.18’de görüldüğü gibi sistem ısıl dengeye 4,03 saatte (241 dakika) ulaşmıştır. Şekil 6.19’da Deney – 5 durumuna ait plaka sıcaklıkları verilmiştir. Katılaştırma en son tamamlayan plaka yine A-1 kodlu plaka olurken, en hızlı tamamlayan plaka B-4 kodlu plaka olmuştur. FDM’i katılaştırmak için havanın zamana bağlı olarak FDM’den absorbe ettiği ısı enerjisi miktarı Şekil 6.20’de verilmiştir. Sistemin ısı dengeye ulaştığı sürede ısı transferi sıfıra yaklaşmıştır.



Şekil 6.18. Deney – 5 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.19. Deney – 5 için plaka sıcaklıkları



Şekil 6.20. Deney – 5 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

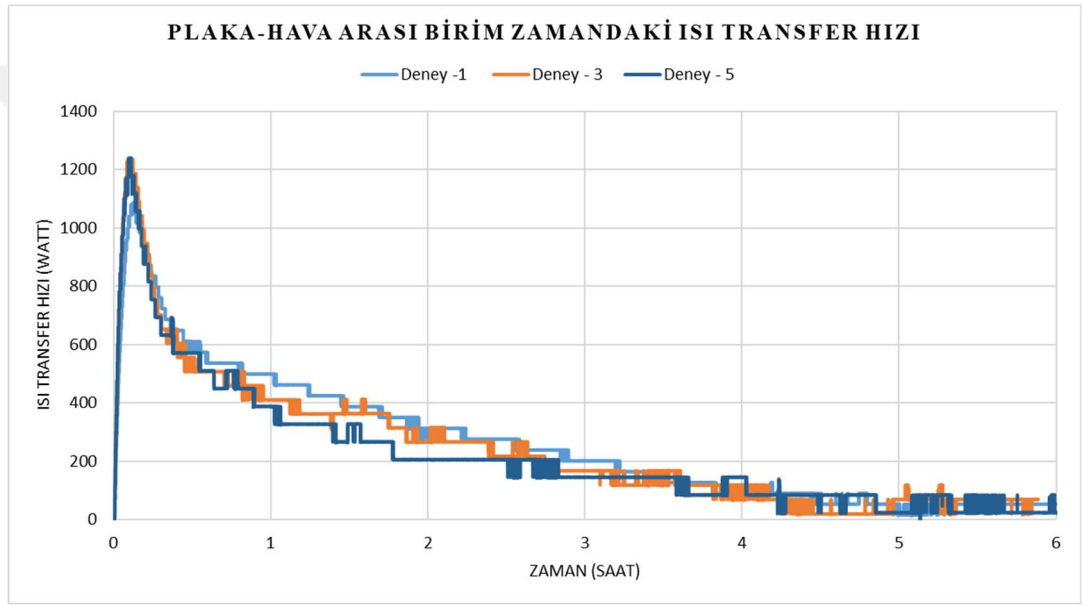
Tablo 6.1’de görüldüğü üzere ısı dengeye en hızlı Deney – 5 koşullarında, en yavaş ise Deney – 1 koşullarında ulaşılmıştır. Akış, ölçülen hava hızları doğrultusunda kanal ortasında daha gelişmiş iken kanal orta konumunda bulunan A-4 ve B-4 plakaları en hızlı tamamlayan fakat en altta kalan ve 950 gram RT – 18 HC içeren A-1 plakası katılaşmasını bütün deney senaryolarında en yavaş tamamlayan plaka olmuştur. Hava ile A-1 plakası arasında etkili bir ısı transferi gerçekleşmemiştir.

Tablo 6.1. 20 mm plaka mesafesinde şarj deneylerinin karşılaştırılması

Koşul	Isıl Dengeye Ulaşma Süresi	Absorbe edilen ısı enerjisi miktarı (kJ, duyulur + gizli)	Ortalama ısı transfer hızı (W)
Deney – 1 (1,5 m/s, 9°C)	4,89 saat (293 dk)	5478,6	331,2
Deney – 3 (2 m/s, 11°C)	4,17 (250 dk)	4919,9	327,7
Deney – 5 (2,5 m/s, 13°C)	4,03 (241 dk)	4391,2	302,6

20 mm plaka mesafesindeki şarj deneyi senaryolarında hava tarafından plakalardan zamana bağlı çekilen ısı enerjisi miktarı Şekil 6.21’de verilmiştir. Sıcaklık ve hız

değeri arttıkça ısıl dengeye ulaşma süresi kısalmıştır. Ancak, sıcaklık yükselişinden dolayı absorbe edilebilen ısı enerjisi miktarı da azalmıştır. Isıl denge gelme süreleri içerisinde farklı deney senaryolarının tüm sistemden (plaka + taşıyıcı + kanal) absorbe edilen ısı enerjisi miktarı Deney – 1 koşullarında 5478,65 kJ iken, Deney – 3 koşulunda 4919,89 kJ ve Deney – 5 koşulunda ise 4391,2 kJ olmuştur. Düşük hava giriş sıcaklığı değerlerinde sürecin daha uzun sürmesi sebebiyle daha fazla ısı enerjisi absorbe edilmiştir. Isı transfer hızlarında yaklaşık olarak % 5’lik bir farklılık vardır. Bu farklılık; ortam sıcaklığı, sensör hassasiyeti, ortam nemi vb. çevre koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

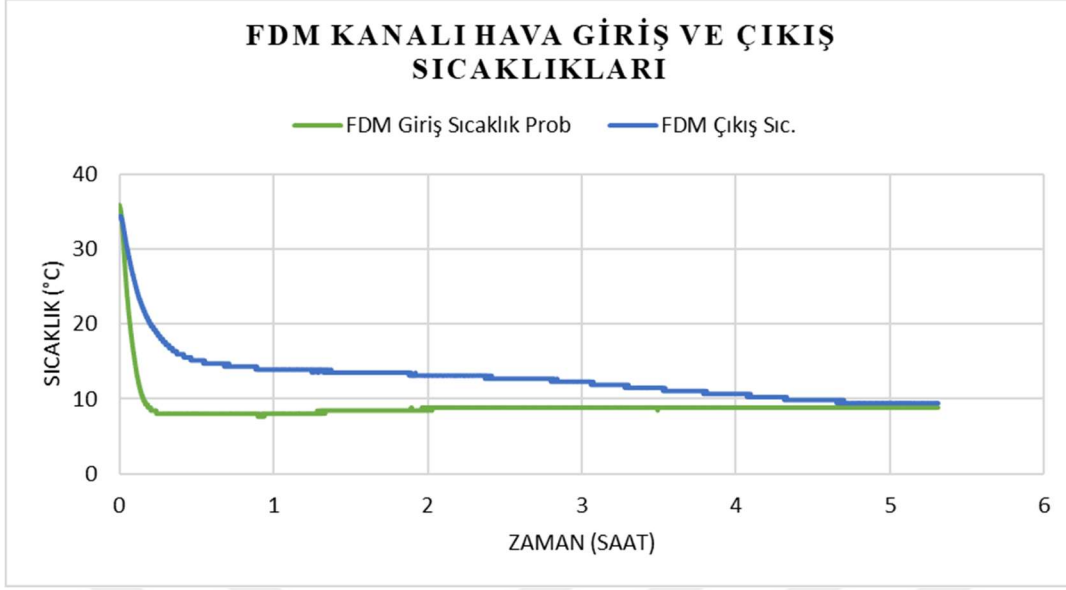


Şekil 6.21. 20 mm plaka mesafesinde şarj deney senaryoları için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

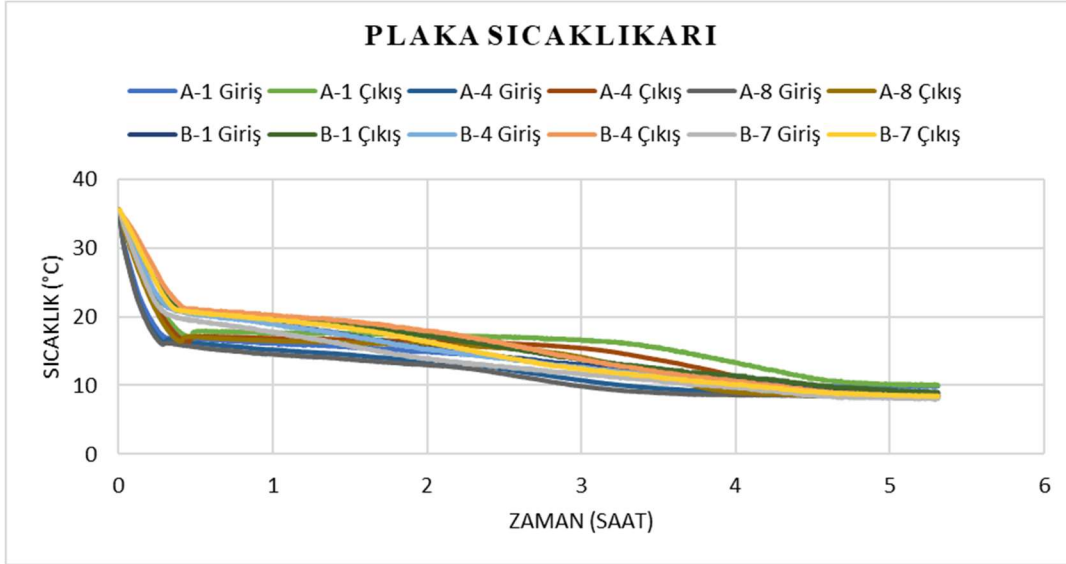
Bu kısımdan sonra, aynı hava giriş koşullarında plakalar arası mesafe 20 mm’den 10 mm’ye çekilmiş ve ısıl davranışlar incelenmiştir.

- **Deney – 7**

Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 1,5 m/s hız, 9 °C sıcaklık ve % 70 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Sistemin ısıl dengeye gelmesi Şekil 6.22’de görüldüğü gibi 4,72 saat (283 dakika) içerisinde gerçekleşmiştir. Plakaların bu giriş hava koşullarındaki ısıl davranışları Şekil 6.23’te verilmiştir. A kodlu plakalar arasında katılaşmasını ilk tamamlayan plaka A-4 iken, B kodlu plakalarda B-7 olmuştur.

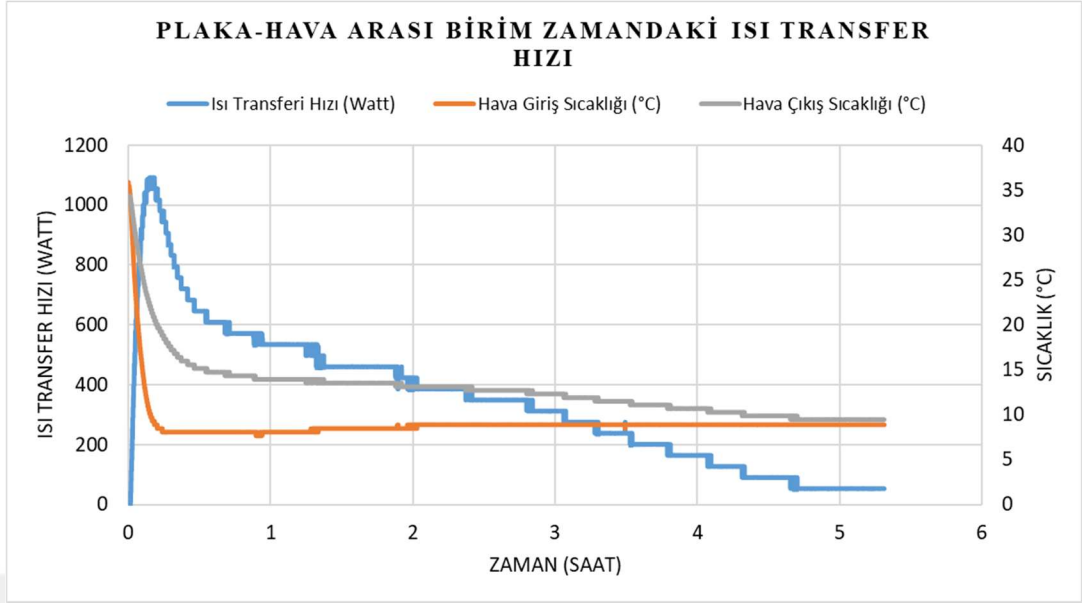


Şekil 6.22. Deney – 7 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.23. Deney – 7 için plakaların ısı davranışları

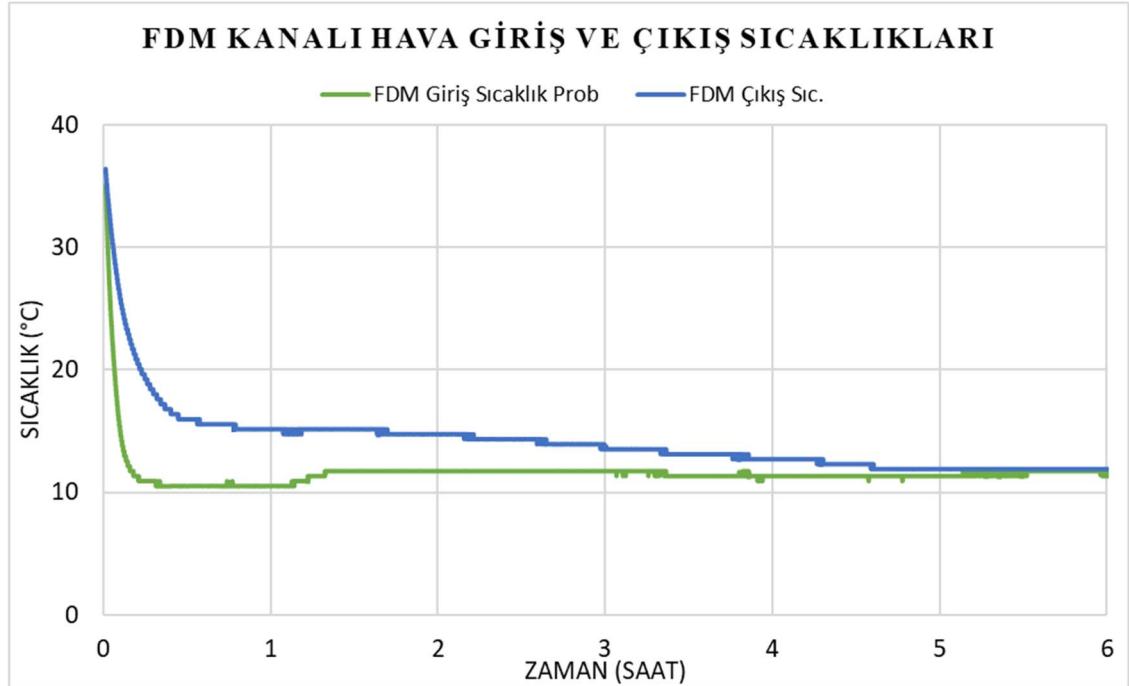
Şekil 6.24'te Deney – 7 koşullarında şartlandırılan havanın plakalardan birim zamanda absorbe ettiği ısı enerjisi miktarı ve kanaldaki hava giriş-çıkış sıcaklıklarını gösteren grafik verilmiştir. İlk 0,2 saat içinde, sistem rejime girdiği anda, sıcaklık farkının büyük olmasından kaynaklı ısı transferi miktarı tepe değerini almıştır. FDM belirli sabit sıcaklıklarda faz değişimi gösterirken ısı transferi miktarı o sıcaklık değer aralığında bir süre sabit kalmıştır. Bu faz değişimi sırasında grafikte bir basamak görüntüsü oluşmuştur. Kanal giriş çıkış sıcaklık farkı neredeyse sıfıra yaklaşıncaya ısı transfer miktarı da sıfıra yaklaşmıştır.



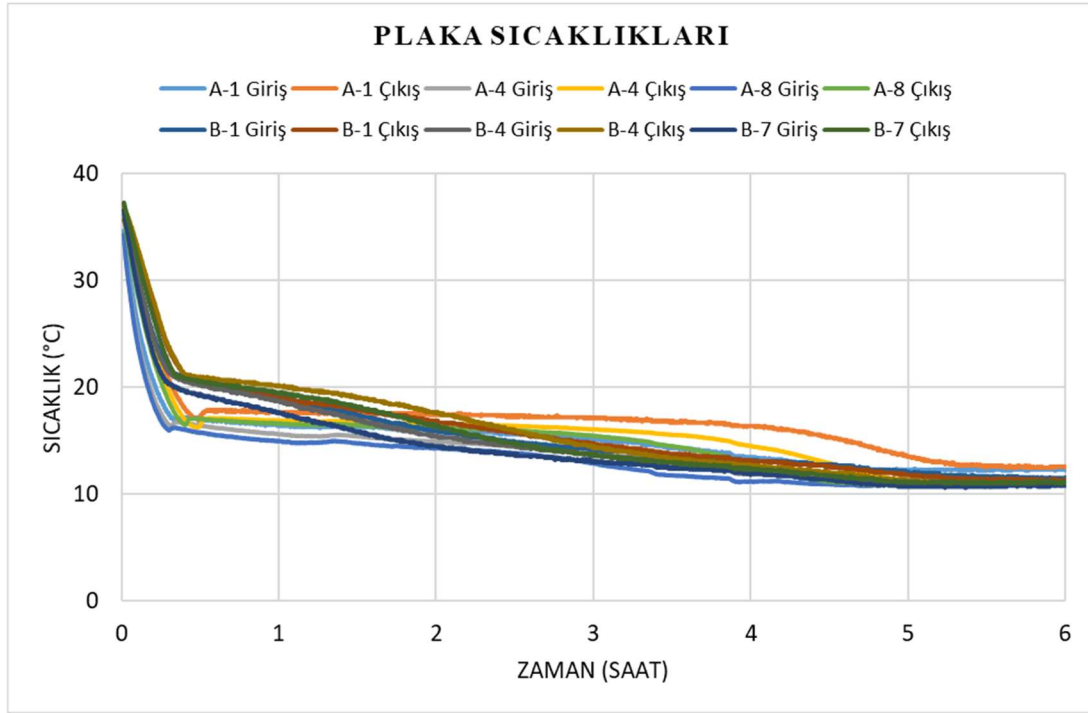
Şekil 6.24. Deney – 7 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

- **Deney – 9**

Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 2 m/s hava hızında 11 °C sıcaklık ve % 68 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Sistem, Şekil 6.25'te görüldüğü 4,62 saatte (277 dakika) ısı dengeye gelmiştir. Plakaların sıcaklık ölçümleri Şekil 6.26'da verilmiştir.

