KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK PANELLERİN HAVA VE FAZ DEĞİŞTİREN MADDE DESTEKLİ SOĞUTULMASI

DOKTORA TEZİ

Oğuz Kaan YAĞCI

NİSAN 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK PANELLERİN HAVA VE FAZ DEĞİŞTİREN MADDE DESTEKLİ SOĞUTULMASI

Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 11 / 04 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mete AVCI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Fotovoltaik Panellerin Hava ve Faz Değiştiren Madde Destekli Soğutulması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu doktora tezi kapsamında fotovoltaik panellerde sıcaklık artışına bağlı verim düşüşünün azaltılması ve elektriksel çıktıların iyileştirilmesine yönelik hava ve faz değiştiren madde destekli özgün PV-FDM tasarımları ortaya konmuş ve sistemlerin performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler farklı operasyonel koşullar için yürütülmüş ve incelenen sistemler için önemli performans çıktıları elde edilmiştir.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mete AVCI’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN’a, Sayın Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’e ve Sayın Prof. Dr. Burak MARKAL’a teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, çalışmalarım sırasında desteğini hep yanımda hissettiğim ve birlikte akademik çalışmalar yapma şansına eriştiğim eşim Arş. Gör. Esra YAĞCI’ya en kalbi duygularımla şükranlarımı sunarım.

Bu doktora tez çalışması TÜBİTAK tarafından 221M041 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK’a verdiği maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, varlığıyla hayatıma neşe katan oğlum Selçuk Kerim YAĞCI’ya ithaf ediyorum.

Oğuz Kaan YAĞCI

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Fotovoltaik Panellerin Hava ve Faz Değiştiren Madde Destekli Soğutulması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Mete AVCI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11/04/2025

Oğuz Kaan YAĞCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VIII
SUMMARY IX
ŞEKİLLER DİZİNİ X
TABLOLAR DİZİNİ XVII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XVIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Artan Enerji İhtiyacı ve Enerji Arzının Önemi 1
1.2. Yenilenebilir Enerji Kullanımının Önemi ve Güneş Enerjisinin Yeri 2
1.3. Fotovoltaik Teknolojisi ve Çalışma Prensibi 4
1.4. PV Panellerin Elektriksel Karakteristikleri 6
1.4.1. Kısa Devre Akımı ve Açık Devre Gerilimi 7
1.4.2. Maksimum Güç Noktası ve Doluluk Faktörü 7
1.4.3. Elektriksel Verim 8
1.5. Ortam Şartlarının PV Hücre Verimliliği Üzerindeki Etkileri 8
1.5.1. Işınım Şiddeti ve Nem Etkisi 9
1.5.2. Açı ve Gölge Etkisi 10
1.5.3. Sıcaklık Etkisi 11
1.6. PV Paneller Üzerinde Uygulanan Termal Yönetim Metotları 13
1.6.1. Aktif soğutma metotları 13
1.6.2. Pasif Soğutma Metotları 17
1.6.3. Faz Değiştiren Madde ile Pasif Soğutma 20
1.7. Literatür Özeti 24
1.7.1. Konvansiyonel PV- FDM Sistem Tasarımı Üzerine Yapılan Çalışmalar 24
1.7.2. PV-FDM Sistemleri İçin Farklı Isı Alıcı Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar 30
1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı 39
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 41

2.1. Test Bölgelerinin (PV-FDM sistemlerin) Tasarımı ve İmalatı 41
2.2. Isı alıcısında Kullanılan Faz Değiştiren Madde 47
2.3. Deneysel Parametreler 49
2.3.1. Yerleşim Açıları 49
2.4. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi 51
2.4.1. Yapay Işık Kaynağı ve Isıl Yükün Uygulanması 53
2.4.2. Piranometre (Işınım Şiddetinin Ölçümü) 57
2.4.3. Veri Derleme Cihazı (Sıcaklık Ölçümü) 58
2.4.4. DC Elektronik Yük Cihazı (Elektriksel Güç Ölçümü) 59
2.5. Deney Prosedürü 61
2.6. Deneysel Verilerin İşlenmesi ve Dikkate Alınan Performans Çıktıları 61
2.6.1. PV Panel ve FDM Sıcaklığı 62
2.6.2. Toplam Erime ve Katılaşma Süreleri 62
2.6.3. Termal Regülasyon Süresi 63
2.6.4. Anlık Maksimum Elektriksel Güç 63
2.6.5. Toplam Elektrik Enerjisi Üretimi 64
2.7. Belirsizlik Analizi 64
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 66
3.1. Isı Alıcısız PV Sisteminin (Durum 1) Isıl ve Elektriksel Davranışının Belirlenmesi (Referans Durum) 66
3.2. Konvansiyonel FDM destekli Isı Alıcısıyla Entegreli PV Sisteminin (Durum 2) Isıl ve Elektriksel Davranışı 69
3.2.1. Durum 2'ye Ait Ortalama PV Panel Sıcaklığının Analizi 70
3.2.2. Durum 2 İçin Güç Çıktılarının Analizi 73
3.2.3. Durum 2 İçin Yerel Sıcaklık Dağılımının ve Erime Davranışının Analizi 76
3.2.4. Durum 2 İçin FDM'nin Katılaşma (Deşarj) Sürecinin İncelenmesi 84
3.3. FDM ve Hava Destekli Isı Alıcılarıyla Entegre edilmiş PV-FDM Sistemlerinin Isıl ve Elektriksel Davranışı 95
3.3.1. Isıl yük altında, FDM ve Hava Destekli Sistemlerin PV Sıcaklık Analizi 95
3.3.2. FDM ve Hava Destekli Sistemlere Ait Yerel Sıcaklıkların ve Erime Davranışının İncelenmesi 98
3.3.3. FDM ve Hava Destekli PV Sistemlerin Elektriksel Güç Analizi 120
3.3.4. FDM ve Hava destekli Sistemlerin Deşarj Sürecinin İncelenmesi 125

4. SONUÇLAR 148
5. ÖNERİLER.....152
6. KAYNAKLAR 153
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

FOTOVOLTAİK PANELLERİN HAVA VE FAZ DEĞİŞTİREN MADDE DESTEKLİ SOĞUTULMASI

Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mete AVCI
2025, 160 Sayfa

Faz değiştiren madde (FDM) destekli ısı alıcılar, fotovoltaik (PV) paneller üzerinde pasif sıcaklık kontrolü (termal regülasyon) sağlayarak sıcaklık kaynaklı güç kayıplarını önlemek için yenilikçi ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, PV panellerin FDM destekli soğutulma süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik FDM ve hava destekli özgün ısı alıcı tasarımları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen ısı alıcılarında, eş zamanlı pasif hava akışı ve FDM destekli yenilikçi bir yaklaşım sunularak konvansiyonel PV-FDM sistemlerine ilişkin literatürde rapor edilen bazı sınırlamalara çözüm üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, bir referans PV, bir konvansiyonel PV-FDM ve üç FDM-hava destekli olmak üzere beş farklı sistem durumu ele alınmıştır. Deneyler laboratuvar ortamında 1000 W/m² - 25°C ve 750 W/m² - 17 °C sabit ışınım - ortam sıcaklığı ve üç farklı eğim açısı (30°, 45°, 90°) altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, FDM ve hava destekli ısı alıcı tasarımının termal regülasyon süresi, regülasyon sonrası sıcaklık artışı, elektrik üretimi ve katılaşma süresi üzerinde eş zamanlı önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda termal regülasyon süresinde %46 uzama, maksimum PV sıcaklığında 11°C azalma, katılaşma süresinde %36,5 kısalma, toplam elektrik üretiminde ise %4,4'e varan iyileşmeler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Faz değiştiren madde, Fotovoltaik soğutma, PV-FDM, Isı alıcı tasarımı, Termal regülasyon, Deneysel değerlendirme

PhD. Thesis

SUMMARY

AIRFLOW AND PHASE CHANGE MATERIAL ASSISTED COOLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS

Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Mete AVCI
2025, 160 Pages

Phase change material (PCM) based heat sinks offer an innovative and effective solution to prevent temperature induced losses in photovoltaic (PV) panel efficiencies by providing passive temperature control (thermal regulation). In this thesis, an experimental study was conducted on novel PCM and air assisted heat sink desings, aimed at improving PCM assisted thermal regulation processes in PV panels. The developed heat sinks introduce a novel approach by combining simultaneous passive airflow and PCM assistance, addressing certain limitations reported in the literature regarding conventional PV-PCM systems. In the study, five system configurations are considered including, a reference PV, a conventional PV-PCM and three PV-PCM with air. Experiments were conducted in a laboratory setting under constant irradiation and ambient temperatures of 1000 W/m² - 25°C and 750 W/m² - 17°C, at three different orientations of 30°, 45° and 90°. The results demonstrate that the PCM and air based heat sink design provides simultaneous significant improvements in thermal regulation duration, post-regulation temperature rise, electricity generation, and solidification time. The experiments revealed enhancements up to 46% in thermal regulation duration, 11°C reduction in maximum PV temperature, 36.5% decrease in solidification time, and 4.4% increase in total electricity generation.

Key Words: Photovoltaic systems, Phase change materials, Photovoltaic cooling, PV-PCM, Heat sink design, Thermal regulation, Experimental evaluation

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Yıllara göre toplam enerji ve elektrik enerjisi arz değerleri (URL-2, 2024) 2

Şekil 2. Yıllara göre enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı (URL-2, 2024) 3

Şekil 3. Tipik bir solar hücrenin şematik diyagramı (Sarkar ve Rahman, 2018) 5

Şekil 4. Farklı malzemelerden üretilmiş PV panel türleri 6

Şekil 5. Çalışma kapsamında kullanılan PV panelden 1000 W/m^2 sabit ışınım altında elde edilmiş I-V ve P-V eğrileri 6

Şekil 6. Bir polikristal hücrenin I-V eğrileri ve veriminde ışınım şiddetine bağlı değişim (Chaibi vd., 2019) (a), PV hücre verimi (Hamou vd., 2014) 9

Şekil 7. Örnek bir PV panel için verimin yerleşim açısı ve aylara göre değişimi (Mondol vd., 2007) (a), gölgenin I-V eğri üzerindeki etkisi (Bayrak vd., 2017) (b) 10

Şekil 8. Monokristalin PV panele ait I-V ve P-V eğrilerinin sıcaklıkla değişimi. 11

Şekil 9. Isı alıcısız standart bir PV panel üzerinde ısı transferi (Khanna vd., 2018a) 12

Şekil 10. PV panellere sıklıkla uygulanan termal yönetim metotları 13

Şekil 11. Kanaldan hava akışıyla (Mazón-Hernández vd., 2013) (a), su akışıyla PV soğutma, (Alzaabi vd., 2014) (b) 14

Şekil 12. PV hücrelerin jet akışıyla soğutulması (Bahaidarah, 2016) 15

Şekil 13. Su spreyi (Yesildal vd., 2022) ve su filmi (Mah vd., 2019) ile PV soğutma 15

Şekil 14. PV evaporatör modülünün kesiti (Keliang vd., 2009) 16

Şekil 15. PV panellerin TE modül ile soğutulmaları (Fabbri & Greppi, 2021) 17

Şekil 16. Kanatçık destekli doğal taşınımla PV soğutma (Hernandez-Perez vd., 2020) 17

Şekil 17. PV panellerin suya daldırılarak soğutulmaları (Sivakumar vd., 2021) 18

Şekil 18. Isı borusu ile soğutulan PV panel (Gao vd., 2023) 19

Şekil 19. Radyatif olarak soğutulan PV panel (Li vd., 2022) 20

Şekil 20. Parafin için entalpi-sıcaklık grafiği, yüksek saflık için (a), düşük saflık için (b) 20