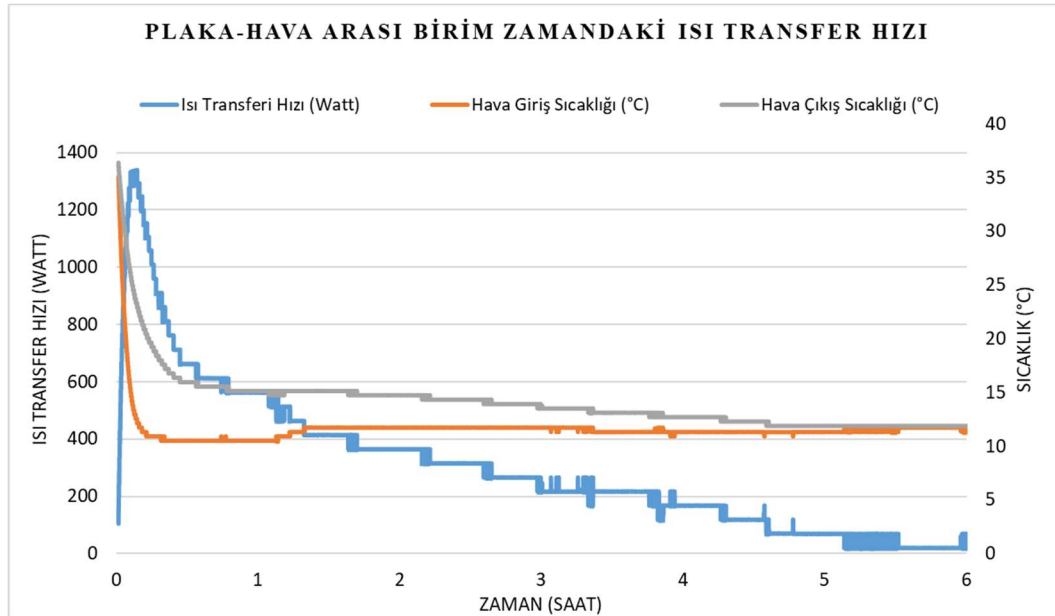


Şekil 6.25. Deney – 9 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.26. Deney – 9 için plakaların ısı davranışları

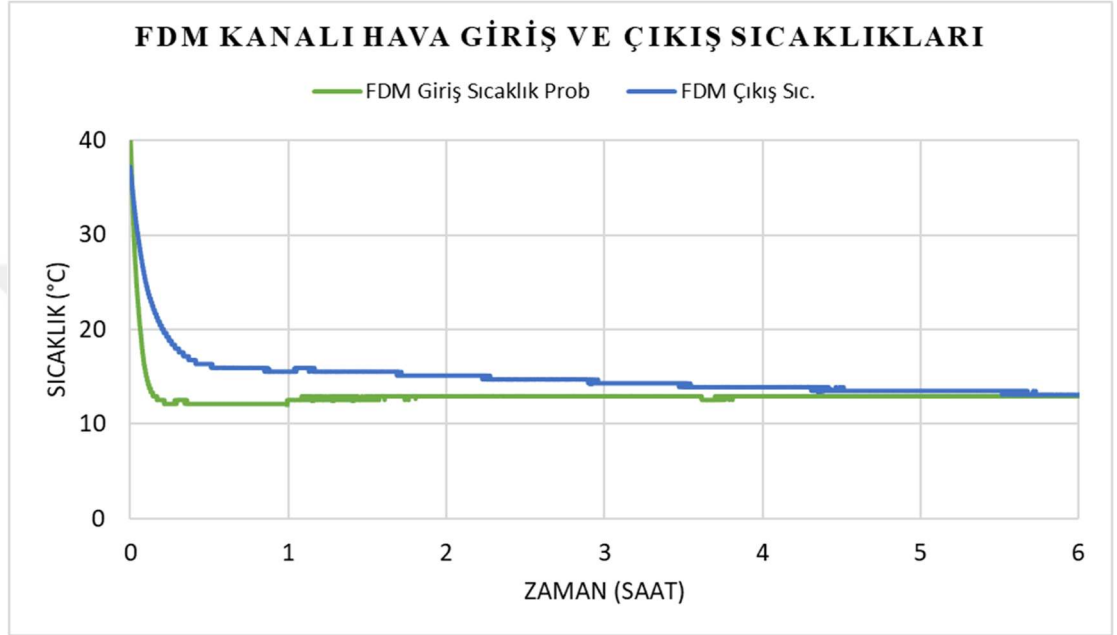
Şekil 6.27’de plakalardan birim zamanda soğurulan ısı enerjisi miktarı zamana bağlı olarak verilmiştir. Sistem ısıl dengeye ulaştığında, ısı transferi miktarı durma noktasına yaklaşmıştır.



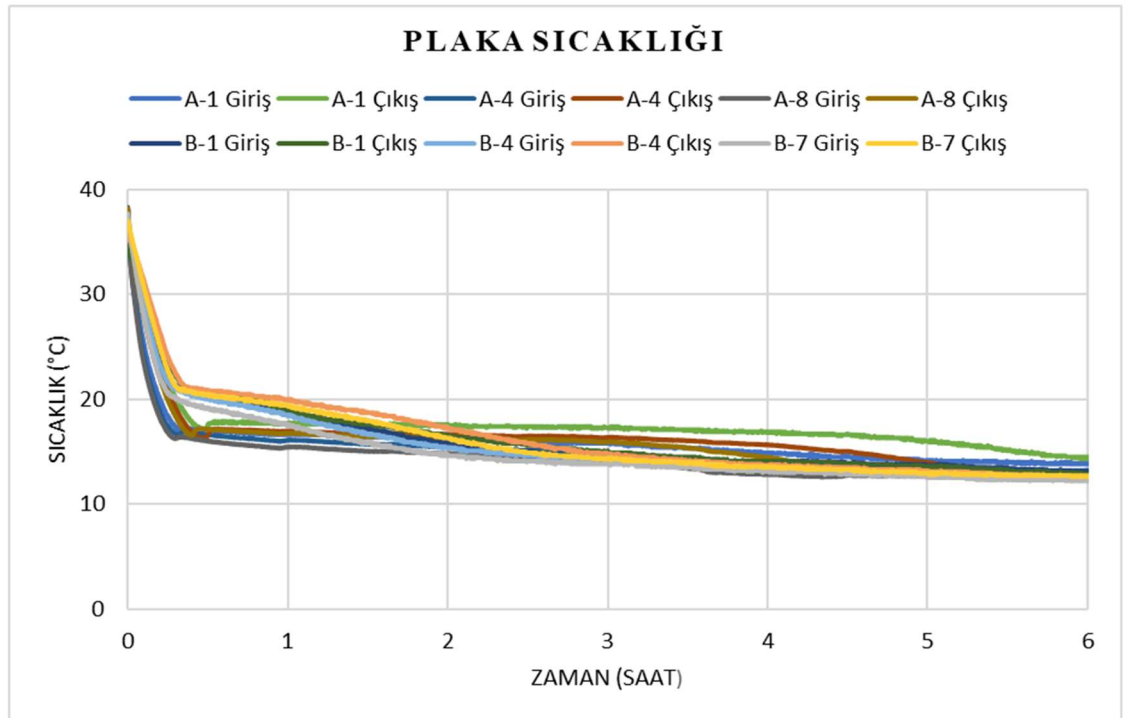
Şekil 6.27. Deney – 9 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

- **Deney – 11**

Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine deney sisteminde 2,5 m/s hız, 13 °C sıcaklık ve % 60 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Sistem, Şekil 6.28’de görüldüğü 4,34 saatte (260 dakika) ısı dengeye gelmiştir. Şekil 6.29’da Deney – 11 koşulları için plakaların ısı davranışları verilmiştir.

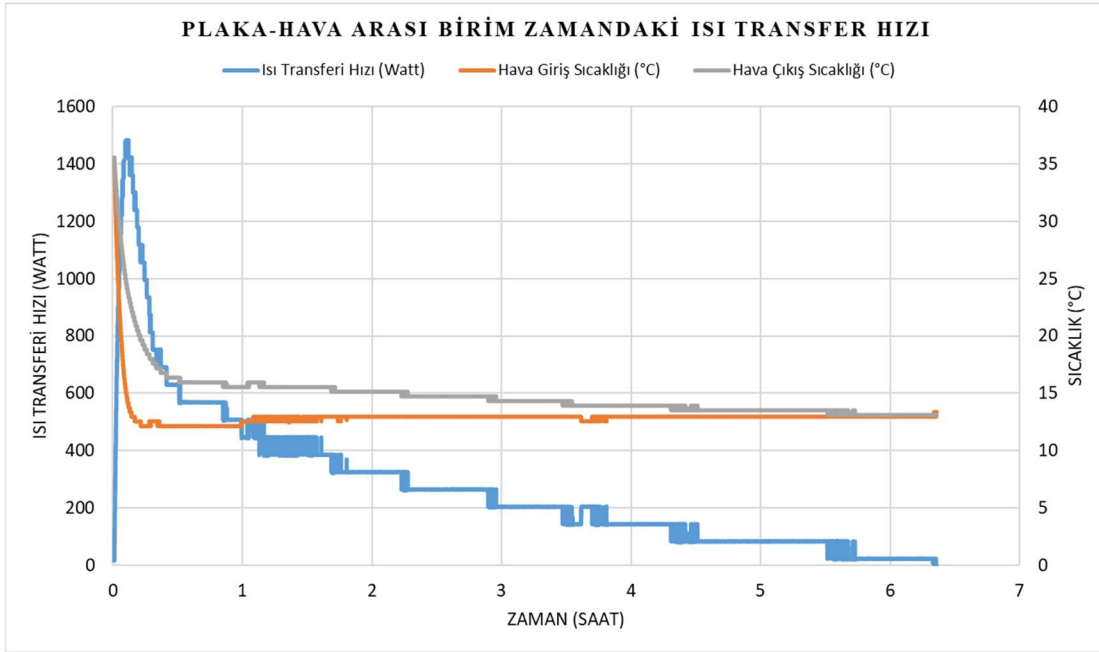


Şekil 6.28. Deney – 11 için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.29. Deney – 11 için plakaların ısı davranışları

Şekil 6.29’da görüldüğü gibi katılaşmasını en son tamamlayan plaka bütün şarj deney senaryolarında olduğu gibi A-1 kodlu plaka olmuştur. Kanalin orta kısmında, alt ve üst kısımlara göre hava hızının yüksek olması sebebiyle orta kısımdaki ısı transfer hızı artmıştır. Şekil 6.30’da ise plakalardan soğurulan ısı enerjisi miktarının zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 6.30. Deney – 11 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

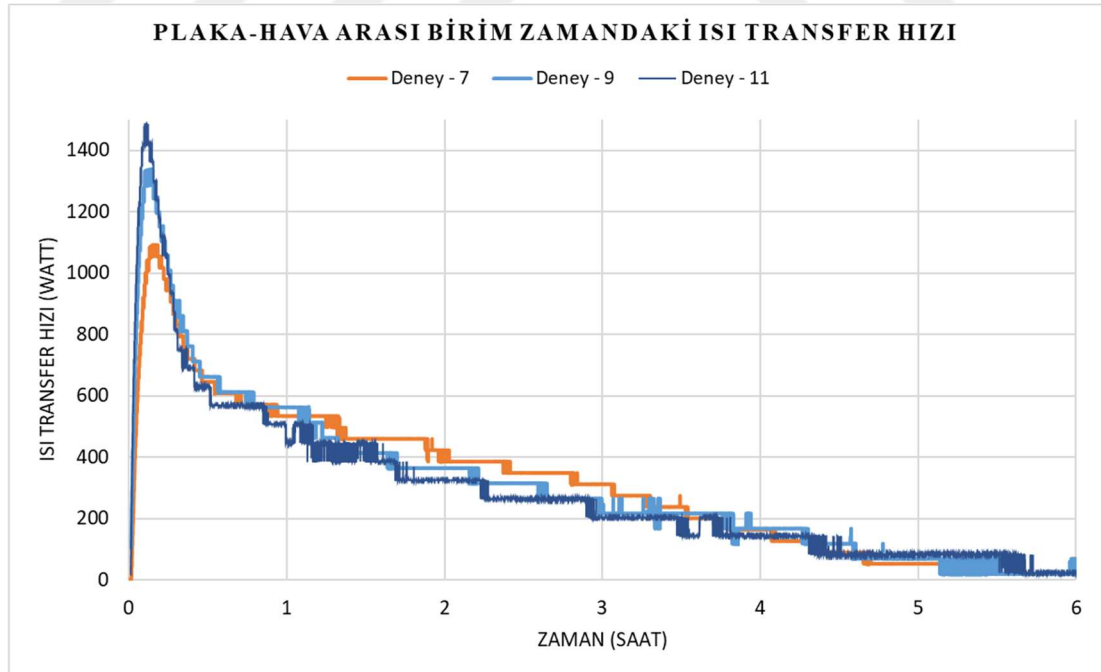
Tablo 6.2’de görüldüğü üzere plakalar arasında 10 mm mesafe var iken farklı hava hızı ve sıcaklık değerlerinde sistemin ısıl dengeye gelme süreleri kıyaslanmıştır. Kanal giriş-çıkış konumlarındaki sıcaklık farkı azalıp hava hızı arttıkça ısıl dengeye gelme süresi kısalmıştır. Sıcaklık farkının azalması ile birlikte sistemden absorbe edilen ısı enerjisi miktarı azalmıştır. Ortalama ısı transfer hızlarında ise ortalama % 2’lik bir değişim söz konusu olmuştur. Bu değişimin ortam sıcaklığı, nemi, sensörlerin ölçüm hassasiyeti sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

Bütün şarj deney senaryolarında kanal ortasında bulunan A-4 ve B-4 kodlu plakalar katılaşmalarını en hızlı tamamlayan plakalar olmuşlardır. Isı transferinin etkili olmadığı kanal alt bölgesinde bulunan A-1 kodlu plaka bütün deney senaryolarında katılaşmasını en geç tamamlayan plaka olmuştur. Kanalin orta kısmında kenar kısımlara göre daha yüksek hava hızları olmasından dolayı kanal ortasındaki ısı transfer hızı daha yüksektir.

Tablo 6.2. 10 mm plaka arası mesafede şarj deneylerinin karşılaştırılması

Koşul	Isıl Dengeye Ulaşma Süresi (saat)	Absorbe Edilen Isı Enerjisi Miktarı (kJ, duyulur + gizli)	Ortalama Isı Transfer Hızı (W)
Deney – 7 (1,5 m/s, 9 °C)	4,72 (283 dk)	6570,5	386,68
Deney – 9 (2 m/s, 11 °C)	4,62 (277 dk)	6413,5	385,61
Deney – 11 (2,5 m/s, 13 °C)	4,34 (260 dk)	5890,2	377

Bu sebepten dolayı kanal ortasındaki plakalar daha hızlı katılaşma süreci izlerken, kanalın alt ve üst kısmında bulunan plakalar daha yavaş bir katılaşma süreci izlemiştir. Bu durum kanalın geometrik şekil tasarımının ne kadar önem arz ettiğini vurgulamaktadır. Yapılan tüm şarj deneylerinde havayla ilk temas eden plaka giriş bölgeleri sıcaklığa daha hızlı tepki verirken çıkış bölgeleri çok daha geç tepki vermiştir. Yani plaka girişleri çok daha hızlı ısınıp soğuma gösterirken, plaka çıkışları çok daha geç tepki göstermiştir. Şekil 6.31’de görüldüğü gibi tüm sistemden (plaka + kanal + FDM) absorbe edilen ısı enerjisi miktarı Deney – 7 senaryosunda en fazla iken Deney – 11 senaryosunda en azdır.



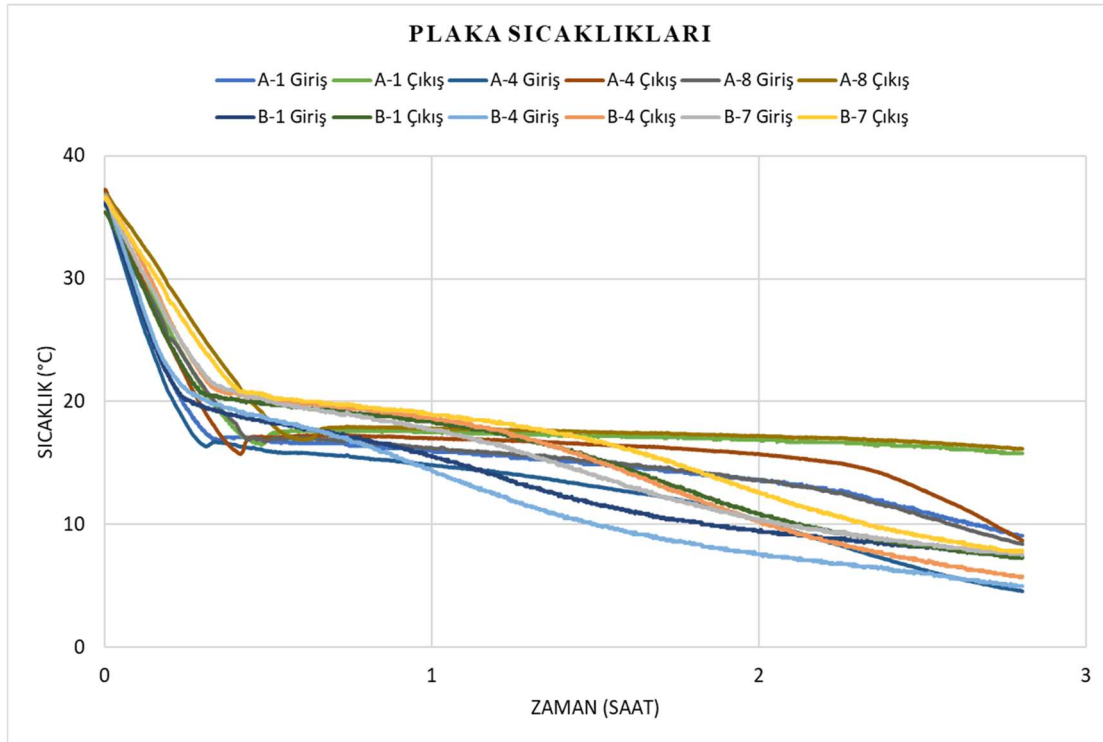
Şekil 6.31. 10 mm plaka mesafesinde şarj deney senaryoları için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

Hava hızının yüksek olması sebebiyle ilk 0,5 saat içerisinde Deney – 11 senaryosunda 1450 Watt ısı transferi meydana gelirken, Deney – 7 senaryosunda aynı koşullar altında 1070 Watt mertebesindedir. Yüksek hava hızı taşınım ısı transfer katsayısını artırdığından dolayı ısı transfer miktarı başlangıç koşullarında Deney – 11 senaryosunda en yüksek çıkmıştır. Fakat sonrasında azalan sıcaklık farkı nedeniyle ısı transfer miktarı giderek azalmıştır.

Bu bölümde ise geri dönüş havası kullanılmasının şarj sürecine etkisi incelenmiştir. Yine aynı hava hızları sağlanarak farklı plaka mesafelerinde şarj süreci gözlenmiştir. Eş zamanlı soğutma sistemiyle kıyaslama yapılabilmesi için; akışın gelişmiş olduğu bölgede (kanal ortasında) bulunan plakalar referans olarak alınmıştır. Eş zamanlı soğutma sırasında ısı dengeye ulaşıldığı sürede A-4 ve B-4 kodlu plakaların çıkış noktasındaki sıcaklık değerleri baz alınmış ve aynı sıcaklık değerlerinin geri dönüş havalı sistemde elde edildiği durumda şarjın sağlandığı kabul edilmiştir.

• Deney – 13

20 mm plakalar arası mesafede; 1,5 m/s hız ve 3 °C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Şekil 6.32’de plakaların ısı davranışları verilmiştir.