Şekil 21. Faz değiştiren madde türleri (Sharma vd., 2009) 22

Şekil 22. PV paneller için FDM destekli ısı alıcı uygulamasında meydana gelen ısı transfer süreçleri....23
Şekil 23. Referans PV (Durum 1) ve konvansiyonel PV-FDM (Durum 2) sistemlerinin şematik görüntüsü ve geometrik karakteristikleri....42
Şekil 24. Özgün hava ve FDM destekli ısı alıcılı PV- FDM sistemlerinin şematik görüntüsü ve geometrik karakteristikleri, Durum 3: 6 kanallı, Durum 4: 10 kanallı, Durum 5: 14 kanallı....43
Şekil 25. (a) PV panel ve üretim süreci sonrası FDM ve hava destekli ısı alıcılarının fotoğrafları, (b) 6 kanallı (Durum 3), (c) 10 kanallı (Durum 4), 14 kanallı (Durum 5) 45
Şekil 26. PV-FDM sistemler üzerinde yapılan özgün düzenlemenin (hava desteğinin) FDM sıcaklığına etkisinin temsili gösterimi 46
Şekil 27. Test bölgesindeki termoelemanlara ait yerleşim planı 47
Şekil 28. Deney düzeneğinin fotoğrafı ve şematik resmi....52
Şekil 29. Yapay ışık kaynağı ve PV-FDM sisteminin kabin içerisindeki yerleşimi (a), yapay ışık kaynağının kesit görüntüsü (b) 55
Şekil 30. Işık kaynağındaki lambaların çalışma düzeni (a), çalışma düzenine karşı elde edilen ışınım şiddet haritası (b)....56
Şekil 31. Lamba güç kontrol devresine ait görsel (a), anlık ışınım şiddeti grafiği (b)....57
Şekil 32. Çalışmada kullanılan piranometre ve veri derleyicisi....58
Şekil 33. Çalışmada kullanılan veri derleme cihazı ve çoklayıcı modül....59
Şekil 34. Çalışmada kullanılan DC elektronik yük cihazı (Rigol/DL3021a) 60
Şekil 35. Isıl yük altında ısı alıcısız PV panel (Durum 1) için ortalama PV panel sıcaklığı ve maksimum gücün zamanla değişimi, (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C)....67
Şekil 36. Isıl yük altında ısı alıcısız PV panel (Durum 1) için ortalama PV panel sıcaklığı ve maksimum gücün zamanla değişimi, (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)....67
Şekil 37. PV sıcaklığındaki meydana gelen artışın, ölçülen (a) I-V ve (b) P-V değerleri üzerindeki etkileri (Işınım=1000 W/m^2) 68
Şekil 38. PV sıcaklığındaki meydana gelen artışın, ölçülen (a) I-V ve (b) P-V değerleri üzerindeki etkileri (Işınım=750 W/m^2) 68
Şekil 39. Durum 2'ye ait ortalama PV sıcaklığının zamanla değişimi (a) 30°, (b) 45°, (c) 90°, (d) açısal karşılaştırma (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C) 71
Şekil 40. Durum 2'ye ait ortalama PV sıcaklığının zamanla değişimi (a) 30°, (b) 45°, (c) 90°, (d) açısal karşılaştırma (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)....72

Şekil 41. Durum 2 için farklı yerleşim açıları altında anlık maksimum güç çıktıları ve elektrik enerji kazancının değişimi (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C).....74
Şekil 42. Durum 2 için farklı yerleşim açıları altında anlık maksimum güç çıktıları ve elektrik enerji kazancının değişimi (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C).....75
Şekil 43. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 30°).....77
Şekil 44. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 45°).....78
Şekil 45. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 90°).....79
Şekil 46. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C, açı = 45°).....80
Şekil 47. Durum 2 için eş sıcaklık eğrileri ve katı-sıvı (erime) ara yüzünün ilerleyişi.....83
Şekil 48. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....88
Şekil 49. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....88
Şekil 50. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....89
Şekil 51. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....89
Şekil 52. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....90
Şekil 53. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....90
Şekil 54. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....91
Şekil 55. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....91
Şekil 56. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C).....92
Şekil 57. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C).....92
Şekil 58. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C).....93

Şekil 59. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C) 93

Şekil 60. Durum 2'ye ait deşarj boyunca farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri 94

Şekil 61. Konvansiyonel ve özgün ısı alıcılı PV-FDM sistemlerine ait zaman bağımlı ortalama PV sıcaklıkları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)..... 97

Şekil 62. Konvansiyonel ve özgün ısı alıcılı PV-FDM sistemlerine ait zaman bağımlı ortalama PV sıcaklıkları (Işınım = 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)..... 98

Şekil 63. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°) 104

Şekil 64. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°) 105

Şekil 65. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°) 106

Şekil 66. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°) 107

Şekil 67. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°) 108

Şekil 68. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°) 109

Şekil 69. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°) 110

Şekil 70. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°) 111

Şekil 71. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°) 112

Şekil 72. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C) 113

Şekil 73. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C) 114

Şekil 74. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C) 115

Şekil 75. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (30° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)..... 116

Şekil 76. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (45° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)..... 117

Şekil 77. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (90° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C).....118
Şekil 78. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (45° yerleşim açışı, C ekseni, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C).....119
Şekil 79. İncelenen tüm PV-FDM sistemlere ait anlık maksimum güç ve elektriksel enerji kazancındaki değişim.....122
Şekil 80. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....129
Şekil 81. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....129
Şekil 82. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....130
Şekil 83. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....130
Şekil 84. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....131
Şekil 85. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....131
Şekil 86. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, Tortam = 25 °C).....132
Şekil 87. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, Tortam = 25 °C).....132
Şekil 88. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....133
Şekil 89. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....133
Şekil 90. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....134
Şekil 91. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....134
Şekil 92. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....135
Şekil 93. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....135
Şekil 94. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....136

Şekil 95. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....136
Şekil 96. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....137
Şekil 97. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....137
Şekil 98. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....138
Şekil 99. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....138
Şekil 100. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C).....139
Şekil 101. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....139
Şekil 102. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....140
Şekil 103. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C).....140
Şekil 104. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, Tortam = 25 °C).....141
Şekil 105. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....141
Şekil 106. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C).....142
Şekil 107. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, Tortam = 17 °C).....142
Şekil 108. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....143
Şekil 109. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, Tortam = 17 °C).....143
Şekil 110. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....144
Şekil 111. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, Tortam = 17 °C).....144
Şekil 112. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....145
Şekil 113. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....145

Şekil 114. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....146
Şekil 115. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C).....146
Şekil 116. Deşarj süresi boyunca farklı yerleşim açıları altında ortalama FDM sıcaklığındaki değişim. 147

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. FDM katkılı ısı alıcılarına ait geometrik ölçüler 44

Tablo 2. RT-35HC'nin termofiziksel özellikleri.....48

Tablo 3. Solar simülatörlerin sınıflandırılması 53

Tablo 4. Kipp&Zonen CMP11 piranometrenin teknik özellikleri 58

Tablo 5. Rigol M300 veri derleme cihazı ve MC3120 çoklayıcı modül teknik özellikleri.....59

Tablo 6. Rigol DL3021a DC elektronik yük cihazına ait teknik özellikleri.....60

Tablo 7. Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm ekipmanlarına ait belirsizlikler.....65

Tablo 8. Isı alıcısız PV panelden (Durum 1) elde edilen referans veriler 69

Tablo 9. Durum 2 için tespit edilen termal regülasyon süreleri.....72

Tablo 10. Farklı ısı alıcılarıyla, Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında sağlanan maksimum azalma ve termal regülasyon süreleri (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C).....97

Tablo 11. Farklı ısı alıcılarıyla, Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında sağlanan maksimum azalma ve termal regülasyon süreleri (Işınım = 750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C).....98

Tablo 12. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (30° yerleşim açısı).....123

Tablo 13. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (45° yerleşim açısı).....123

Tablo 14. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (90° yerleşim açısı).....124

Tablo 15. 750 W/m^2 ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (45° yerleşim açısı).....124

Tablo 16. Tüm PV-FDM sistemler için toplam katılaşma süreleri (T_{ortam} = 25 °C) 128

Tablo 17. Tüm PV-FDM sistemler için toplam katılaşma süreleri (T_{ortam} = 17 °C) 128

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

P : Elektriksel güç (W)

V : Elektriksel gerilim (V)

I : Elektriksel akım (A)

I_{SC} : Kapalı devre akımı (A)

V_{OC} : Açık devre gerilimi (V)

I_{MPP} : Maksimum güç nokta akımı (A)

V_{MPP} : Maksimum güç nokta gerilimi (A)

P_{MAKS} : Maksimum elektriksel güç (W)

P_{TOPLAM} : Toplam elektriksel güç (Wh)

η : Elektriksel verim

β : Sıcaklık katsayısı

FF : Doluluk faktörü

G : Işınım şiddeti (W/m^2)

t : Süre (dk.)

T : Sıcaklık (°C)

T_{ortam} : Ortam sıcaklığı (°C)

A_{panel} : PV panel yüzey alanı (m^2)

PV : Fotovoltaik

FDM : Faz değiştiren madde

PWM : Darbe genişlik modülasyonu

IEA : Uluslararası Enerji Ajansı

IRENA : Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı

1. GENEL BİLGİLER

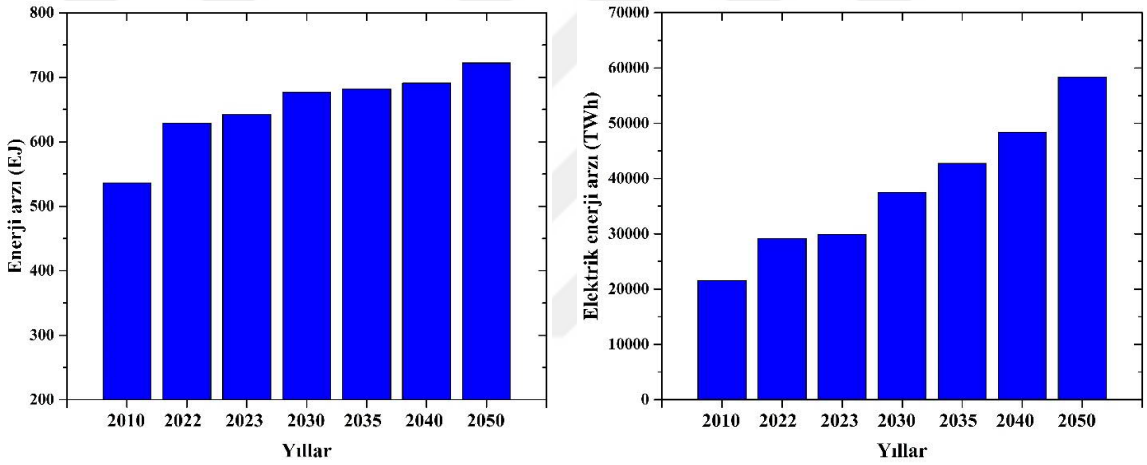
Enerji, modern hayatın temel taşlarından biri olup ekonomik büyümeden sosyal refaha kadar çok geniş bir yelpazede insan hayatını etkilemektedir (Gozgor vd., 2018). Tarih boyunca toplumlar, enerji kaynaklarına erişimlerini artırarak yaşam standartlarını yükseltmiş ve teknolojik gelişmeleri hızlandırmıştır (Bhattacharyya, 2012). Enerji, sanayiden ulaşım sektörüne, sağlık hizmetlerinden iletişim teknolojilerine kadar hemen her alanda kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle günümüzde, küresel nüfusun artması ve ekonomik faaliyetlerin genişlemesiyle enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Bu artış, hem enerji güvenliği hem de sürdürülebilirlik açısından bazı zorlukları beraberinde getirmektedir (Bekhet vd., 2017). Buna karşın, enerji kaynaklarının doğru ve sürdürülebilir yönetilememesi durumunda ise çevresel sorunlar, ekonomik istikrarsızlıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, enerji kaynaklarının verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi, gelecekte de toplumsal refahı ve hayat kalitesini güvence altına almak için kritik bir öneme sahiptir.

1.1. Artan Enerji İhtiyacı ve Enerji Arzının Önemi

Dünya nüfusu, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte hızla artış göstermiş, buna bağlı olarak da küresel enerji talebi önemli ölçüde yükselmiştir. Birleşmiş Milletler verilerine göre, 2024 yılı itibarıyla dünya nüfusu yaklaşık 8,2 milyar kişiye ulaşmış olup, her geçen yıl ortalama %1 civarında bir artış gözlemlenmektedir (URL-1, 2024). Bu artış, enerjiye olan ihtiyacın da katlanarak büyümesine yol açmaktadır. Bu artışın incelenmesi hususunda Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) sunduğu raporlar araştırmacılar için rehber niteliği taşımakta olup enerji sektörünün geçmiş, güncel ve gelecekteki muhtemel durumu hakkında bilgi vermektedir. İlgili raporlar detaylıca incelendiğinde (URL-2, 2024) küresel enerji ihtiyacı ve arzında istikrarlı artışlar görülmektedir. Bu raporlardan elde edilen Şekil 1a'dan görüldüğü üzere enerji arzı 2010 yılından bu yana yaklaşık %20 artarak 642 EJ'ye (exajoule) ulaşmış olup bu değerin 2050'ye kadar %12 daha artacağı ön görülmektedir.