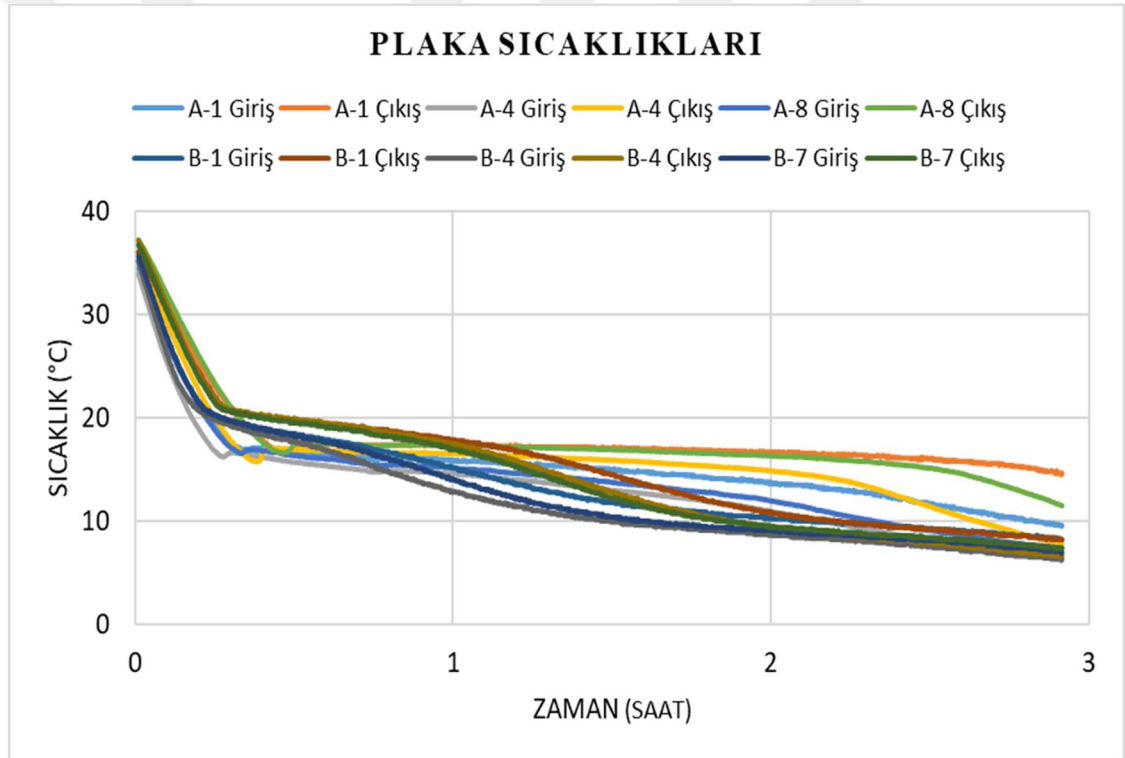


Şekil 6.32. Deney – 13 için plakaların ısı davranışları

Eş zamanlı soğutma esnasında A-4 ve B-4 plakalarının çıkışındaki sıcaklık değerleri, geri dönüş havalı sisteminde okunmuştur. Aynı sıcaklık değerlerine ($\pm 0,5$ °C) bu sistemde 2,42 saat içerişinde ulaşılmıştır. A-1 ve A-8 plakalarının çıkış noktası hava ile etkili temas sağlayamadığı için sıcaklık uzun bir süre değişim göstermemiştir.

- **Deney – 14**

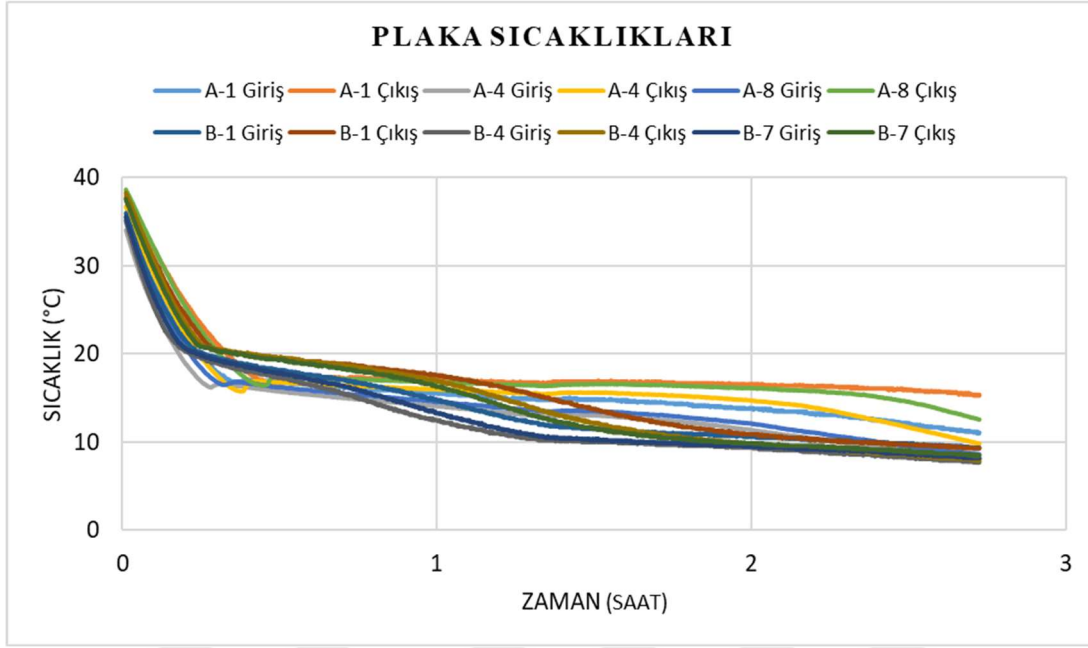
20 mm plakalar arası mesafede; 2 m/s hız ve 6°C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Şekil 6.33'te plakaların ısı davranışları gösterilmiştir. Aynı şekilde A-4 ve B-4 kodlu plakaların sıcaklık değerleri 2,34 saat içerisinde yakalanmıştır. A-1 ve A-8 kodlu plakalar şarj sürecini en geç tamamlayan plakalar olmuşlardır.



Şekil 6.33. Deney – 14 için plakaların ısı davranışları

- **Deney – 15**

20 mm plakalar arası mesafede; 2,5 m/s hız ve 8 °C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Eş zamanlı soğutmada yakalanan A-4 ve B-4 kodlu plakaların çıkış noktasındaki sıcaklık değerlerine bu koşullar altında 1,44 saat içerisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.34'te plakaların bu deney koşulu altında ısı davranışları gösterilmiştir. Bu durum altında da kanalın en alt ve en üst konumunda

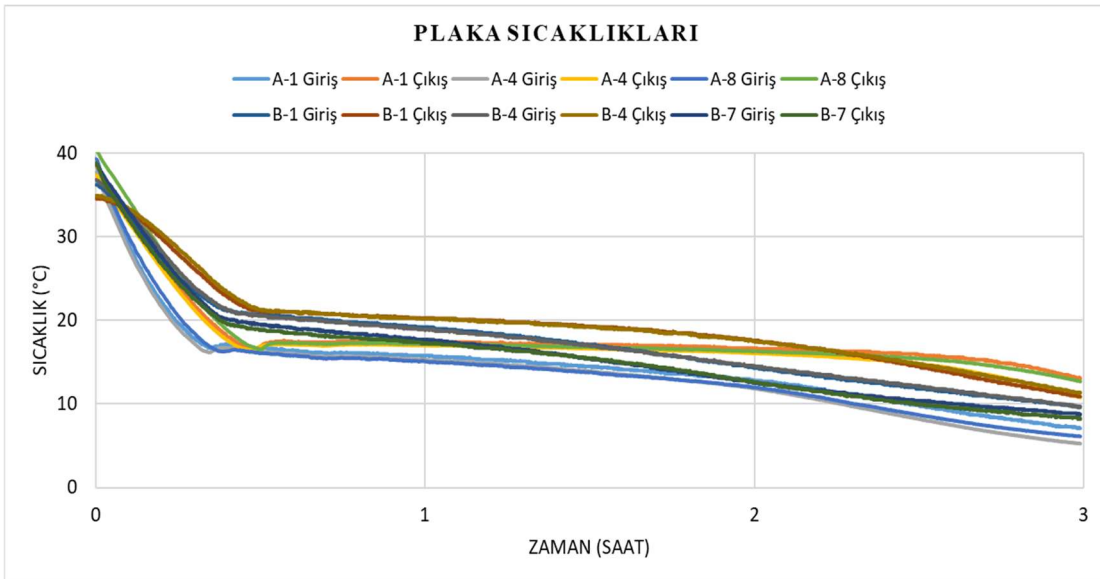


Şekil 6.34. Deney – 15 için plakaların ısı davranışları

bulunan A-1 ve A-8 kodlu plakaların hava ile arasında ısı transfer miktarının çok az olduğu ve bu sebepten dolayı plakaların sıcaklığının sabit kaldığı görülmektedir.

Deney – 16

10 mm plakalar arası mesafede; 1,5 m/s hız ve 3 °C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Eş zamanlı soğutmada yakalanan A-4 ve B-4 kodlu plakaların çıkış noktasındaki sıcaklık değerlerine, bu koşullar altında 2,98 saat içerisinde ulaşılmıştır.

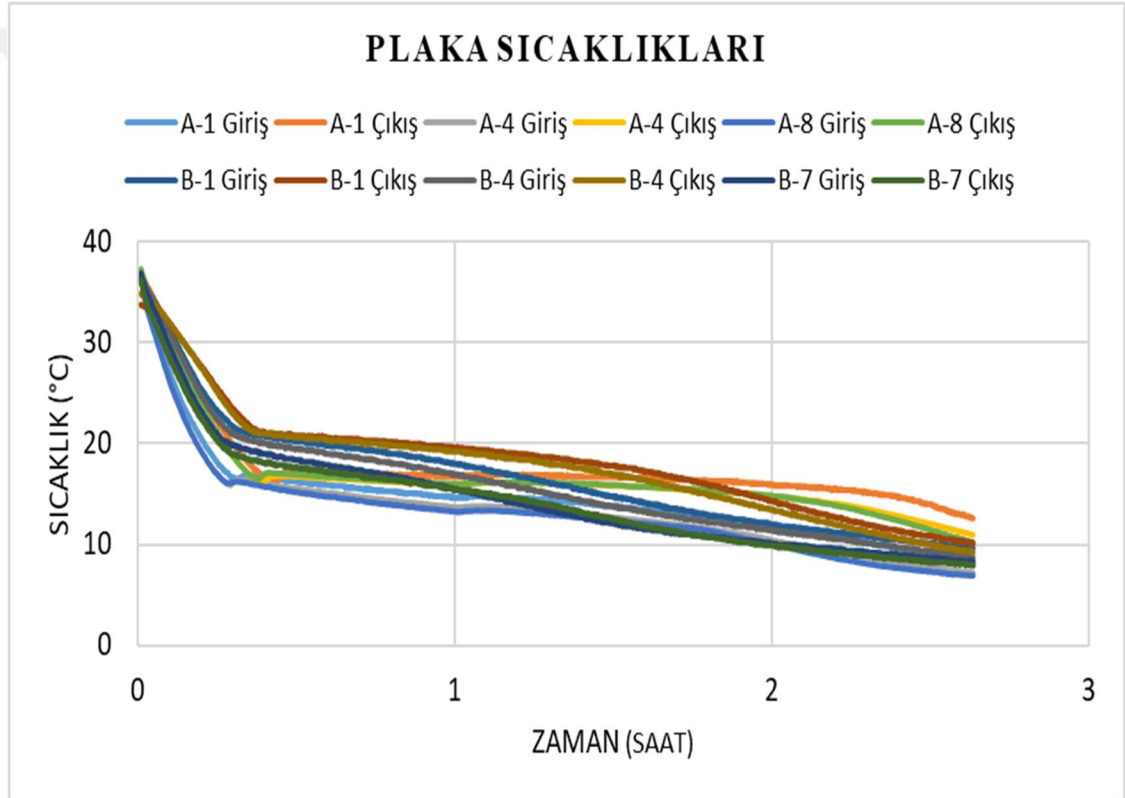


Şekil 6.35. Deney – 16 için plakaların ısı davranışları

Şekil 6.35’de plakaların bu deney koşulu altında ısıl davranışları gösterilmiştir. Sıcaklığa karşı A-1 ve A-8 plakalarının giriş noktaları çok hızlı tepki gösterirken, çıkış konumlarının geç tepki gösterdiği görülmektedir.

- **Deney – 17**

10 mm plakalar arası mesafede; 2 m/s hız ve 6 °C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Eş zamanlı soğutmada yakalanan A-4 ve B-4 kodlu plakaların çıkış noktasındaki sıcaklık değerlerine, bu koşullar altında 2,34 saat içerisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.36’da bu deney koşulları altında plakaların ısıl davranışları verilmiştir.

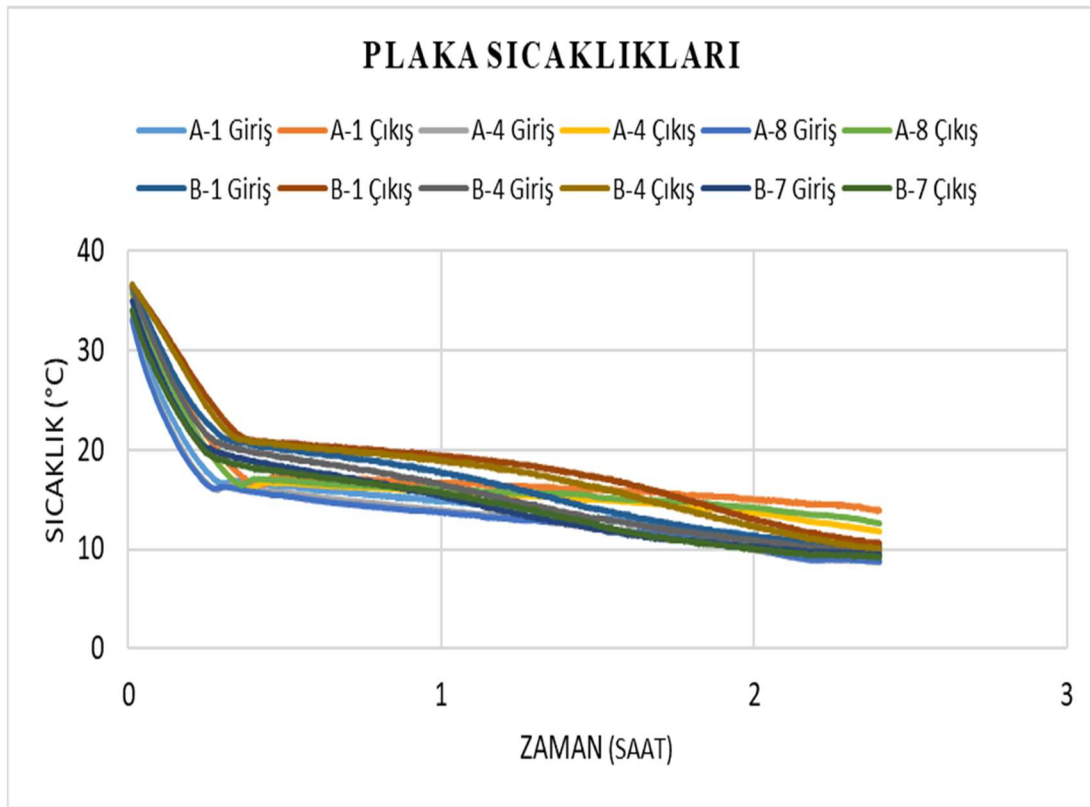


Şekil 6.36. Deney – 17 için plakaların ısıl davranışları

- **Deney – 18**

10 mm plakalar arası mesafede; 2,5 m/s hız ve 8 °C giriş sıcaklığına şartlandırılmış hava plakalar üzerinden geçirilmiştir. Eş zamanlı soğutmada yakalanan A-4 ve B-4 kodlu plakaların çıkış noktasındaki sıcaklık değerlerine, bu koşullar altında 1,82 saat içerisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.37’de bu deney koşullarında plakaların ısıl davranışları verilmiştir.

Geri dönüş havalı şarj sisteminde her iki plaka mesafesinde de şarj süreci eş zamanlı soğutma sisteminden daha hızlı gerçekleşmiştir. Bunun nedeni daha düşük sıcaklıklarda besleme havası kullanılmasından kaynaklanmıştır. Soğutma kapasitesi sabit olan evaporatöre eş zamanlı sistemdeki giriş hava sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda hava gönderildiğinden FDM girişindeki hava sıcaklığı azalmıştır. Daha düşük hava sıcaklığı yüksek sıcaklık farkı meydana getirmiş ve ısı transfer hızlarında artış meydana gelmiştir.



Şekil 6.37. Deney – 18 için plakaların ısı davranışları

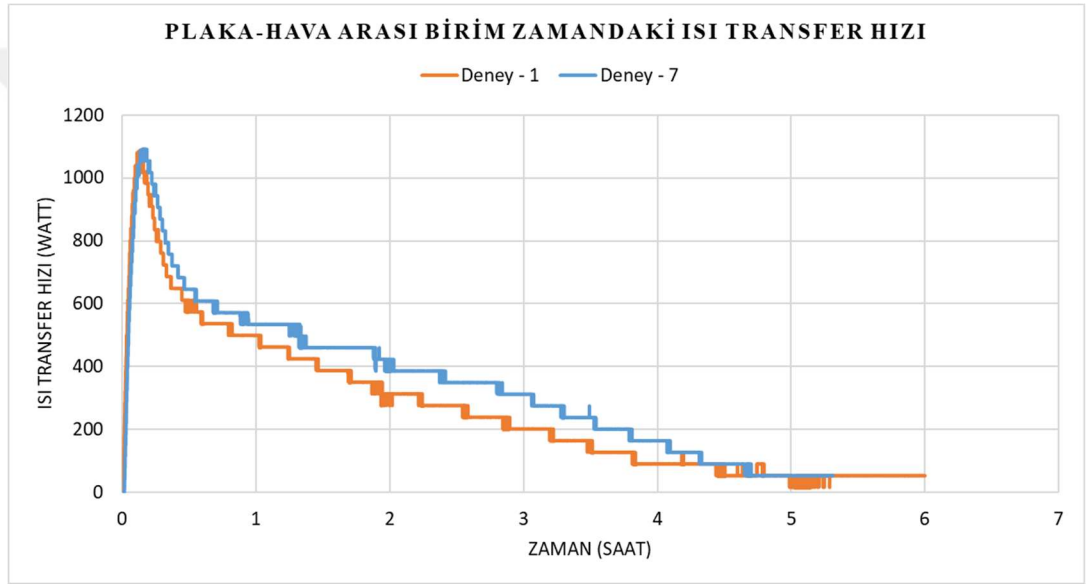
Isı transfer hızının artmasıyla birlikte plakalardan birim zaman içinde daha fazla ısı enerjisi absorbe edilmiş ve şarj süreci kısalmıştır. Eş zamanlı şarj sisteminde ısı dengeye gelme süresi boyunca plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi geri dönüş havalı sistemde daha kısa sürede absorbe edilmiştir.

6.2.2. Plakalar arası mesafenin şarj sürecine etkisi

Hava giriş koşulları sabit tutulup, plakalar arası mesafe 20 mm ve 10 mm olarak FDM şarj süreci incelenmiştir. Şekil 6.38’de, hava giriş koşulları 1,5 m/s hız ve 9 °C sıcaklık ve % 70 bağıl nem altında 20 mm ve 10 mm plaka mesafesinde sistemden

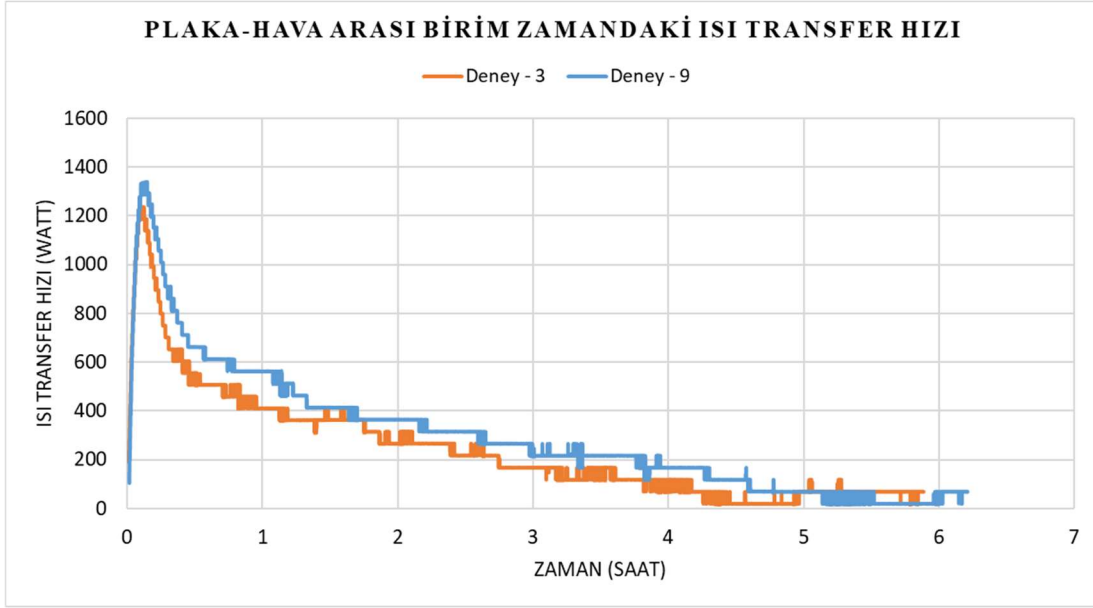
absorbe edilen ısı enerjisi miktarının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Deney – 1’de 20 mm plaka mesafesi, Deney – 7’de ise 10 mm plaka mesafesi test edilmiştir. Deney – 1’de ısı denge süresi 4,89 saat iken Deney – 7’de ısı denge süresi 4,72 saat olarak gözlemlenmiştir. Deney – 7 koşullarında sistem Deney – 1’e göre % 3 daha kısa sürede ısı dengeye ulaşmış ve de Deney – 1’den % 16 daha fazla ısı enerjisi absorbe edilmiştir.

Şekil 6.39’da hava giriş koşulları 2 m/s hız ve 11 °C sıcaklık ve % 65 bağıl nem altında 20 mm ve 10 mm plaka mesafesinde sistemden absorbe edilen ısı enerjisi miktarının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



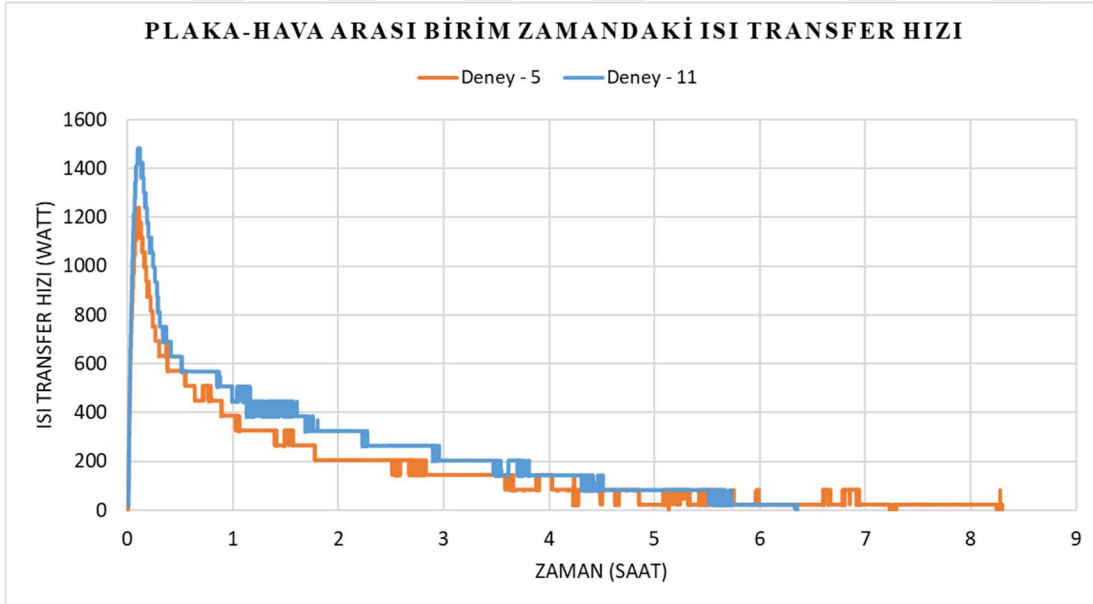
Şekil 6.38. Deney – 1 ve Deney – 7 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

Deney – 3’de 20 mm plaka mesafesi, Deney – 9’da ise 10 mm plaka mesafesi test edilmiştir. Yukarıdaki durumun aksine, plaka arası mesafe daraldığında katılma süresi % 10,8 uzamıştır. Fakat bununla birlikte Deney – 9 koşullarında, Deney – 3 koşullarına göre sistemden toplamda % 30,4 daha fazla ısı enerjisi absorbe edilmiştir.



Şekil 6.39. Deney – 3 ve Deney – 9 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

Şekil 6.40'da hava giriş koşulları 2,5 m/s hız ve 13 °C sıcaklık ve % 60 bağıl nem altında 20 mm ve 10 mm plaka mesafesinde sistemden absorbe edilen ısı enerjisi miktarının zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.40. Deney – 5 ve Deney – 11 sırasında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

Deney – 5'de 20 mm plaka mesafesi, Deney – 11'de ise 10 mm plaka mesafesi test edilmiştir. Plakalar arası mesafe azaldığında katılma süresi % 7 uzarken sistemden absorbe edilen toplam ısı enerjisi % 34,1 artış göstermiştir. Plakalar arası mesafenin

değişmesiyle ısı transfer hızı ve sistemden absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarı değişmiştir. Tablo 6.3'te plakalar arası mesafenin ısı transfer hızına, Tablo 6.4'te ise sistemden absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarına olan etkisi gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Plakalar arası mesafenin ortalama ısı transfer hızına etkisi

Koşul	20 mm Plakalar Arası Mesafede Ortalama Isı Transfer Hızı (W)	10 mm Plakalar Arası Mesafede Ortalama Isı Transfer Hızı (W)
1,5 m/s, 9 °C	311,2	386,7
2 m/s, 11 °C	327,8	385,6
2,5 m/s, 13 °C	302,7	377

Tablo 6.4. Plakalar arası mesafenin plakalardan absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarına etkisi

Koşul	20 mm Plakalar Arası Mesafede Absorbe Edilen Toplam Isı Enerjisi Miktarı (kJ)	10 mm Plakalar Arası Mesafede Absorbe Edilen Toplam Isı Enerjisi Miktarı (kJ)
1,5 m/s, 9 °C	5478,6	6570,5
2 m/s, 11 °C	4919,9	6413,5
2,5 m/s, 13 °C	4391	5890,2

Tablo 6.3'te görüldüğü gibi plakalar arası mesafe 10 mm olduğunda ısı transfer hızında ortalama 70 W'lık bir artış gözlenmiştir. Tablo 6.4'de ise sistemden absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarı plakalar arası mesafe 10 mm olduğunda artmıştır.

Çünkü plakalar kanal orta bölgesinde toplanarak hava ile etkili bir ısı transferi gerçekleştirmiştir. Bu bağlamda plakaların kanal orta bölgesinde yığılmasının sistemden absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarını ve ortalama ısı transfer hızını artırdığı saptanmıştır. Plakalar arası mesafe daraldığında ısı denge süresini kıyaslayabilmek için depolanan enerji miktarını aynı kabul edip ısı transfer hızları üzerinden ısı denge süresi hesaplanmıştır. Örneğin, 1,5 m/s, 9 °C hava giriş koşullarında 20 mm plaka mesafesinde 5478,6 kJ değerinde ısı enerjisi plakalardan soğurulmuştur. Soğurulan bu ısı enerjisi sabit kabul edilip 10 mm mesafedeki ortalama ısı transfer hızı değeri olan 386,7 W değerine bölünürse 3,93 saat içerisinde sistemin ısı dengeye geleceği hesap edilmiştir. Bu durum daha dar hava geçiş kanallarında yüksek ısı transfer hızlarına ulaşılması sebebiyle katılma süresini kısaltacağı anlamına gelmektedir.

6.3. FDM İçeren Plakalar ile Gerçekleştirilen Deşarj Deneyleri

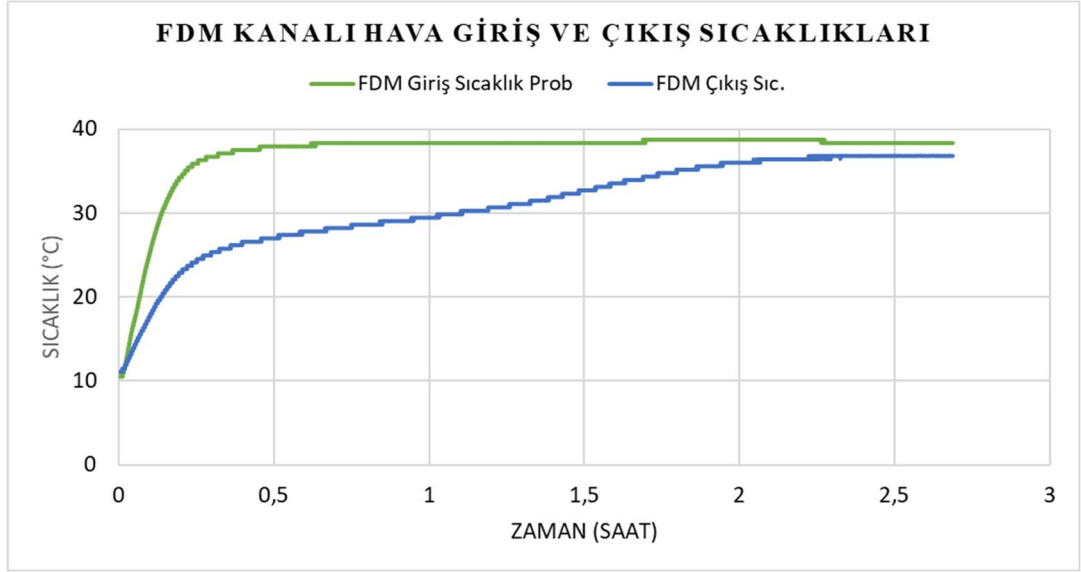
Deşarj deneyleri esnasında % 100 taze hava kullanılarak FDM'nin ısı davranışı gözlenmiştir. Bu deneyler sırasında plakalar arası mesafenin ve hava giriş koşullarının etkisi incelenmiş ve toplam iki farklı plaka mesafesinde üç farklı hava giriş koşulu altında deneyler yapılmıştır. 20 mm ve 10 mm plakalar arası mesafede; 1,5 m/s, 2 m/s ve 2,5 m/s hava hızlarında sırasıyla 38 °C, 34 °C ve 32 °C hava giriş sıcaklıkları altında deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kanal giriş-çıkış sıcaklıklarının değişim göstermediği aralıkta deşarj deneyleri sonlandırılmıştır.

6.3.1. Giriş koşullarının etkisi

FDM içeren plakaların erime süreci üç farklı hava hızı ve sıcaklık koşulları altında incelenmiştir. Sistemin ısı dengeye ulaştığı zaman deneyler sonlandırılmıştır.

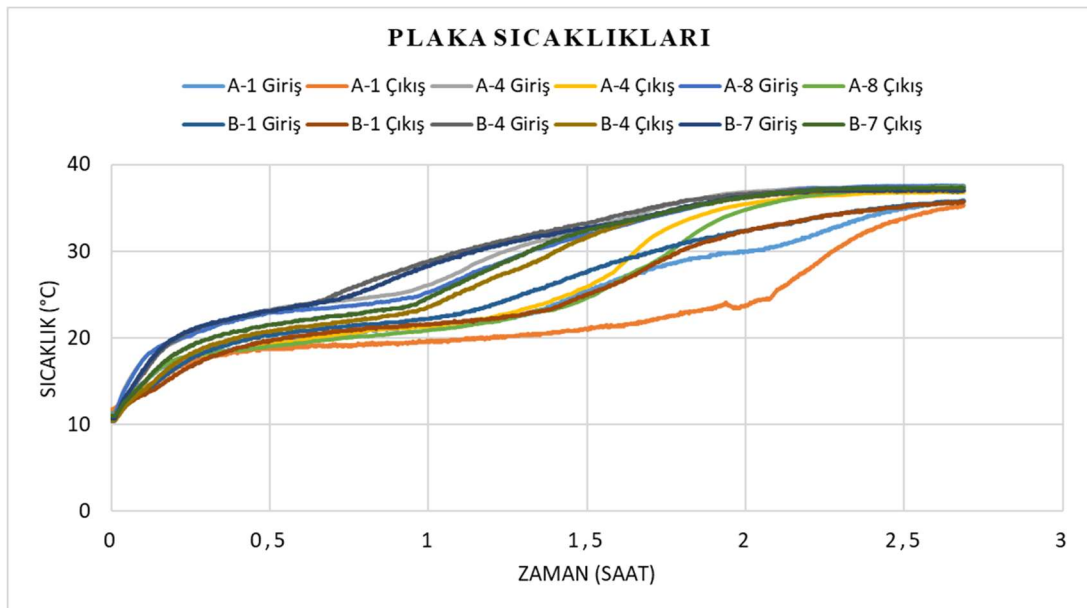
- **Deney – 2**

Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine 1,5 m/s hızda, 38 °C sıcaklıkta ve ortalama % 25 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.41'de kanal hava giriş – çıkış sıcaklığı verilmiştir. Sistem ısı dengeye 2,3 saat (138 dakika) içerisinde gelmiştir.

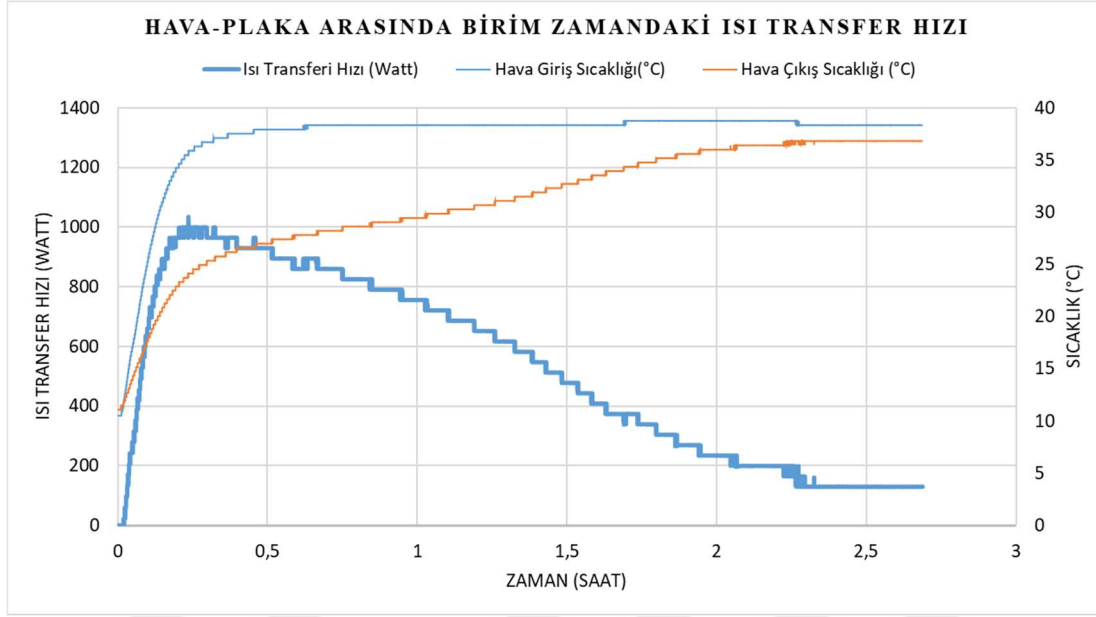


Şekil 6.41. Deney – 2 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 6.42’de plakaların ısı davranış grafiği verilmiştir. Şarj senaryolarında olduğu gibi, deşarj senaryolarında da erime işlemi en geç tamamlayan plaka A-1 kodlu plaka olurken en erken tamamlayan plaka B-4 kodlu plaka olmuştur. Şekil 6.43’de ise üzerinden sıcak hava geçirilen plakaların hava ile arasında gerçekleşen zamana göre birim zamandaki ısı transfer hızı verilmiştir. İlk 0,5 saat içerisinde yüksek sıcaklık farkının olmasından dolayı zamana göre ısı transfer miktarı da yüksek iken, sıcaklık farkının azalması ile birlikte ısı transfer miktarı da azalma göstererek 2,3 saat sonrasında ısı transfer hızı 100 W değerinin altına düşmüştür.



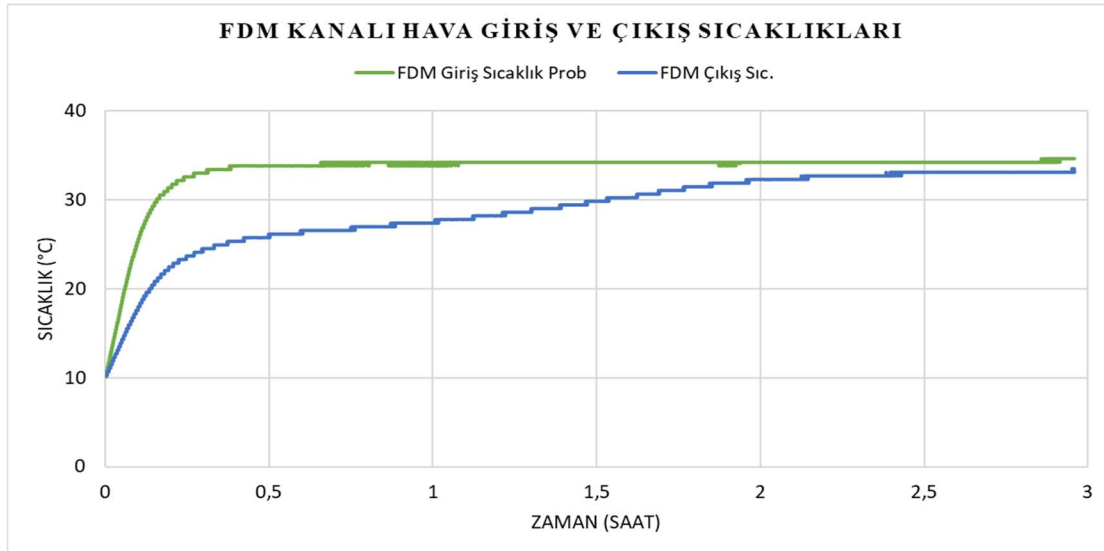
Şekil 6.42. Deney – 2 için plakaların ısı davranış



Şekil 6.43. Deney – 2 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

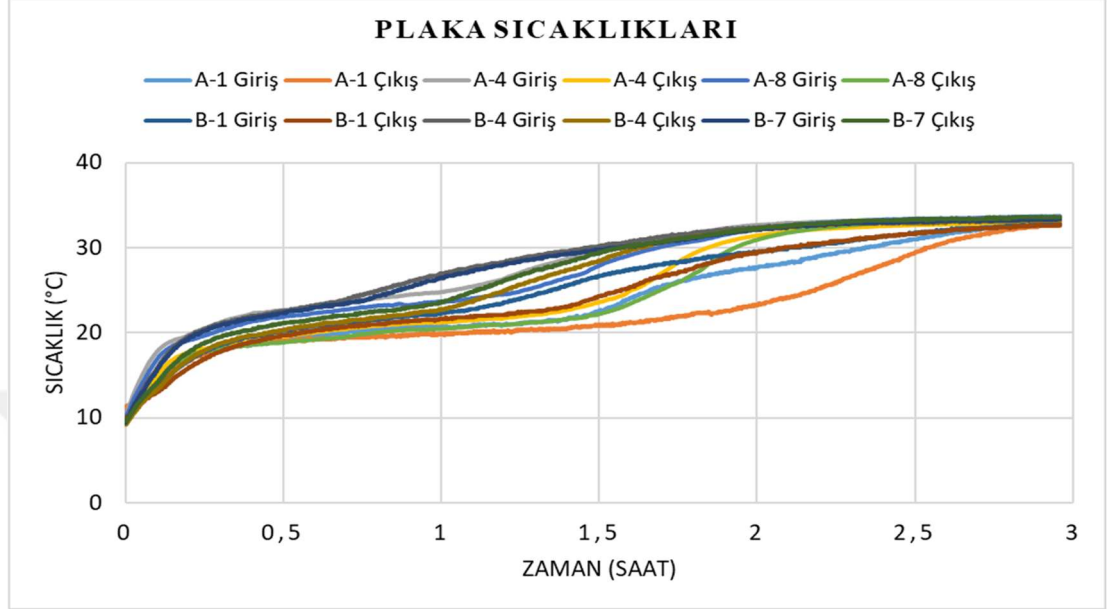
• Deney – 4

Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine 2 m/s hızda, 34 °C sıcaklıkta ve ortalama % 27 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.44'te kanaldaki hava giriş-çıkış sıcaklığı grafiği verilmiş olup sistem 2,44 saat (146 dakika) sonra ısı dengeye ulaşmıştır.