IEA Dünya Enerji Görünümü raporları, elektrik enerjisi yönünden daha dramatik bir tablo ortaya koymaktadır (Şekil 1b). IEA'ya göre, küresel elektrik enerjisi arzı 2010 yılından bu yana yaklaşık %39 artarak 29863 TWh değerine ulaşmıştır. 2050 yılı itibariyle ise bu

değerin %95 gibi ciddi bir artış göstereceği ön görülmektedir. Fakat ilgili raporlar, enerji arzının sağlanmasında uzun yıllar fosil yakıtların (petrol, kömür, doğal gaz) kullanıldığını da açıkça ortaya koymaktadır. IEA'ya göre güncel süreçte enerji tüketiminin yaklaşık %80'i kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. 2023 yılında fosil yakıtlar, dünya elektrik üretiminin %60'ında kullanılmıştır (URL-3, 2024). Ancak, fosil yakıtların sınırlı doğası, artan maliyetler ve çevresel etkileri, bu kaynakların sürdürülebilir bir seçenek olmadığını ortaya koymaktadır. Enerji üretiminde fosil yakıtlara dayalı sistemler, sera gazı salınımlarına yol açmakta ve küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. Bu bağlamda, enerji arzında yenilenebilir ve daha temiz enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz hale gelmiştir.

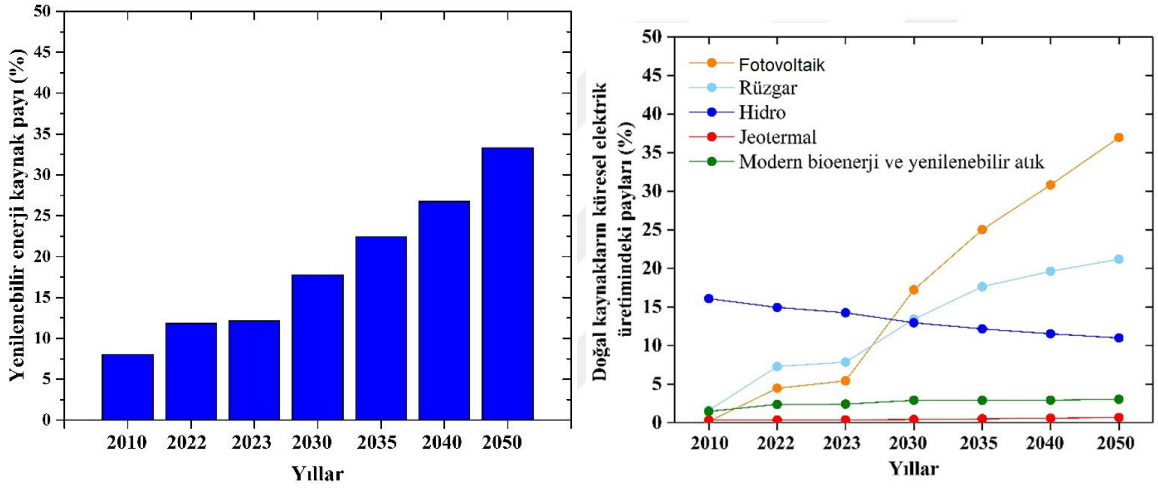


Şekil 1. Yıllara göre toplam enerji ve elektrik enerjisi arz değerleri (URL-2, 2024)

1.2. Yenilenebilir Enerji Kullanımının Önemi ve Güneş Enerjisinin Yeri

Küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç, çevresel sorunların giderek büyümesi ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda daha da önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenebilen enerji kaynakları olup fosil yakıtlara kıyasla çevreye olan zararlı etkileri son derece sınırlıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biokütle ve jeotermal enerji öne çıkmaktadır. 2024 yılı Dünya Enerji Görünümü verilerine göre, dünya genelinde elektrik üretiminde yenilenebilir enerjinin payı %29,5 olarak kaydedilmiştir. Bu oran, 2010 yılında %19,8 seviyesinde olup aradan geçen yıllarda yenilenebilir enerji yatırımlarının artmasıyla birlikte kayda değer bir büyüme göstermiştir

(URL-2, 2024). Bu büyüme, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi teknolojilerindeki maliyet düşüşleri ve teknolojik gelişmeler sayesinde hızlanmıştır. İlgili raporlarda enerji politikalarına ait veriler, Şekil 2'de görüldüğü üzere bu oranların önümüzdeki yıllarda daha da artacağını göstermektedir. Bu bağlamda, Şekil 2'de yer alan gelecek yıllara ait verilerin, IEA Dünya Enerji Görünümü-enerji politikaları verileri üzerinden oluşturulduğu ifade edilmelidir (URL-2, 2024). Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan önemine katkıda bulunan faktörlerin başında iklim değişikliği ve karbon salınımını azaltma hedefleri gelmektedir. Bu hedeflere ulaşılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının hızla yaygınlaşması bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2. Yıllara göre enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı (URL-2, 2024)

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisiyse en yaygın kullanılan ve potansiyeli en yüksek olan kaynaklardan biri olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi teknolojileri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla geliştirilmiş olup hem bireysel hem de ticari uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Güneş enerjisinin en yaygın kullanımı fotovoltaik (PV) sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Fotovoltaik sistemler, yarı iletken malzemelerden yapılmış fotovoltaik hücreler aracılığıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu teknolojinin avantajları arasında, düşük işletme maliyetleri, çevreye zararlı emisyonlarının olmaması ve kurulum maliyetlerinin giderek düşmesidir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansının (IRENA) yayınladığı verilere göre 2023 yılında dünya genelinde kurulu güneş enerjisi kapasitesinin 1,1 TW seviyesini aştığı görülmektedir (URL-4, 2024). Bu değer,

dünya genelindeki toplam elektrik üretiminde güneş enerjisinin payının %4,5 civarına ulaştığını göstermektedir.

Türkiye ise yıllık ortalama 2.741 saat güneşlenme süresi ve 1,527 kWh/m² güneş enerjisi potansiyeli ile önemli bir güneş enerjisi kaynağına sahiptir (URL-5, 2024). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2024 verilerine göre Türkiye de güneş enerjisi kurulu elektrik gücünün %7,5'ini teşkil etmektedir (URL-6, 2024).