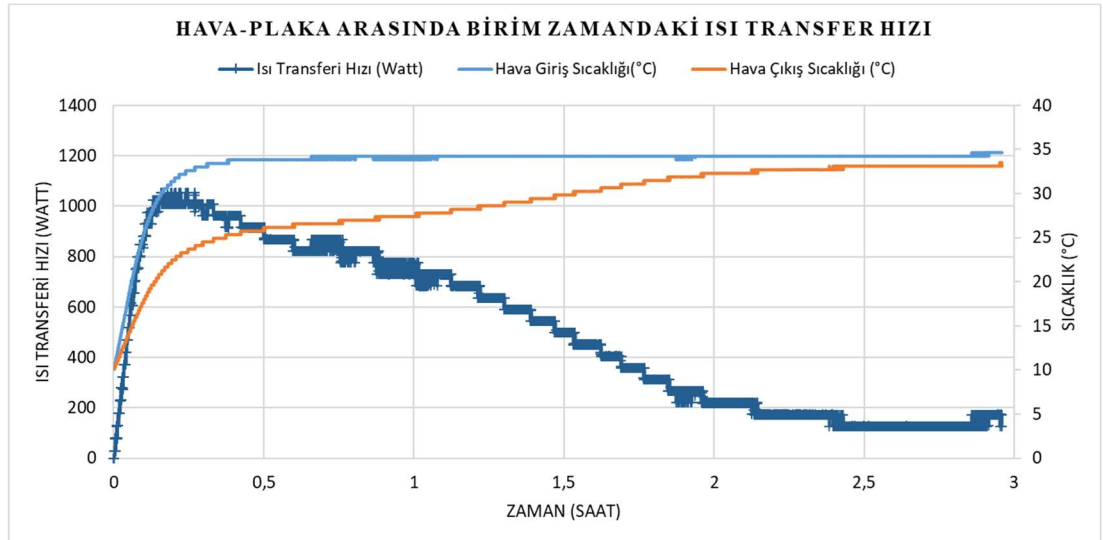
Şekil 6.44. Deney – 4 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 6.45’de bu deney koşulu altında plakaların ısı davranışı gösterilmiştir. Bütün B kodlu plakalar erime süreçlerini A kodlu plakalardan önce tamamlamıştır. Erime işlemini en geç tamamlayan plaka A-1 kodlu plaka olmuştur.



Şekil 6.45. Deney – 4 koşulları için plakaların ısı davranışı

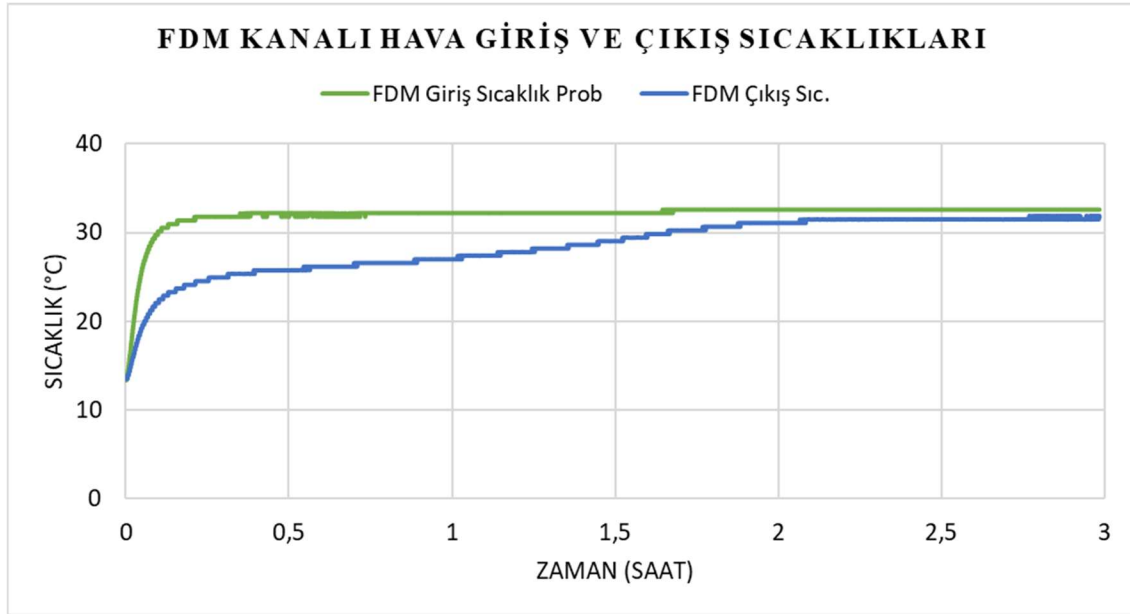
Şekil 6.46’da ise test koşullarında hava ve plaka arasındaki birim zamandaki ısı transfer hızı verilmiştir. Yine ilk 0,5 saat içinde yüksek sıcaklık farkından kaynaklı yüksek ısı transferi meydana gelirken sıcaklık farkının azalmasıyla birlikte ısı transfer miktarı da azalmıştır.



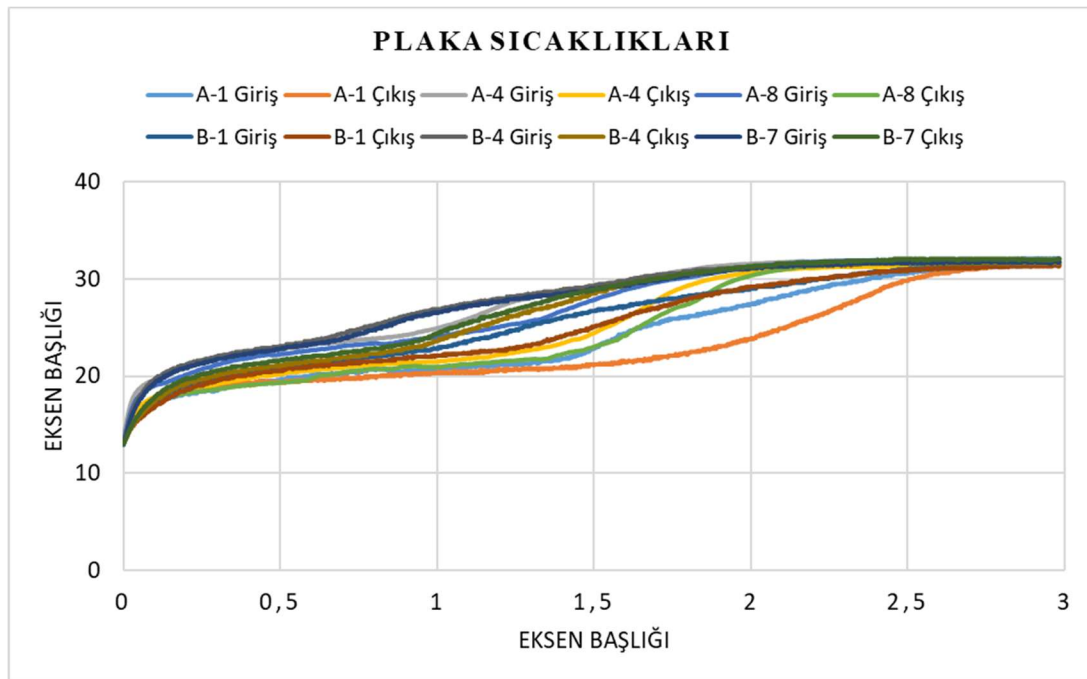
Şekil 6.46. Deney – 4 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

- **Deney – 6**

Plakalar arası mesafe 20 mm iken; plakaların üzerine 2,5 m/s hızda, 32 °C sıcaklıkta ve ortalama % 23 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.47’de kanal giriş-çıkışındaki hava sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Sistem 2,11 saatte (126 dakika) ısı dengeye ulaşmıştır.

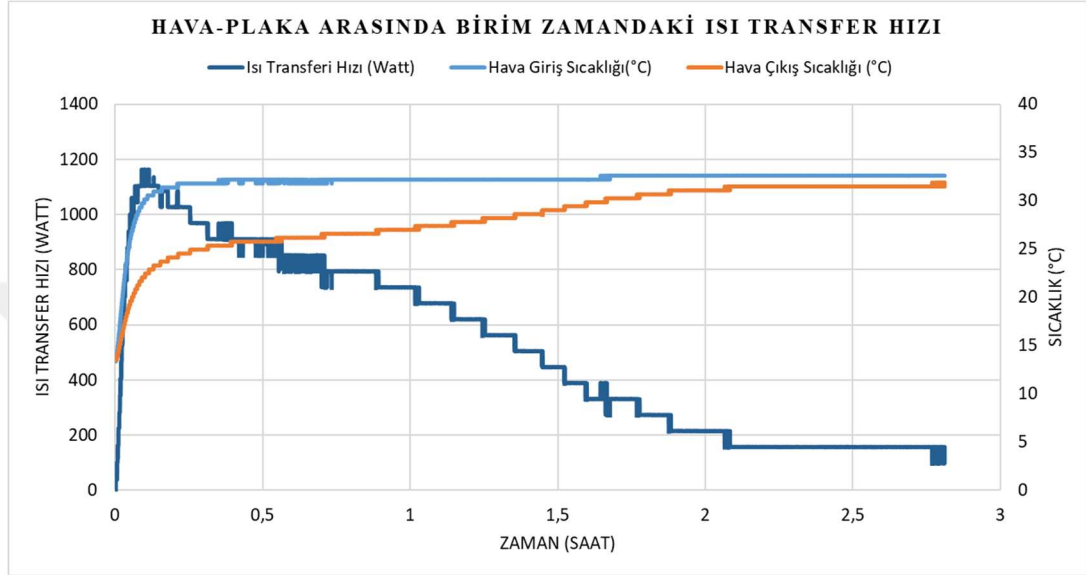


Şekil 6.47. Deney – 6 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.48. Deney – 6 koşulları için plakaların ısı davranışı

Şekil 6.48’de görüldüğü üzere B kodlu plakalar erime sürecini A kodlu plakalardan daha erken tamamlamıştır. Kanal ortasında bulunan B-4 ve A-4 kodlu plakalar en hızlı ısınan plakalar olmuştur. Şekil 6.49’da plakaların birim zamanda havadan çektiği ısı enerjisi miktarı gösterilmiştir. Isıl dengeye ulaşıldığı sürede ısı transfer miktarı 200 W değerinin altına inmiştir.



Şekil 6.49. Deney – 6 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

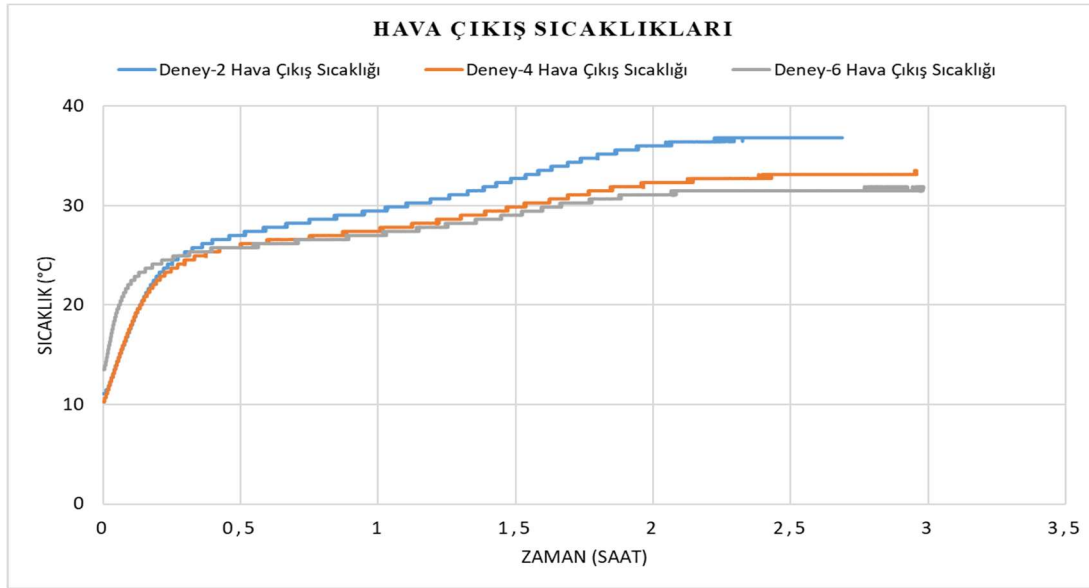
Tablo 6.5’te deşarj deneyleri karşılaştırılmıştır. Sistemin ısıl denge süresi boyunca havadan çektiği toplam ısı enerjisi miktarından ortalama % 5’in altında fark vardır.

Tablo 6.5. 20 mm plaka mesafesinde deşarj deneylerinin kıyaslanması

Koşul	Isıl Dengeye Ulaşma Süresi (saat)	Havadan Absorbe Edilen Isı Enerjisi Miktarı (kJ, Duyulur + Gizli)	Ortalama Isı Transfer Hızı (Soğutma Gücü) (W)
Deney – 2 (1,5 m/s, 38 °C)	2,3 (138 dk)	4925,6	594,7
Deney – 4 (2 m/s, 34 °C)	2,44 (146 dk)	5117,5	582,5
Deney – 6 (2,5 m/s, 32 °C)	2,11 (126 dk)	4830	635,7

Farklı hava hız ve sıcaklık koşulları altında hava giriş sıcaklığının, hava çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 6.50’de kıyaslanmıştır. 34 °C ve 32 °C hava giriş

sıcaklığı değerlerinde, 38 °C hava giriş sıcaklığına göre hava çıkış sıcaklığında daha yavaş bir artış gözlenmiştir.



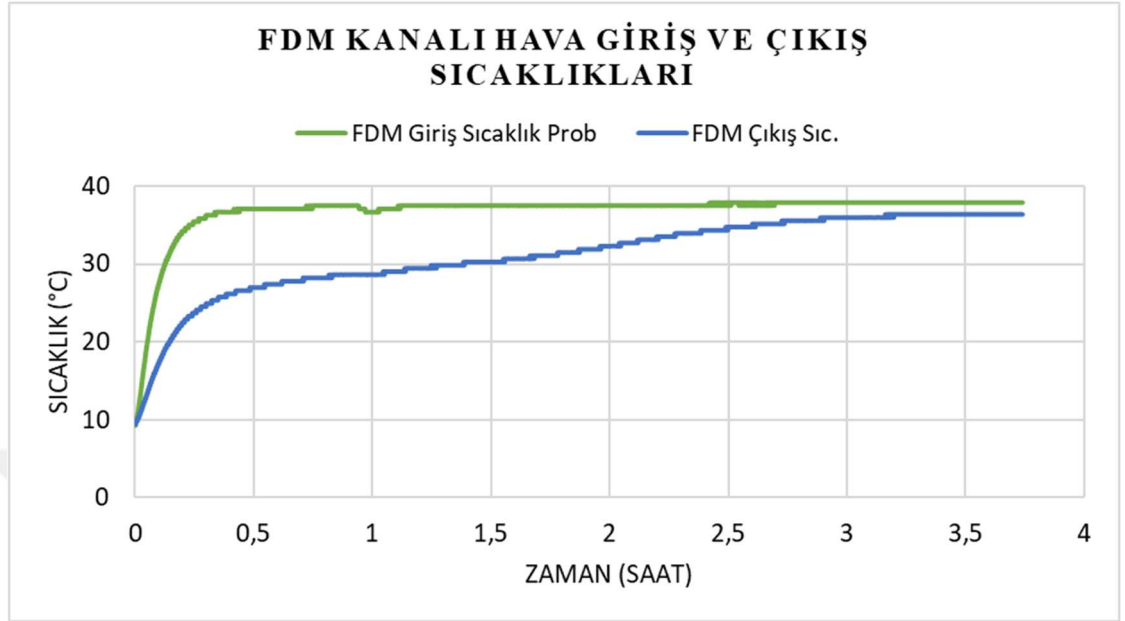
Şekil 6.50. 20 mm mesafe deşarj deneylerinde kanal çıkışı hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi

Maksimum konfor sıcaklığı için 30 °C referans hava sıcaklığı olarak belirlenmiştir [65]. Bütün deşarj senaryolarında kanal çıkış havasının bağıl nem değeri ortalama %30 olarak kaydedilmiştir. 30 °C hava sıcaklığı değerine Deney – 2 koşullarında 1,11 saat, Deney – 4 koşullarında 1,53 saat, Deney – 6 koşullarında ise 1,70 saatte ulaşılmıştır. 34 °C sıcaklık, 2 m/s hava hızı durumundan, sıcaklığın 4 °C artması hava hızının 0,5 m/s azalması durumunda konfor şartlarına ulaşma süresi % 27,4 kısılırken; sıcaklığın 2 °C azalması ve hava hızının 0,5 m/s artması durumunda konfor şartlarına ulaşma süresi % 11,1 uzamıştır. Bu sonuçlar ışığında giriş sıcaklığının düşük olması durumunda konfor şartlarına ulaşma süresinin uzadığı görülmüştür.

• Deney – 8

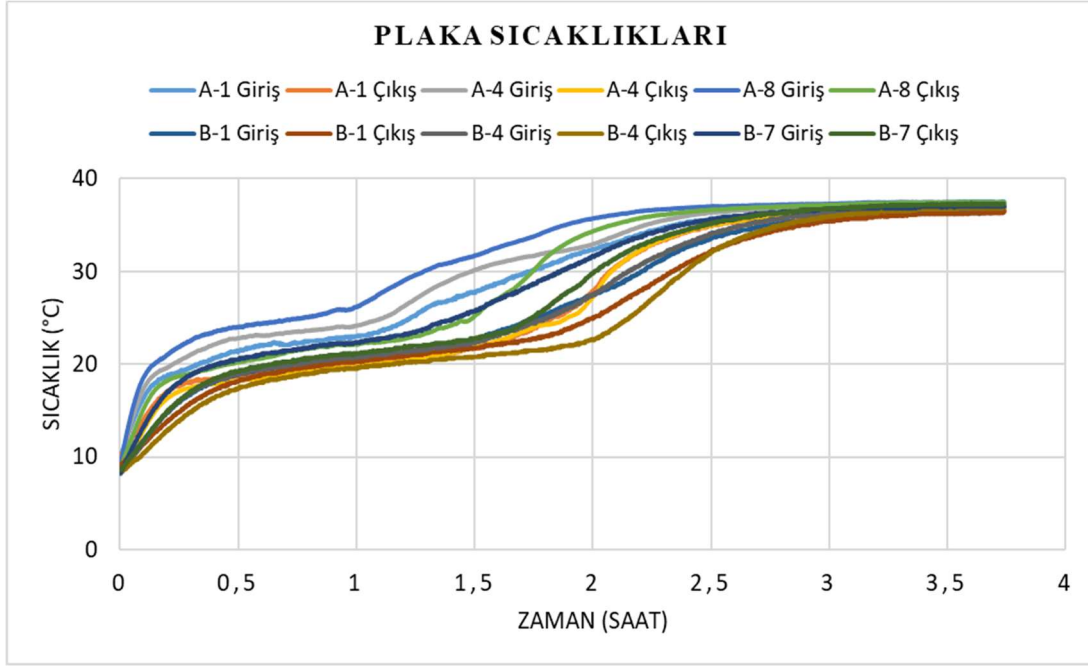
Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine 1,5 m/s hızda, 38 °C sıcaklıkta ve ortalama % 20 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Şekil 6.51’de görüldüğü üzere kanal giriş çıkış konumundaki havanın sıcaklık değerleri verilmiştir. Sistem bu koşullar altında 3,24 saat (194 dakika) içerisinde ısı dengeye ulaşmıştır. Kanal çıkışındaki havanın ortalama % 25 bağıl nem değerine sahip olduğu

görülmüştür. Konfor şartı değeri olan 30 °C sıcaklık değerine ise 1,53 saatte (92 dakika) ulaşmıştır.