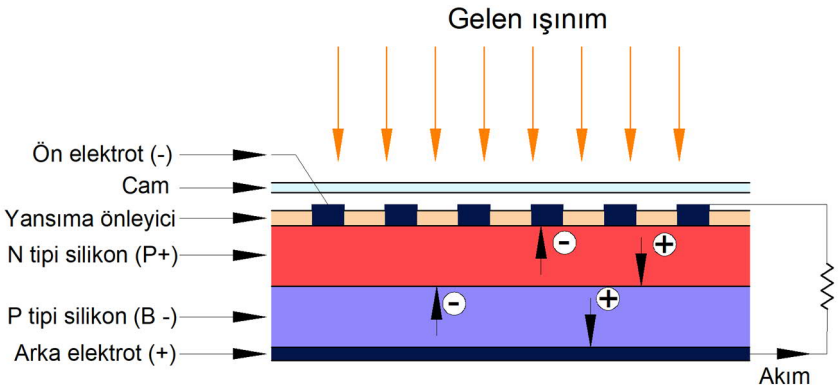
Fotovoltaik teknolojisinin yaygın kullanım alanları arasında, kentsel alanlarda bina çatılarında kurulan küçük ölçekli sistemlerden geniş tarımsal arazilere kurulan büyük güneş tarlalarına ve uzay araçlarına kadar çeşitli uygulamalar yer almaktadır. Bu teknolojinin temel avantajı, hem bireysel tüketiciler için enerji bağımsızlığı sağlaması hem de şebekeye enerji sağlayarak büyük ölçekli elektrik üretimi gerçekleştirebilmesidir. Günümüzde birçok ülke, güneş enerjisini, ifade edilen bu avantajları neticesinde ulusal enerji stratejilerinin önemli bir parçası haline getirmiştir.

1.3. Fotovoltaik Teknolojisi ve Çalışma Prensibi

Fotovoltaik (PV) teknolojisi, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir teknolojidir. Bu dönüşüm, "fotovoltaik etki" olarak adlandırılan fiziksel bir süreçle gerçekleşir. Fotovoltaik sistemler, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak enerji sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Fotovoltaik hücreler ve paneller, konutlardan endüstriyel tesislere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

PV teknolojisi ile elektrik enerjisi üretimi, ışığın (fotonların) yarı iletken malzemeler üzerine düşmesiyle başlamaktadır. Fotonlar, yarı iletken malzemeye çarptığında malzeme içindeki elektronları serbest bırakır. Bu serbest kalan elektronlar hücrenin içindeki elektrik alanı tarafından yönlendirilir ve bu hareket devre üzerinden bir elektrik akımı oluşturur. Bu akım başlangıçta doğru akım (DC) olarak üretilir (Bagheritabar vd., 2018). Bu olgu, fotovoltaik etki olarak bilinmekte olup Şekil 3'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu olguyla üretilen doğru akımın alternatif forma (AC) dönüştürülerek şebekeye veya doğrudan kullanıma sunulabilmesi için ek ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

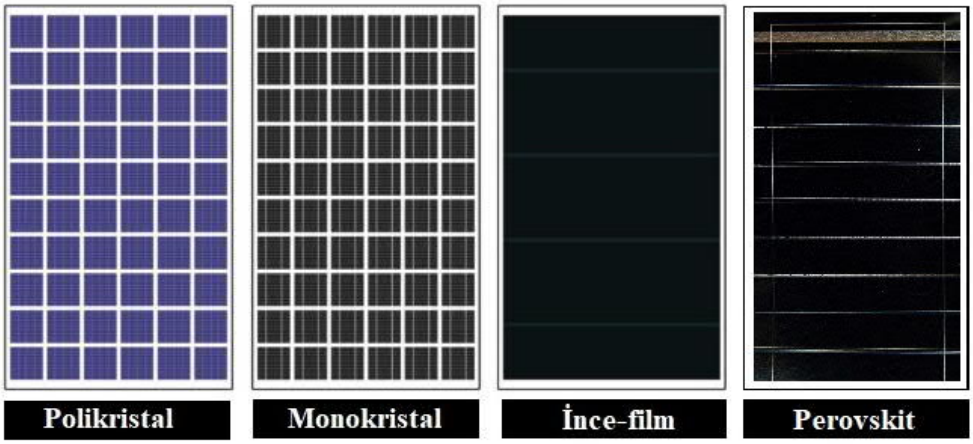
Fotovoltaik hücrelerin ana yapı malzemesi genellikle silikon yarı iletkenidir. Bu yarı iletkenlerin üretiminde, farklı teknolojilerde çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Temel olarak kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda sıralanmış, ilgili malzemelerle üretilmiş PV panellere ait görsellere ise Şekil 4'te yer verilmiştir.



Şekil 3. Tipik bir solar hücrenin şematik diyagramı (Sarkar ve Rahman, 2018)

- Monokristalin silikon: Tek kristal yapıdaki yüksek saflıkta silikondan üretilen bu hücreler, piyasadaki en yüksek verimliliğe sahip olup, üretim maliyetleri de oldukça yüksektir. Verimlilik oranı genellikle %20-22 arasında değişmektedir.
- Polikristalin silikon: Daha düşük saflıkta birden fazla silikon kristali içeren bu hücreler, daha düşük maliyetli olup verimlilik açısından monokristalin hücrelerin gerisindedir (%15-17).
- İnce film hücreler: Kadmiyum tellürür (CdTe) veya bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) gibi malzemelerle üretilen bu hücreler daha hafif ve esnek olup, düşük maliyetlidir. Ancak verimlilikleri diğer türlere kıyasla daha düşüktür (%10-12).
- Perovskit hücreler: Daha yeni bir teknoloji olup, maliyet açısından avantaj sağlarken yüksek verimlilik sunmayı hedeflemektedir. Bu tip hücrelerin ticari olarak yaygınlaşma süreci devam etmektedir.