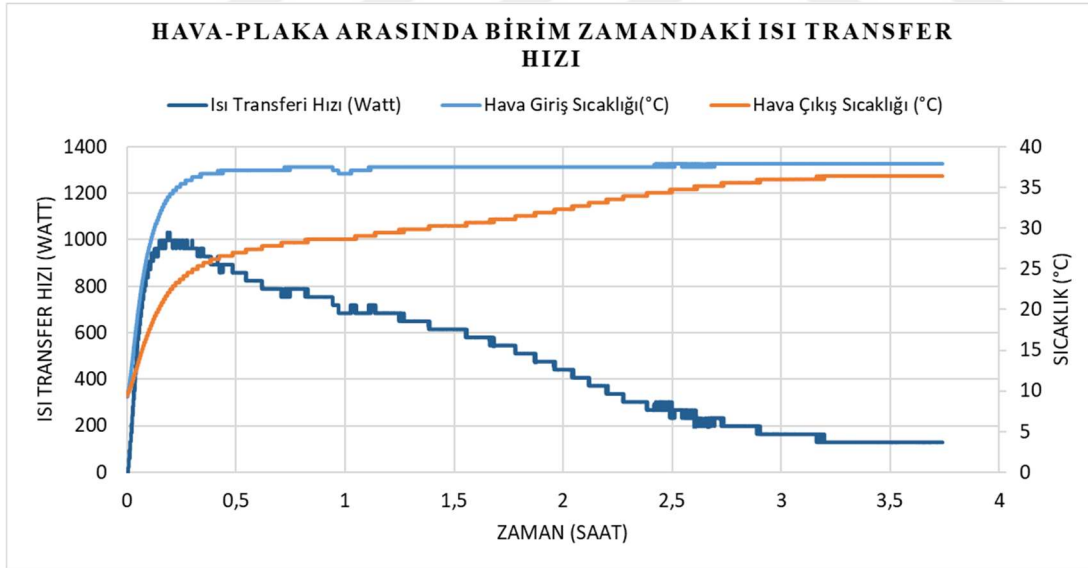
Şekil 6.51. Deney – 8 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 6.52’de ise bu test koşulları altında plakaların ısı davranışları gösterilmiştir. Kanal orta bölgesinde bulunan plakalar yüksek hava hızları ve dolayısıyla yüksek ısı transfer hızları sebebiyle daha hızlı şekilde ısınmıştır. Plakaların ön kısımları daha sıcaklığa karşı daha hızlı tepki verip daha hızlı ısınırken, çıkış noktaları daha geç ısınmıştır. A kodlu plakalarda A-8 plakasının girişi en hızlı ısınırken, B kodlu plakalarda ise B-7 kodlu plakanın girişi en hızlı ısınmıştır.



Şekil 6.52. Deney – 8 koşulları için plakaların ısı davranışı

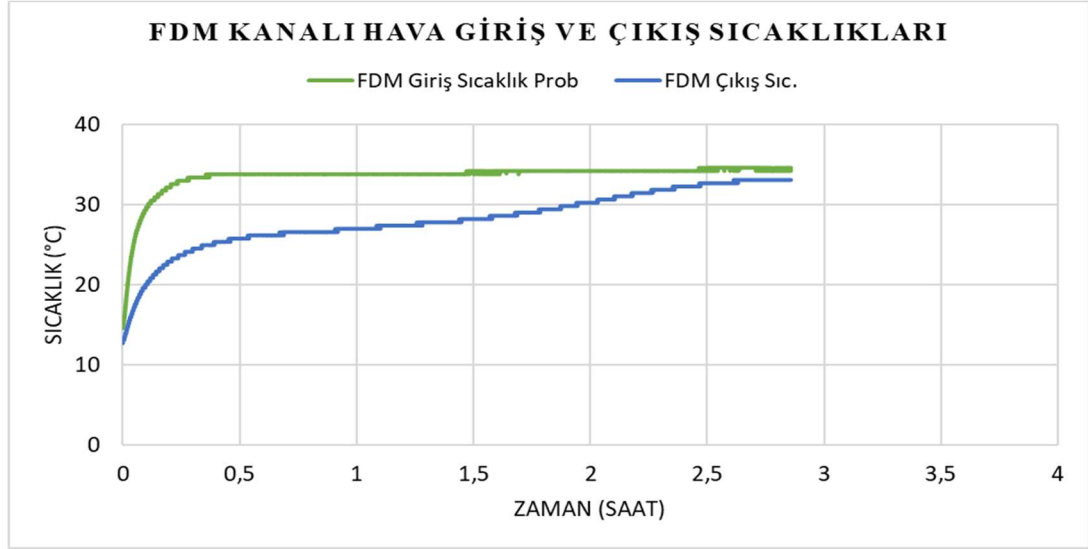
Şekil 6.53'te hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı verilmiştir. Isıl denge süresi boyunca havadan toplam 6212,9 kJ değerinde ısı enerjisi soğurulmuştur.



Şekil 6.53. Deney – 8 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

• Deney – 10

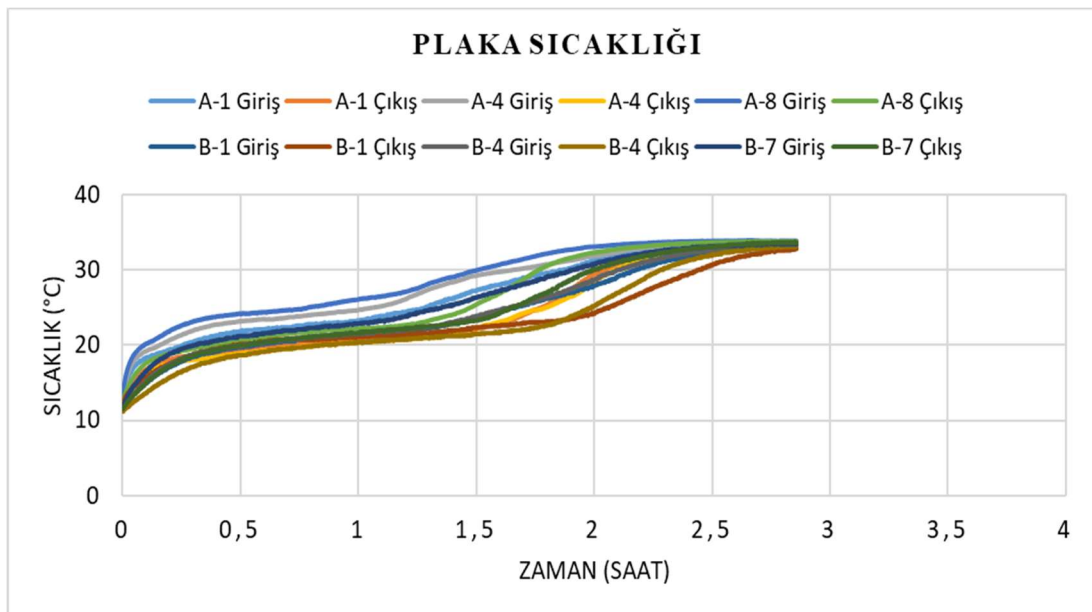
Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine 2 m/s hızda, 34 °C sıcaklıkta ve ortalama % 32 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Bu koşullar altında kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 6.54'te verilmiştir.



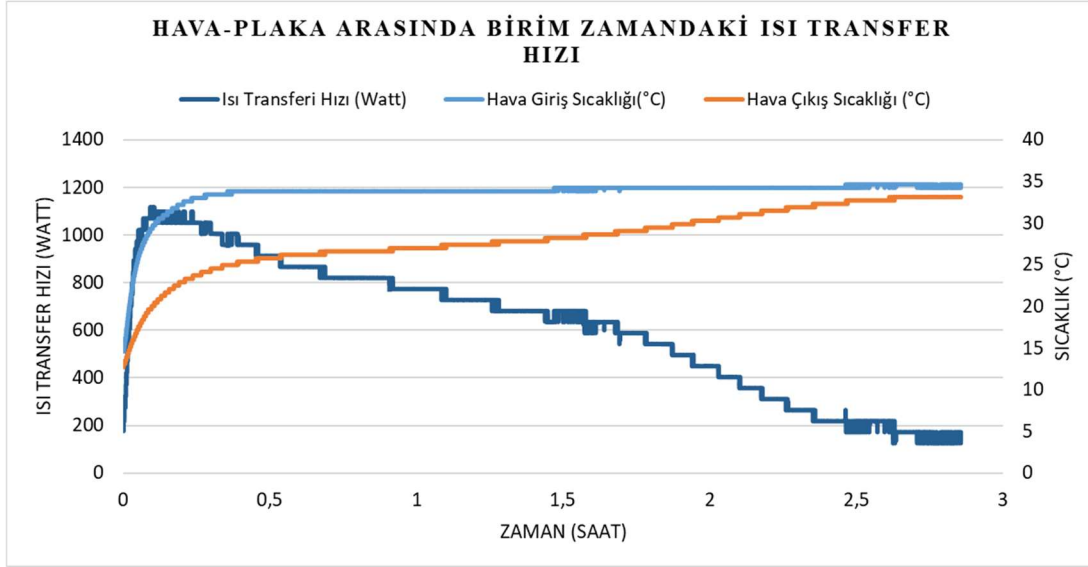
Şekil 6.54. Deney – 10 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 6.54'e göre sistem ısı dengeye 2,67 saatte (160 dakika) ulaşmıştır. Kanal çıkışındaki havanın ortalama % 32 bağıl nem değerine sahip olduğu görülmüştür. Konfor şartı değeri olan 30 °C sıcaklık değerine ise 1.98 saatte (119 dakika) ulaşılmıştır.

Şekil 6.55'de plakaların Deney-10 koşulu altında ısı davranışları verilmiştir. A-8 ve A-4 kodlu plakaların girişi sıcaklığın en hızlı yükseldiği plakalar olurken, B kodlu plakalarda sıcaklık en hızlı B-7 kodlu plakada meydana gelmiştir. Erime sürecini en geç tamamlayan plaka B-1 kodlu plaka olmuştur.



Şekil 6.55. Deney – 10 koşulları için plakaların ısı davranışı

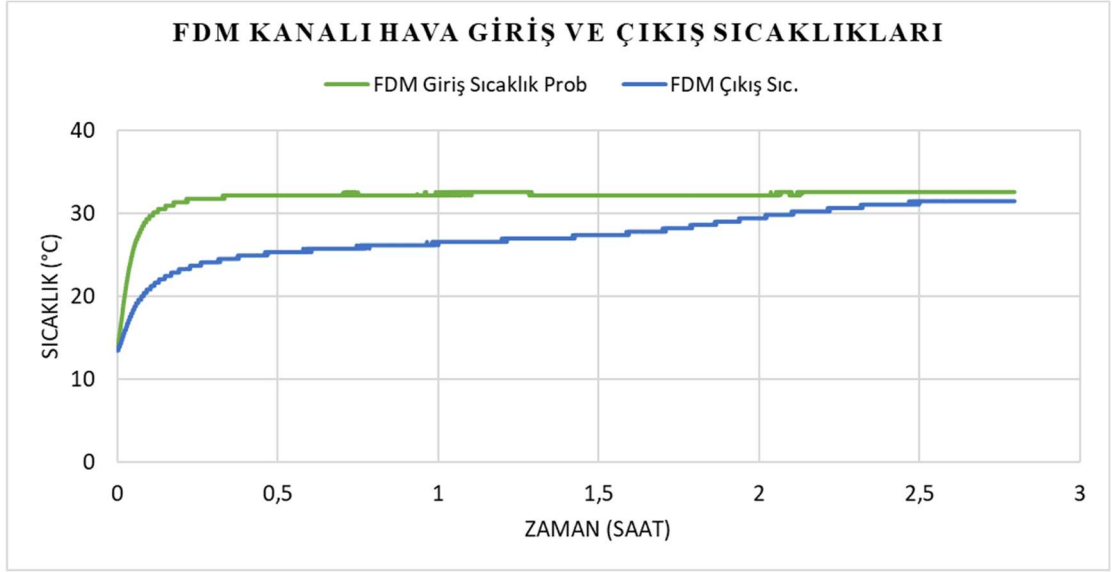


Şekil 6.56. Deney – 10 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

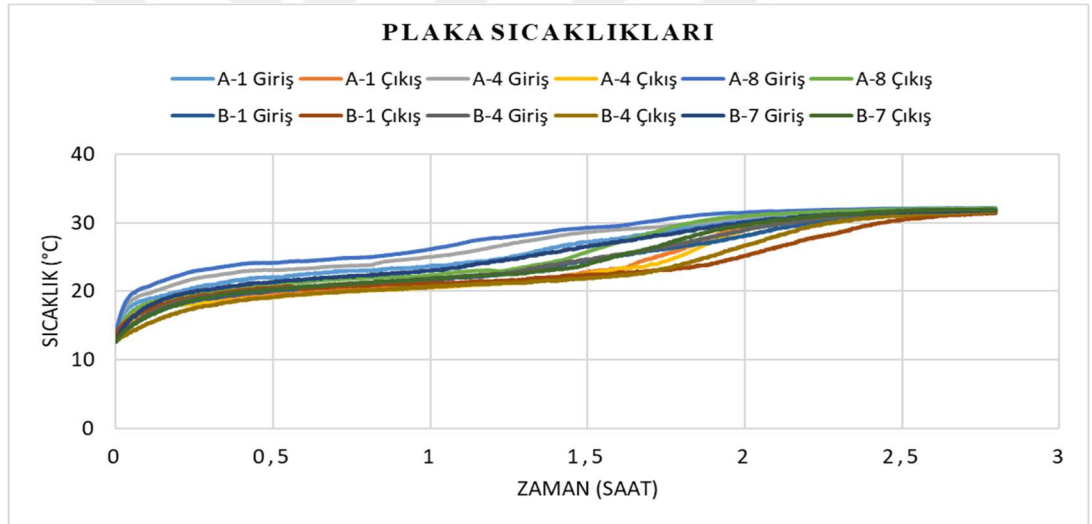
Şekil 6.56’da Deney-10 koşulları altında hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı verilmiştir. Isıl denge süresi boyunca plakalar havadan toplam 6238,9 kJ ısı enerjisi soğurmuştur.

• Deney – 12

Plakalar arası mesafe 10 mm iken; plakaların üzerine 2,5 m/s hızda, 32 °C sıcaklıkta ve ortalama % 26 bağıl nemde şartlandırılmış hava gönderilmiştir. Bu koşullar altında sistemin 2,54 saatte (154 dakika) ısıl dengeye ulaştığı Şekil 6.57’de görülmektedir. Konfor şartı sınır değeri olan 30 °C sıcaklık değerine 2,14 saat (128 dakika) içerisinde ulaşılmış ve kanal çıkışındaki havanın ortalama bağıl nem değeri % 32 olarak ölçülmüştür.

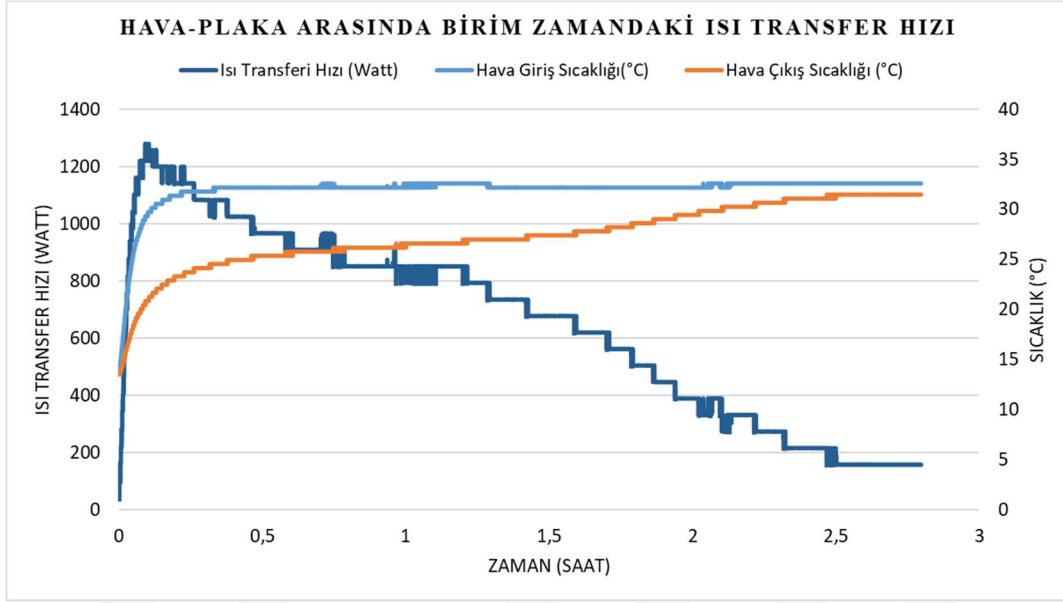


Şekil 6.57. Deney – 12 koşulları için kanal hava giriş-çıkış sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 6.58. Deney – 12 koşulları için plakaların ısı davranışı

Şekil 6.58’de plakaların bu deney koşulunda ısı davranışları gösterilmiştir. A ve B kodlu plakaların hepsinin giriş bölümleri sıcaklık artışına hızlı tepki vermiştir. A kodlu plakalar arasında erime sürecini en hızlı tamamlayan A-8 kodlu plaka olurken, B kodlu plakalar arasında erime sürecini en hızlı tamamlayan plaka ise B-7 kodlu plaka olmuştur. Şekil 6.59’da hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı verilmiştir. Isıl denge süresi boyunca havadan toplamda 6423,4 kJ ısı enerjisi soğurulmuştur.



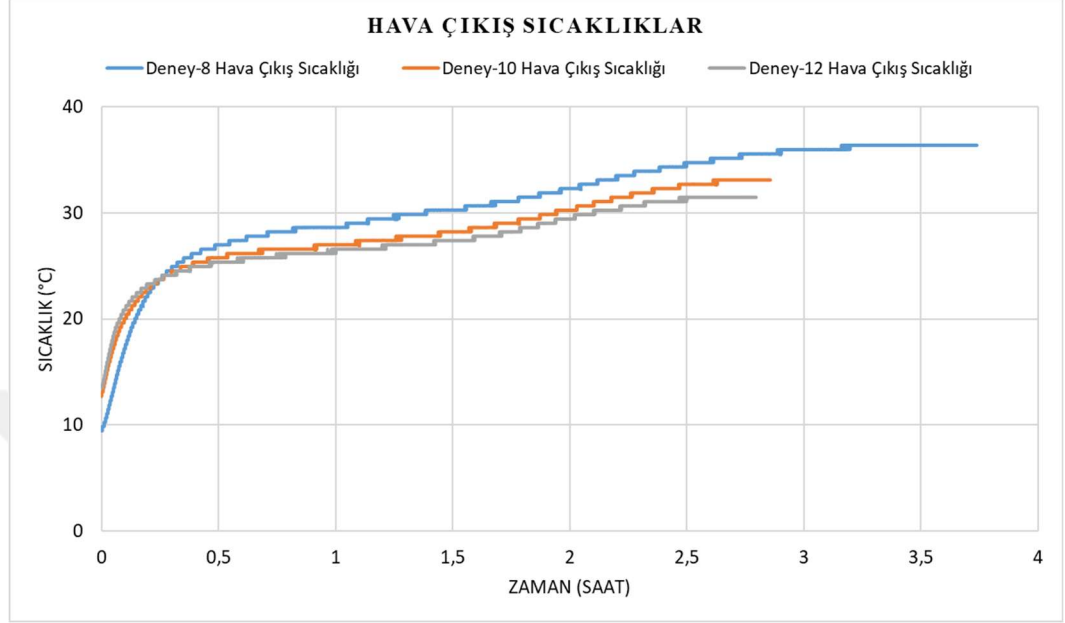
Şekil 6.59. Deney – 12 için hava-FDM arasında birim zamandaki ısı transfer hızı

Tablo 6.6. 10 mm plaka mesafesinde deşarj deneylerin karşılaştırılması

Koşul	Isıl Dengeye Ulaşma Süresi (saat)	Havadan absorbe edilen ısı enerjisi miktarı (kJ, duyulur + gizli)	Ortalama ısı transfer hızı (soğutma gücü) (W)
Deney – 8 (1,5 m/s, 38 °C)	3,24 (194 dk)	6212,9	532,5
Deney – 10 (2 m/s, 34 °C)	2,67 (160 dk)	6238,9	648,9
Deney – 12 (2,5 m/s, 32 °C)	2,54 (152 dk)	6423,3	702,4

Tablo 6.6'da görüldüğü üzere plakalar arası mesafe 10 mm iken farklı hava hız ve sıcaklık değerlerinde havadan soğurulan toplam ısı enerjisi, ortalama ısı transfer hızı ve ısıl denge süreleri karşılaştırılmıştır. Hava sıcaklık ve hız değerlerinin artması ile havadan soğurulan ısı enerjisi % 5'in altında değişiklik gösterirken ve ısı transfer hızları artış göstermiştir. FDM'nin soğutma etkisini görmek için bu farklı senaryolar altında kanaldan havanın çıkış sıcaklığı ve nem değerinin sınır konfor şartlarını ne kadar süre ile sağladığı incelenmelidir. Maksimum konfor sıcaklığı olarak 30 °C hava sıcaklığı belirlenmiştir. Bütün deşarj senaryolarında kanal çıkış havasının bağıl nem değeri ortalama % 30 olarak kaydedilmiştir. 30 °C hava sıcaklığı referans değerine Deney – 8 koşullarında 1,53 saat (92 dakika), Deney – 10 koşullarında 1,93

saat (115 dakika), Deney – 12 koşullarında ise 2,14 saatte (128 dakika) ulaşılmıştır. Şekil 6.60’da bu deney senaryoları için kanal çıkışındaki hava sıcaklığının zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 6.60. 10 mm mesafe deşarj deneylerinde kanal çıkışı hava sıcaklıklarının zamana göre değişimi

6.3.2. Plakalar arası mesafenin deşarj sürecine etkisi

Plakalar arası mesafenin ortalama ısı transfer hızına etkisi Tablo 6.7’de, havadan soğurulan toplam ısı enerjisi miktarına etkisi ise Tablo 6.8’de verilmiştir. Mesafe 10 mm konumuna getirildiğinde havadan absorbe edilen ısı enerjisi miktarında % 21-33 arası, ısı transfer hızında ise % 10 civarında bir artış gözlemlenmiştir. 1,5 m/s hız, 38 °C sıcaklık durumunda plakalar arası mesafe daraldığında ısı transferi hızının azalma sebebinin sensör hassasiyeti ve çevre koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 6.7. Plaka mesafesinin ortalama ısı transfer hızına etkisi

Koşul	20 mm	10 mm
	Plakalar Arası Mesafede Ortalama Isı Transfer Hızı (W)	Plakalar Arası Mesafede Ortalama Isı Transfer Hızı (W)
1,5 m/s, 38 °C	594,9	532,6
2 m/s, 34 °C	582,6	649,1
2,5 m/s, 32 °C	635,9	702,5

Tablo 6.8. Plaka mesafesinin havadan absorbe edilen toplam ısı enerjisi miktarına etkisi

Koşul	20 mm	10 mm
	Plakalar Arası Mesafede Absorbe Edilen Toplam Isı Enerjisi Miktarı (kJ)	Plakalar Arası Mesafede Absorbe Edilen Toplam Isı Enerjisi Miktarı (kJ)
1,5 m/s, 38 °C	4925,7	6212,9
2 m/s, 34 °C	5117,6	6238,9
2,5 m/s, 32 °C	4830	6423,4

Konfor sıcaklığı olarak belirlenen 30 °C hava sıcaklığına ulaşılma zamanları Tablo 6.9’da verilmiştir. Aynı hava giriş koşullarında, plakalar arası mesafe 10 mm olduğunda kanal ortasına yığılan plakalar ve hava arasında 20 mm konumuna göre daha yüksek ısı transferi gerçekleşmiştir. Bu durum 10 mm plaka mesafesinde konfor sıcaklığı değerine ulaşma süresini % 25- 38 uzatmıştır. 10 mm plaka mesafesi olduğu durumlarda havadan daha fazla ısı enerjisi soğurulmuştur. Bu durum şu şekilde açıklanabilir;

- FDM içeren plakalar 10 mm mesafede deşarj yapılmadan önce 10 mm mesafede şarj edilmiş, 20 mm mesafede deşarj edilmeden önce ise 20 mm mesafede şarj edilmiştir.
- 10 mm plaka mesafesinde şarj esnasında plakalardan daha fazla ısı enerjisi soğurulmuş ve bu sebeple deşarj esnasında havadan daha fazla ısı enerjisi soğurabilme kapasitesi olmuştur.

Tablo 6.9. Konfor sıcaklığına ulaşma süreleri

Koşul	20 mm Plakalar Arası Mesafede Konfor Sıcaklığına Ulaşma Süresi (Saat)	10 mm Plakalar Arası Mesafede Konfor Sıcaklığına Ulaşma Süresi (Saat)	Konfor Sıcaklığına Ulaşma Süresinde Meydana Gelen Değişim (%)
1,5 m/s, 38 °C	1,11	1,53	+ % 37,8
2 m/s, 34 °C	1,53	1,98	+ % 29,4
2,5 m/s, 32 °C	1,7	2,14	+ % 25,9

6.4. İklimlendirme Sistemlerinde FDM Kullanmanın Maddi Tasarrufa Etkisi

Yapılan şarj ve deşarj deneyleri sonucunda; FDM'nin maddi tasarruf amacıyla kullanılabilirliği ve bu tasarrufun miktarı üzerine hesaplamalar bu bölümde tartışılacaktır.

FDM'nin iklimlendirme sisteminde kullanılacağı mahalin (ofis, tiyatro, AVM, spor salonu vb.) soğutma ihtiyacının günlük 10 saat olduğu ve bu 10 saatin 09:00-19:00 arasında olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bu ortamın soğutma giderleri FDM varlığında ve FDM olmadığı durum altında incelenerek FDM'in ortaya koyduğu tasarruf miktarı araştırılmıştır.

Elektrik enerjisi satışında tek zamanlı ve üç zamanlı (gündüz, puant, gece) olmak üzere 2 farklı satış tarifiesi vardır. 01.04.2022 tarihli EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu) kararı doğrultusunda yayınlanan elektrik piyasası tarifeler listesi Tablo 6.10'da verilmiştir. Tek zamanlı tarifiede gün içinde birim enerji fiyatı değişmemektedir. Üç zamanlı tarifiede ise: 06:00 – 17:00 arası gündüz, 17:00 – 22:00 arası puant, 22:00 – 06:00 arası ise gece tarifiesi olarak belirtilmiştir. FDM içeren plakaların şarj işlemi iki farklı senaryo altında incelenmiştir. Bunlardan ilki eş zamanlı soğutma olarak adlandırılmıştır. Eş zamanlı soğutmada saat 09:00 – 19:00 arasında bu ortamın soğutma ihtiyacı gündüz tarifiesi boyunca klasik mekanik buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminden karşılanırken, kanal içerisinde bulunan içleri FDM doldurulmuş plakalar da puant tarifiesi zamanına (17:00) kadar katılmış olacaklardır. İkinci şarj işlemi ise geri dönüş havalı şarj işlemi olarak adlandırılmıştır. Geri dönüş havalı sistemde şarj işlemi gece tarifiesinde yapılarak

FDM içeren plakaların yalıtılmış bir kanal içerisinde puant tarife zaman aralığına kadar bekletilmiştir. Puant tarife zaman aralığında ise soğutma çevrimi kompresörü kapatılarak sadece hava emiş fanı yardımıyla dış ortam havasının FDM içeren plakalar üzerinden geçirilmesiyle tasarruf yapılmış olacaktır.

Tablo 6.10. 01.04.2022 tarihli EPDK kararı elektrik enerjisi birim fiyatı

	Tek zamanlı (TL/kWh)	Gündüz (TL/kWh)	Puant (TL/kWh)	Gece (TL/kWh)
Mesken	1,678584	1,700262	2,489644	1,068996

FDM'nin etkisinin görülmesi için sistem FDM olmadan çalıştığında sarf edeceği elektrik enerjisi miktarı ve bunun maddi karşılığı Tablo 6.11.'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Bundan sonraki enerji hesaplama tablolarında P_{fan} : fan gücünü (Watt), P_k : kompresör gücünü (Watt), h : çalışma saatini (saat), E : günlük enerji sarfiyatını (kWh), C : birim enerji maliyetini (TL/kWh) temsil etmektedir.

Tablo 6.11. FDM olmadan günlük soğutma giderleri

Koşul	P_{fan} (Watt)	P_k (Watt)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
1,5 m/s, 9°C	35	812	10	8,47	1,858138	17,85
2 m/s, 11°C	56	812	10	8,68	1,858138	18,30
2,5 m/s, 13°C	70	812	10	9,13	1,858138	19,25

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

Tablo 6.11.'de görüldüğü gibi FDM olmadığı durumda ortamın soğutma ihtiyacının klasik mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimiyle 10 saat boyunca (% 80'i gündüz, % 20'si puant tarife) karşılanması durumunda farklı hava sıcaklık ve hız değerleri için günlük enerji maliyetleri verilmiştir.

Gündüz vakti ortamın soğutma ihtiyacı klasik mekanik buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminden sağlanırken eş zamanlı olarak kanal içerisindeki FDM içeren plakalardan ısı enerjisi soğurularak katılmışlardır. Bu sayede FDM'nin katılması için ilave bir enerji maliyeti oluşmamıştır. FDM'nin katılması sırasında kanal çıkış

havasında (ortama gönderilen hava) konfor şartları etkilenmemiştir. 09:00 – 17:00 (8 saat) saatleri arasında gündüz tarifesi işlemektedir. Bu zaman aralığında ortamın soğutulması için sistemin enerji sarfiyatı Tablo 6.12’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6.12. Gündüz tarifesinde ortam ve FDM’nin eş zamanlı soğutulması sırasındaki enerji maliyetleri

Koşul	P_{fan} (W)	P_k (W)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
1,5 m/s, 9 °C	35	812	8	6,77	1,700262	13,06
2 m/s, 11 °C	56	812	8	6,94	1,700262	13,39
2,5 m/s, 13 °C	70	812	8	7,3	1,700262	14,08

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

FDM içeren plakaların şarj işleminin geri dönüş havalı soğutma sisteminde gerçekleştirilmesi durumunda sistem gece çalışacaktır. Kompresör+fan grubunun gece çalışması herhangi bir ortam soğutma ihtiyacını karşılamadan sadece FDM’nin katılaşmasını sağlayacaktır. Bu durumda FDM’nin şarj olmasına ilişkin bir enerji maliyeti ortaya çıkacaktır. Bu şarj maliyetleri farklı plaka mesafesi ve giriş koşulları için Tablo 6.13.’de kıyaslanmıştır.

Tablo 6.13. Geri dönüş havalı soğutma sisteminde farklı koşullar için FDM şarj maliyetleri

Mesafe	Şarj Durumu	P_{fan} (W)	P_k (W)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
20	1,5 m/s, 3 °C	39	770	2,42	1,96	1,068996	2,38
	2 m/s, 6 °C	71,6	802	2,34	2,04	1,068996	2,48
	2,5m/s, 8 °C	78,7	804	1,44	1,27	1,068996	1,54
10	1,5 m/s, 3 °C	41	766	2,98	2,40	1,068996	2,92
	2 m/s, 6 °C	67,6	795	2,34	2,02	1,068996	2,45
	2,5 m/s, 8 °C	80	783	1,82	1,57	1,068996	1,90

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

Puant tarife zaman aralığına geçildiğinde ise FDM yokluğunda ve FDM'li şekilde enerji sarfiyatları üzerinden elde edilen tasarruf miktarı ortaya çıkacaktır. FDM yokluğunda, puant tarife aralığında soğutma çevrimi çalışsaydı oluşacak enerji sarfiyatı ve giderleri Tablo 4.14.'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6.14. FDM yokluğunda puant tarife sırasında meydana gelen enerji giderleri

Şarj Durumu	P_{fan} (W)	P_k (W)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
1,5 m/s, 9 °C	35	812	2	1,69	2,489644	4,78
2 m/s, 11 °C	56	812	2	1,76	2,489644	4,90
2,5 m/s, 13 °C	70	812	2	1,82	2,489644	5,15

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

Puant yük aralığında dış ortam havası FDM içeren plakalar üzerinden, kanal çıkış havası maksimum konfor sıcaklığı değerine ulaşana kadar, geçirildiği durumda kompresörün farklı deşarj senaryoları altında daha az çalışması sebebiyle oluşan enerji giderleri Tablo 6.15'de olduğu gibi hesaplanmıştır. 10 mm plaka mesafesinde, 2 ve 2,5 m/s hava hızı durumlarında puant tarife aralığında kompresörün tamamen kapalıyken ortamın soğutma ihtiyacı FDM tarafından karşılanmıştır. FDM'nin deşarjı sırasında sadece dış ortam havası emiş fanı kullanılmış ve deşarj süresi boyunca şebekeden çektiği elektrik enerjisi miktarı her ne kadar az olsa da farklı deşarj senaryoları için Tablo 6.16'da verilmiştir.

Tablo 6.15. FDM varlığında, puant yük tarifesinde kompresörün ilave çalışmasıyla oluşan enerji giderleri

Mesafe	Deşarj Durumu	P_{fan} (W)	P_k (W)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
20	1,5 m/s, 38 °C	35	812	0,89	0,75	2,489644	2,13
	2 m/s, 34 °C	56	812	0,47	0,41	2,489644	1,15
	2,5 m/s, 32 °C	70	812	0,3	0,28	2,489644	0,77
10	1,5 m/s, 38 °C	35	812	0,47	0,38	2,489644	1,09
	2 m/s, 34 °C	56	812	0	0	2,489644	0
	2,5 m/s, 32 °C	70	812	0	0	2,489644	0

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

Tablo 6.16. FDM deşarj sırasında ve puant yük tarifesinde dış hava emiş fanının enerji giderleri

Mesafe	Deşarj Durumu	P_{fan} (W)	P_k (W)	h (saat)	E (kWh)	C (TL/kWh)	Günlük Toplam (Vergiler dahil, TL)
20	1,5 m/s, 38 °C	35	0	1,11	0,04	2,489644	0,12
	2 m/s, 34 °C	56	0	1,53	0,09	2,489644	0,24
	2,5 m/s, 32 °C	70	0	1,7	0,12	2,489644	0,34
10	1,5 m/s, 38 °C	35	0	1,53	0,05	2,489644	0,15
	2 m/s, 34 °C	56	0	1,98	0,11	2,489644	0,31
	2,5 m/s, 32 °C	70	0	2	0,15	2,489644	0,42

* Vergiler (%18 KDV, %5 Elektrik tüketim vergisi)

Eş zamanlı şarj edilen FDM'lerin deşarj edilmesi sırasında elde edilen maddi tasarruf miktarı günlük, aylık ve üç aylık şekilde Tablo 6.17'de hesaplanmıştır. Eş zamanlı şarjda elde edilen tasarruf miktarı hesaplanırken kullanılan eşitlik şu şekildedir;

$$Tasarruf Miktarı (TL) = (P_{k,FDM\ yok}) - (P_{fan} + P_{k,puant})$$

$P_{k,FDM\ yok}$ = FDM olmadığı durumda kompresör enerji giderleri

P_{fan} = deşarj sırasında fanın enerji giderleri

$P_{k,puant}$ = Kompresör puant yükte ilave çalışmasından kaynaklı enerji giderleri

Tablo 6.17. Eş zamanlı şarj durumunda elde edilen maddi tasarruf miktarları (TL)

Mesafe	Deşarj Durumu	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (Günlük)	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (Aylık)	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (3 Aylık)
20 mm	1,5 m/s, 38°C	2,54	76,1	228,2
	2 m/s, 34 °C	3,51	105,2	315,7
	2,5 m/s, 32 °C	4,05	121,4	364,1
10 mm	1,5 m/s, 38 °C	3,40	102,0	306,0
	2 m/s, 34 °C	4,65	139,4	418,1
	2,5 m/s, 32 °C	5,08	152,4	457,3

FDM içeren plakaların şarj işleminin gece tarifesinde gerçekleşmesi durumunda geri dönüş havalı soğutma sistemi ele alınmıştır. Geri dönüş havası kullanılması durumunda şarj süreleri önemli ölçüde kısalmıştır. Geri dönüş havalı soğutma sistemi kullanılması durumunda elde edilen tasarruf miktarı hesaplanırken kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$\text{Tasarruf Miktarı (TL)} = (P_{k,FDM\ yok}) - (FDM_{\text{şarj}} + P_{fan} + P_{k,puant})$$

$P_{k,FDM\ yok}$ = FDM olmadığı durumda kompresör enerji giderleri

$FDM_{\text{şarj}}$ = FDM'ningece tarifesinde oluşan şarj maliyeti

P_{fan} = deşarj sırasında fanın enerji giderleri

$P_{k,puant}$ = FDM'nin puant yükte ilave çalışmasından kaynaklı enerji giderleri

Tablo 6.18'de geri dönüş havalı sistem kullanılması durumunda elde edilen tasarruf miktarları verilmiştir.

Tablo 6.18. Geri dönüş havalı sistem kullanılması durumunda elde edilen tasarruf miktarları

Mesafe	Deşarj Durumu	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (Günlük)	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (Aylık)	Elde edilen tasarruf miktarı, TL (3 Aylık)
20 mm	1,5 m/s, 38 °C	0,16	4,8	14,14
	2 m/s, 34 °C	1,03	30,9	92,6
	2,5 m/s, 32 °C	2,51	75,2	225,5
10 mm	1,5 m/s, 38°C	0,48	14,5	43,6
	2 m/s, 34 °C	2,20	66	197,9
	2,5 m/s, 32 °C	3,18	95,3	285,9

Tasarruf miktarlarının kıyaslanabilir olması açısından her iki şarj durumu için yüzdelik bazda tasarruf miktarları Tablo 6.19'da verilmiştir. Tablo 6.19'da görüldüğü gibi eş zamanlı soğutma sisteminde elde edilen tasarruf yüzdeleri geri dönüş havalı sisteme göre çok daha yüksektir. Bunun sebebi eş zamanlı sistemde FDM'nin şarj olması için tek başına soğutma çevriminin çalışmasına gerek olmamasıdır. Ortamın soğutma ihtiyacı gündüz tarifesinde karşılanırken, FDM içeren plakaların da katılması sağlanarak ilave bir şarj maliyeti oluşmamıştır. Şarj

maliyetinin oluşmaması sebebiyle de tasarruf miktarları geri dönüş havalı sisteme göre fazladır.