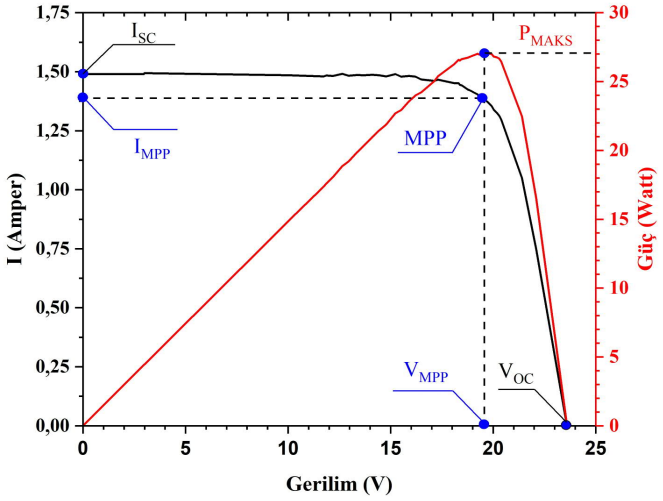
Fotovoltaik hücreler, farklı sayılarda seri veya paralel bağlanabilmektedir. Bunun sonucunda ihtiyaca uygun olarak farklı gerilim ve akım değerlerine sahip paneller üretilebilmektedir. PV paneller ise benzer şekilde, birbirlerine seri veya paralel bağlanabilmekte ve solar sistemden elde edilen güç değeri düzenlenebilmektedir. Bu özellikleri, fotovoltaik panellerin çok geniş alanlarda kullanılabilmelerine imkân tanımaktadır.



Şekil 4. Farklı malzemelerden üretilmiş PV panel türleri (Alkhalidi & Dulaimi, 2018)

1.4. PV Panellerin Elektriksel Karakteristikleri

Fotovoltaik (PV) hücrelerin elektriksel karakteristiği, hücrelerin dış koşullara ve içyapılarına bağlı olarak değişen davranışlarını ifade etmektedir. PV hücrelerinin elektriksel davranışı, genellikle Şekil 5'de örnek olarak sunulan akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileriyle birlikte ifade edilmektedir. Bu eğriler, sabit ışınım altında PV panele değişen elektriksel yük (direnç) uygulanarak elde edilmekte olup hücrelerin herhangi bir ortam şartı altındaki elektriksel performansını ortaya koymaktadır. Eğriler üzerinde yer alan karakteristik noktalar ve diğer önemli parametreler ayrı başlıklar altında açıklanmıştır.



Şekil 5. Çalışma kapsamında kullanılan PV panelden 1000 W/m^2 sabit ışınım altında elde edilmiş I-V ve P-V eğrileri

1.4.1. Kısa Devre Akımı ve Açık Devre Gerilimi

Kısa devre akımı (I_{SC}), panel üzerine gelen belirli bir ışınıma karşılık, panelin +,- terminallerinin doğrudan birbirine bağlı, diğer bir ifadeyle kısa devre pozisyonundayken üretilen maksimum akımdır. İlgili nokta Şekil 5'de verilen I-V eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Bu noktada terminaller arası gerilim değeri sıfır olup akım ise maksimum değerindedir. Ayrıca kısa devre akımının değeri, panel üzerine düşen ışınım şiddetiyle doğru orantılıdır. Açık devre gerilimi ise (V_{OC}), panel açık devre durumundayken terminaller arası oluşan gerilimdir. Bu noktada gerilim, Şekil 5'de de gösterildiği üzere en yüksek değerinde iken akım değeri sıfır olup ilgili değer, ışınım şiddetine, yarı iletken malzemenin bant aralığına ve hücre sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir (Chaibi vd., 2019).

1.4.2. Maksimum Güç Noktası ve Doluluk Faktörü

Maksimum güç noktası (MPP) temel olarak I-V eğrisi üzerinde, bir PV panelin belirli bir ışınım şiddeti ve hücre sıcaklığı altında maksimum elektrik gücünü ürettiği noktayı ifade etmektedir. Bu nokta, ısı alıcı uygulamaları gibi PV panel verimliliğin korunmasına odaklanılan çalışmalarda özellikle dikkate alınmaktadır.

Şekil 5'de verilen P-V eğrisinden de görüldüğü üzere, sabit ışınım altında bir PV panelden elde edilen güç değişkenlik gösterebilmektedir. İlgili değer, panele değişken elektriksel yük (direnç) uygulanarak yapılan I-V taraması üzerinden edilebilmektedir. Herhangi bir yük değeri noktasında güç çıktısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır:

$$P = I \times V \tag{1}$$

Burada P panele ait gücü, I ve V ise ilgili çalışma noktasındaki akım ve gerilim değerlerini temsil etmektedir. En yüksek güç değeri ise I-V eğrisi üzerinden aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir:

$$P_{MAKS} = maks(I \times V) \tag{2}$$

Bağıntıdan da görüldüğü üzere $I \times V$ çarpımının maksimum olduğu nokta ilgili panelin o koşullar altındaki maksimum güç noktasıdır. Bu noktada, hem akım hem de gerilim

elektrik üretimi açısından optimum seviyede olup PV panel ilgili ortam şartları altında üretebileceği maksimum elektrik miktarını (P_{MAKS}) üretmektedir.

Doluluk faktörü (FF) ise, maksimum güç noktasının açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımıyla (I_{sc}) olan ilişkisini ifade eden diğer bir elektriksel parametredir. Bu faktör gerçek maksimum gücün, teorik maksimum güce oranı olup olan kısa devre akımı ve açık devre gerilimi çarpımına oranıyla aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$FF = \frac{(I_{SC} \times V_{OC})}{P_{MAKS}} \tag{3}$$

İlgili faktör, PV panel tarafından üretilen gerçek maksimum ideal değere yaklaşma oranını göstermektedir.

1.4.3. Elektriksel Verim

Elektriksel verimlilik (η), PV panel tarafından üretilen elektrik enerjisinin panel yüzeyine düşen toplam ışınım enerjisine oranını ifade etmektedir. Verimlilik hesabında genel olarak panel tarafından üretilebilen maksimum güç değeri dikkate alınmakta olup ilgili değer aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır (Al-Waeli vd., 2017):

$$\eta = \frac{P_{MAKS}}{G \times A_{Panel}} \tag{4}$$

Burada, G ışınım şiddetini (W/m^2), A_{panel} ise toplam PV hücre yüzey alanını temsil etmektedir. Verimlilik, hücrelerin teknolojisine ve kullanılan malzemeye göre değişmekte olup monokristalin silikon hücreler, polikristal ve ince film türevlerine göre daha yüksek verim değerleri sunmaktadırlar.