Tablo 6.19. Eş zamanlı ve geri dönüş havalı sistemlerde şarj durumunda sağlanan yüzde enerji tasarruf miktarları

Mesafe	Koşul	Eş zamanlı sistem tasarruf miktarı (%)	Geri dönüş havalı sistem tasarruf miktarı (%)
20 mm	1,5 m/s, 38°C	14,21	0,90
	2 m/s, 34 °C	19,18	5,63
	2,5 m/s, 32 °C	21,03	13,02
10 mm	1,5 m/s, 38°C	19,63	2,80
	2 m/s, 34 °C	24,85	11,76
	2,5 m/s, 32 °C	26,47	16,55



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında laboratuvar ölçeğinde kurulan enerji depolama üniteli iklimlendirme deney düzeneği ile farklı koşullar altında çeşitli senaryolar kurgulanarak enerji depolama ünitesinin mahal soğutma ihtiyacına etkisi ve sistem performansı incelenmiştir. Bu amaçla, Faz Değiştiren Malzemeler (FDM'ler) olarak isimlendirilen ve gizli ısı enerji depolanmasına imkan tanıyan enerji depolama malzemeleri kullanılarak iklimlendirme sisteminin enerji depolama ünitesi oluşturulmuştur. Bunun için, yüksek enerji depolama kapasitelerine ve uygun faz geçiş sıcaklıklarına sahip RT – 18 HC (~260 kJ/kg, 17-19 °C) ve RT – 21 HC (~190 kJ/kg, 19-23 °C) FDM'leri gizli ısı depo ünitesinde alüminyum plakalar içerisine doldurularak kullanılmıştır. Gizli ısı enerjisi depolama ünitesine sahip iklimlendirme deney sisteminde farklı senaryolar altında gerçekleştirilen deneyler esnasında laboratuvar ortam sıcaklığı, hava giriş-çıkış sıcaklık, nem ve hızları, kullanılan plakaların üzerine yerleştirilen ısı çiftler yardımıyla plakaların ve dolayısıyla FDM'lerin ısı davranışları, fan, ısıtıcı ve kompresör-fan grubunun güç kullanımları uygun aletler kullanılarak sistemin çeşitli noktalarından ölçülmüş ve veri kayıt cihazı vasıtasıyla bilgisayara anlık olarak kaydedilmiştir. Böylece, FDM'ler ile doldurulmuş alüminyum plakaların depolama ünitesindeki dizilimi ve konumunun, hava giriş hızı ve sıcaklığının soğutma performansına olan etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte, gece, gündüz ve puant elektrik tarifelerindeki birim enerji satış fiyatı farklılıklarından yola çıkarak FDM'lerin şarj ve deşarj süreçleri, iklimlendirme sistemine olan faydası ve beraberinde getirdiği parasal tasarruf miktarları değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ulaşılan genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Plakaların içleri FDM ile doldurulmadan, boş halde kanal içine farklı konumlarda yerleştirilerek sistemin ısı davranışı ve rejime girme süresi incelenmiştir. Boşta çalışma deneyleri hem şarj hem de deşarj senaryoları için yapılmıştır. Bütün şarj ve deşarj senaryoları altında sistem 0,2 saat (12 dakika) içinde rejime girmiştir. Plakaların içleri boş ve FDM ile doluyken deneyler gerçekleştirilerek FDM'nin etkisi gözlenmiştir.
- Şarj deneyleri sırasında sistemin ısı dengeye gelme süresi ve plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarları farklı giriş koşulları altında

kıyaslanmıştır. Her iki plakalar arası mesafede de (20 mm ve 10 mm) hava hızının ve sıcaklığının 9°C olduğu durumlarda plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarının en yüksek olduğu; giriş hızı ve sıcaklığının yükselmesi ile plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarının yaklaşık %2-12 oranında azaldığı gözlenmiştir. Plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarının en çok olduğu durumda sistemin ısı dengeye ulaşması daha uzun sürerken, absorbe edilen ısı enerjisi miktarının azalmasıyla birlikte ısı dengeye ulaşma süresi %2-14 arasında azalmıştır.

- Şarj deneyleri sırasında plakalar arası mesafenin daralmasıyla birlikte plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarında % 19 – 34 arasında artış görülmüştür. Bunun sebebi, plakalar arası mesafe daraldıkça plakalar kanal ortasında toplanmaktadır. Kanal çıkış noktasında yapılan ölçümler doğrultusunda; kanalın ortasında hava hızının yüksek olduğu, kanal köşelerinde ise hava hızının düşük olduğu görülmüştür. Hava hızının artmasıyla birlikte taşınım ısı transfer katsayısı da artış göstermektedir. Farklı mesafelerde plakalardan absorbe edilen ısı enerjisi miktarı farklı olmuştur. Bunun sebebi ise plakaların kanal ortasında toplanması sebebiyle hava ile plakanın arasındaki temasın daha etkili olması ve ısı transfer hızının artmasıdır. Bu sebepten deney koşulundaki ortalama ısı transfer hızları üzerinden kıyaslama yapılmıştır. Plakalar arası mesafenin daralmasıyla birlikte ortalama ısı transfer hızı % 17 – 24 arasında artış göstermiştir.
- Şarj deney senaryolarının hepsinde plakaların ısı davranışı incelendiğinde; A kodlu plakalar arasında A-4 numaralı plaka, B kodlu plakalar arasında ise B-4 kodlu plaka en hızlı katılma gösteren plaka olmuştur. A – 4 ve B – 4 kodlu plakalar kanalın ortasında bulunmaktadır. Kanalın ortasındaki yüksek hızlar neticesinde yüksek taşınım ısı transfer katsayısı oluşmuş ve katılma süreci. B kodlu plakalarda daha az FDM bulunması ve daha az gizli ısı enerjisi depolama potansiyeli sebebiyle, B kodlu plakaların katılma süresi bütün deney senaryolarında A kodlu plakalardan daha kısa olduğu görülmüştür. Kanalın en alt kısmında bulunan A – 1 kodlu plaka ise bütün şarj deney senaryolarında havayla en az temas eden plaka olduğundan en son katılma plaka olmuştur.

- Deşarj deneyleri sırasında sistemin ısı dengeye ulaşmasından ziyade maksimum konfor sıcaklığı değerine kadar geçen süre önemlidir. Sıcak ve kuru bir iklim bölgesinde maksimum konfor durumu 30 °C hava sıcaklığı ve % 30 bağıl nem olarak belirlenmiştir. Tablo 6.9’da farklı deney senaryolarında maksimum konfor sıcaklığına ulaşılma süreleri verilmiştir. Her iki plaka mesafesinde de; 34 °C sıcaklık, 2 m/s hava hızı durumundan, sıcaklığın 4 °C artması hava hızının 0,5 m/s azalması durumunda (38 °C, 1,5 m/s) konfor şartlarına ulaşma süresi % 22 – 27 kısalırken; sıcaklığın 2°C azalması ve hava hızının 0,5 m/s artması durumunda (32 °C, 2,5 m/s) konfor şartlarına ulaşma süresi % 8 – 11 uzamıştır. Bu sonuçlar ışığında giriş sıcaklığının düşük olması durumunda konfor şartlarına ulaşma süresinin uzadığı görülmüştür.
- Deşarj deneylerinde plakalar arası mesafenin daralmasıyla kanalın orta bölgesinde toplanan plakalar havayla daha etkili şekilde temas etmiş ve ısı transfer hızı artmıştır. Plakalar arası mesafenin daralması sonucunda havadan absorbe edilen ısı enerjisi miktarı artmıştır. Bu sayede daha uzun süre soğutma ihtiyacı karşılanabilir olmuştur. Mesafe daraldıkça maksimum ısı konfor şartlarına ulaşılma süresi % 25 – 37 arasında uzamıştır. Bu veriler doğrultusunda plakalar arası mesafenin dar olması, konfor şartlarını daha uzun süre sağlamıştır.
- FDM’lerin iklimlendirme sistemlerinde kullanılmasının enerji tasarrufuna etkisi incelenecek olursa; soğutma yükü ihtiyacı saat 09:00 – 19:00 arasında olan bir ortam düşünülmüştür. Gündüz elektrik tarifesinde ortam soğutulurken, FDM içeren plakalarda eş zamanlı olarak soğutulmuştur. Katılma süreleri gündüz tarifi zaman aralığında olduğundan, puant tarife başlayana kadar bütün katılma süreci tamamlanmış olacaktır. Puant tarifenin başladığı 17:00’dan 19:00’a kadar klasik mekanik buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi kapatılarak dış ortam havası FDM tarafından soğutulmuş ve soğutulan ortama gönderilmiştir. Dış ortam havası bir adet hava emiş fanı ile sağlanmıştır. Bu sayede iklimlendirme sistemlerinde FDM kullanılması durumunda ve farklı durum ve koşullar altında elde edilen fatura tasarruf miktarı % 0,9 ile % 26,47 arasında değişmektedir. Hem eş zamanlı hem de

geri dönüş havalı sistemde en yüksek tasarruf 2,5 m/s hava hızı 32 °C hava sıcaklığında gerçekleşirken, en düşük tasarruf 1,5 m/s hava hızı 38 °C hava sıcaklığında gerçekleşmiştir. Plakalar arası mesafe daraldıkça tasarruf miktarı artmıştır.

Sonuç olarak, iklimlendirme sistemlerinde gizli ısı depolaması yoluyla enerji depolanması önemli bir seçenek olup önemli miktarlarda parasal tasarrufa ulaşılması sağlanabilir. Bununla birlikte, iklimlendirme sistemlerinin sayısı ve bu tip sistemlere olan yoğun ihtiyaç göz önüne alındığında, enerji depolama üniteli sistemlerin yaygınlaşması durumunda uygun tasarlanmış sistemler ile önemli miktarlarda karbondioksit azalımı ve kaynakların daha etkin kullanımının mümkün olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] IEA, Electricity demand outlook in selected regions/countries in the Stated Policies Scenario, 2019-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-demand-outlook-in-selected-regions-countries-in-the-stated-policies-scenario-2019-2030>, (Erişim Tarihi: 01.02.2022)
- [2] IEA, Changes in primary energy demand by fuel and region in the Stated Policies Scenario, 2019-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/changes-in-primary-energy-demand-by-fuel-and-region-in-the-stated-policies-scenario-2019-2030>, (Erişim Tarihi: 01.02.2022)
- [3] IEA (2019), World Energy Outlook 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>, (Erişim Tarihi: 01.02.2022)
- [4] Energy Data – 2020 Edition, Environment and Energy, Statistical Books, Eurostat Energy Statistics, 2020, (Erişim Tarihi: 01.02.2022)
- [5] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, Chapter 2 - Energy Storage, Editor(s): S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, Academic Press, Pages 21-56, U. K., 2014.
- [6] İ. Dinçer, M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, Second Edition, 2nd Ed, Wiley, U. K., 2010.
- [7] A.I. Fernandez, M. Martinez, M. Segarra, I. Martorell, L. F. Cabeza, “Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, 1723–1729, 2010.
- [8] H. Mehling, L. F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications*, Heidelberg, Berlin: Springer, 2008.
- [9] Kato Y. Chemical Energy Conversion Technologies For Efficient Energy Use. In: Paksoy H.Ö. (eds) *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*. NATO Science Series (Mathematics, Physics and Chemistry), vol 234. Springer, Dordrecht, 2007.
- [10] H. H. Öztürk, *Isı Depolama Tekniğı, Söz Kesen Matbaacılık*, Ankara, 2008.
- [11] A. Shukla, A. Sharma, P. H. Biwolé, *Latent Heat-Based Thermal Energy Storage Systems: Materials, Applications, and the Energy Market* (1st ed.). Apple Academic Press, 2020.
- [12] A. Abhat, “Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials,” *Sol. Energy*, 30 (4), 313–332, 1981.

- [13] H. Akeiber, P. Nejat, M. Z. A. Majid, M. A. Wahid, F. Jomehzadeh, I. Z. Famileh, J. K. Calautit, B. R. Hughes, S. A. Zaki, "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 60, Pages 1470-1497, 2016.
- [14] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, Harald Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering*, Volume 23, Issue 3, Pages 251-283, 2003.
- [15] Fleischer A. S., *Thermal energy storage using phase change materials fundamentals and applications*, Springer, PA, USA, 2015.
- [16] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, Harald Mehling, "Free-cooling of buildings with phase change materials," *International Journal of Refrigeration*, Volume 27, Issue 8, Pages 839-849, 2004.
- [17] C. Arkar, S. Medved, "Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system," *Solar Energy*, Volume 81, Issue 9, Pages 1078-1087, 2007.
- [18] M. Iten, S. Liu, A. Shukla, "A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 61, Pages 175-186, 2016.
- [19] B. M. Diaconu, M. Cruceru, "Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings," *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 10, Pages 1759-1772, 2010.
- [20] D.A. Neeper, "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage," *Solar Energy*, Volume 68, Issue 5, Pages 393-403, 2000.
- [21] C. Chen, H. Guo, Y. Liu, H. Yue, C. Wang, "A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard," *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 5, Pages 882-890, 2008.
- [22] F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel, "Optimization of a phase change material wallboard for building use," *Applied Thermal Engineering*, Volume 28, Issues 11-12, Pages 1291-1298, 2008.
- [23] M. Saffari, A. de Gracia, S. Ushak, L. F. Cabeza, "Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model," *Energy and Buildings*, Volume 112, Pages 159-172, 2016.
- [24] L. Karim, F. Barbeon, P. Gegout, A. Bontemps, L. Royon, "New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings," *Energy and Buildings*, Volume 68, Part B, Pages 703-706, 2014.

- [25] E. M. Alawadhi, H. J. Alqallaf, "Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study," *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issues 8–9, Pages 2958-2964, 2011.
- [26] A. Tokuç, T. Başaran, S. C. Yesügey, "An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: The case of a flat roof in Istanbul," *Energy and Buildings*, Volume 102, Pages 91-104, 2015.
- [27] C. Stetiu, H. Feustel, "Phase-change wallboards and mechanical night ventilation in commercial buildings. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory;1996.
- [28] V. Antony Aroul Raj, R. Velraj, "Review on free cooling of buildings using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 9, Pages 2819-2829, 2010.
- [29] ASHRAE. "Handbook of Fundamentals," Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers Inc.; 2001.
- [30] A.H. Mosaffa, C.A. Infante Ferreira, F. Talati, M.A. Rosen, "Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling," *Energy Conversion and Management*, Volume 67, Pages 1-7, 2013.
- [31] R. Barzin, J.J.J. Chen, B. R. Young, M. M. Farid, "Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling," *Applied Energy*, Volume 158, Pages 412-421, 2015.
- [32] Y. Weng, H. Cho, C. Chang, S. Chen, "Heat pipe with PCM for electronic cooling," *Applied Energy*, Volume 88, Issue 5, Pages 1825-1833, 2011.
- [33] S. Takeda, K. Nagano, T. Mochida, K. Shimakura, "Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material," *Solar Energy*, Volume 77, Issue 3, Pages 329-338, 2004.
- [34] K. Nagano, S. Takeda, T. Mochida, K. Shimakura, T. Nakamura, "Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments," *Energy and Buildings*, Volume 38, Issue 5, Pages 436-446, 2006.
- [35] V. Butala, U. Stritih, "Experimental investigation of PCM cold storage," *Energy and Buildings*, Volume 41, Issue 3, Pages 354-359, 2009.
- [36] A. Waqas, S. Kumar, "Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation in buildings in hot and dry climates," *Int J Green Energy*, 8:1-24, 2011.

- [37] C. Arkar, S. Medved, "Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system," *Solar Energy*, Volume 81, Issue 9, Pages 1078-1087, 2007.
- [38] N. Chaiyat, T. Kiatsiriroat, "Energy reduction of building air-conditioner with phase change material in Thailand," *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 4, Pages 175-186, 2014.
- [39] A.H. Mosaffa, L. G. Farshi, "Exergoeconomic and environmental analyses of an air conditioning system using thermal energy storage," *Applied Energy*, Volume 162, Pages 515-526, 2016.
- [40] M.H. Rahdar, A. Emamzadeh, A. Ataei, "A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings," *Applied Thermal Engineering*, Volume 96, Pages 391-399, 2016.
- [41] N. Yüksel, A. Avcı, "Gizli ısı depolamalı kutu tipi iki güneş fırınının deneysel olarak karşılaştırılması," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, Sayı 1, 2013.
- [42] E. Osterman, V. Butala, U. Stritih, "PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings," *Energy and Buildings*, 106: 125-133, 2015.
- [43] B. Nie, X. She, Z. Du, Chunping Xie, Yongliang Li, Zhubing He, Yulong Ding, "System performance and economic assessment of a thermal energy storage based air-conditioning unit for transport applications," *Applied Energy*, Volume 251, 2019.
- [44] M. Navidbakhsh, A. Shirazi, S. Sanaye, "Four E analysis and multi-objective optimization of an ice storage system incorporating PCM as the partial cold storage for air-conditioning applications," *Applied Thermal Engineering*, Volume 58, Issues 1–2, Pages 30-41, 2013.
- [45] X. Sun, Q. Zhang, M. A. Medina, Y. Liu, S. Liao, "A study on the use of phase change materials (PCMs) in combination with a natural cold source for space cooling in telecommunications base stations (TBSs) in China," *Applied Energy*, Volume 117, Pages 95-103, 2014.
- [46] N. Enteria, K. Mizutani, "The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment," *Renew Sustain Energy Rev.* 15:2095–122, 2011.
- [47] M. Ahmadzadehtalatapeh, "An air-conditioning system performance enhancement by using heat pipe based heat recovery technology," *Scientia Iranica*, Volume 20, Issue 2, Pages 329-336, 2013.
- [48] M. Direk, M. S. Mert, F. Yüksel, & A. Keleşoğlu, "Exergetic Investigation of a R1234yf Automotive Air Conditioning System with Internal Heat Exchanger," *International Journal of Thermodynamics*, 21 (2), 103-109, 2018.

- [49] J. Fang, X. Yin, A. Wang, X. Sun, Y. Liu, F. Cao, "Cooling performance enhancement for the automobile transcritical CO₂ air conditioning system with various internal heat exchanger effectiveness," *Applied Thermal Engineering*, Volume 196, 2021.
- [50] E. Hajidavalloo, H. Eghtedari, "Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporatively cooled air condenser," *International Journal of Refrigeration*, Volume 33, Issue 5, Pages 982-988, 2010.
- [51] M. Rasouli, C. J. Simonson, R. W. Besant, "Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions," *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 9, Pages 1376-1385, 2010.
- [52] S. Rahman, S. Issa, Z. Said, M.E.H. Assad, R. Zadeh, Y. Barani, "Performance enhancement of a solar powered air conditioning system using passive techniques and SWCNT /R-407c nano refrigerant," *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 16, 2019.
- [53] S. Yang, Y. Wang, J. Gao, Z. Zhang, Z. Liu, A.G. Olabi, "Performance analysis of a novel cascade absorption refrigeration for low-grade waste heat recovery," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 6, 8350–8363, 2018.
- [54] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B. S. Yilbas, A. Z. Sahin, "Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 74, Pages 26-50, 2017.
- [55] S. M. Eman-Bellah, M.R.A. Ghazy, "Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system," *Solar Energy*, Volume 81, Issue 7, Pages 839-845, 2007.
- [56] S. Shaikh, K. Lafdi, K. Hallinan, "Carbon nanoadditives to enhance latent energy storage of phase change materials," *J Appl Phys* 103, 2008.
- [57] J. Wang, H. Xie, Z. Xin, "Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes," *Thermochimica Acta*, Volume 488, Issues 1–2, Pages 39-42, 2009.
- [58] A. Lazaro, P. Dolado, J. M. Marín, B. Zalba, "PCM–air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes," *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 3, Pages 439-443, 2009.
- [59] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, "Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations," *Renewable Energy*, 31(13):2025-2041, 2016.
- [60] A. Erek, Z. İlken, M.A. Acar, "Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube," *Int. J. Energy Res.*, 29: 283-301, 2005.

- [61] Z. Gong, A. S. Mujumdar, "Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a Shell and tube latent heat energy storage exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 17(4): 583–591, 1997.
- [62] H. E. S. Fath, "Technical assessment of solar thermal energy storage technologies," *Renewable Energy*, 14(1-4): 35-40, 1998.
- [63] P. Dolado, A. Lazaro, J. M. Marin, B. Zalba, "Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation," *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 4, Pages 1890-1907, 2011.
- [64] RubiTherm Technologies GmbH,
<https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>,
(Erişim Tarihi: 09.10.2021)
- [65] R. Zeinelabdein, S. Omer, G. Gan, "Experimental performance of latent thermal energy storage for sustainable cooling of buildings in hot-arid regions," *Energy and Buildings*, Volume 186, Pages 169-185, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Darüşşafaka'da tamamladı. 2014 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünden 2019 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl itibariyle Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2022 yılından beri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

F. Talu, M. S. Mert, H. H. Mert, "İklimlendirme Sistemlerinde Enerji Tasarrufu Amacıyla Faz Değiştiren Maddelerin Kullanımının İncelenmesi," 4th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences, Ankara, Türkiye, 24-26 Kasım, 2021.(pp. 318)