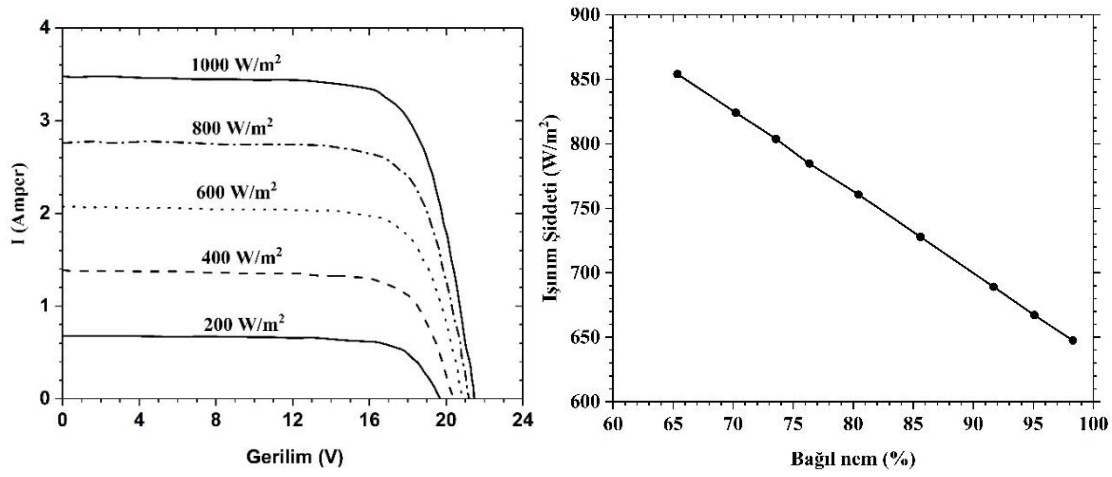
1.5. Ortam Şartlarının PV Hücre Verimliliği Üzerindeki Etkileri

PV hücrelerin elektriksel performansı, başta güneş ışınımı, nem, rüzgâr ve sıcaklık olmak üzere çeşitli çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu etkilerin tespiti ve etkilere karşı mümkün olan önlemlerin alınması yüksek performanslı PV sistemlerinin temini için gereklidir. Bu etkiler kısaca aşağıda açıklanmıştır:

1.5.1. Işınım Şiddeti ve Nem Etkisi

Fotovoltaik hücrelerin güç çıktısı, hücre üzerine düşen güneş ışınım şiddetiyle orantılıdır. Işınım şiddeti arttıkça hücre üzerine düşen foton sayısı artmakta ve buna bağlı olarak daha fazla elektron serbest kalarak hücrenin elektriksel güç çıktısını artmaktadır. Şekil 6a'dan görüldüğü üzere, hücrenin kısa devre akımı (Isc), ışınım şiddetiyle yaklaşık olarak doğru orantılıdır. Hücrenin açık devre gerilimindeki ışık şiddetine bağlı değişim ise akımda gözlemlenen kadar büyük olmamaktadır. Diğer bir ifadeyle ışınım şiddetindeki dalgalanmalar hücrenin akım değerini önemli ölçüde etkilerken bu dalgalanma gerilim değerlerine aynı oranda yansımamaktadır.

Ortamın nem miktarı ise performansı etkileyebilen diğer bir parametredir. Havada bulunan su buharının miktarı, PV hücreler üzerine düşen ışınımın spektrumu ve şiddeti üzerinde etkili olabilmektedir. Bu durum, su buharının spektral geçirgenliği ile ilişkili olup atmosferde bulunan su buharı güneş ışığının farklı dalga boylarını farklı oranlarda geçmesine müsaade etmektedir. Nem oranının artmasıyla bu etki güçlenmekte olup bu ilişki Şekil 6b'de örneklendirilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere nem oranının artmasıyla PV hücre üzerine düşen ışınım şiddeti ve buna bağlı güç çıktısı azalmaktadır.

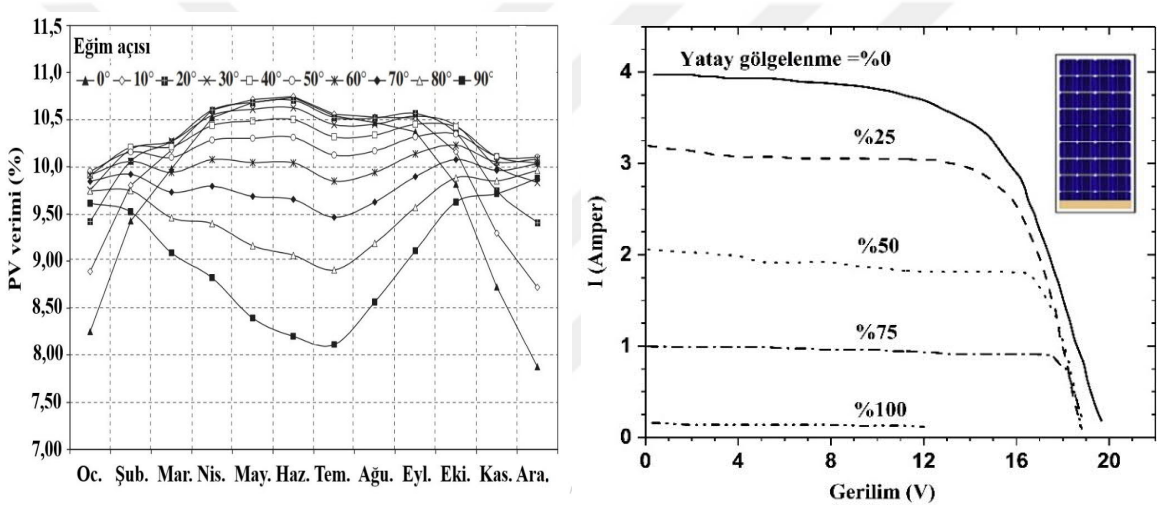


(a) (b)

Şekil 6. Bir polikristal hücrenin I-V eğrileri ve veriminde ışınım şiddetine bağlı değişim (Chaibi vd., 2019) (a), PV hücre verimi (Hamou vd., 2014)

1.5.2. Açı ve Gölge Etkisi

PV hücrelerin üzerine gelen güneş ışığının açısı, ışınım miktarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Hücrelerin ışınım açısına göre en uygun açıyla yerleştirilmesi, yüksek enerji üretimi için önem arz etmektedir. Doğru açının tayini, panelin kullanılacağı bölgeye ve mevsime göre değişkenlik göstermekte olup bu doğrultuda meteorolojik verilere başvurulmaktadır. Bu duruma örnek olarak Şekil 7'de bir PV panelin verim değerinin aylara ve yerleşim açısına göre değişimi verilmiştir (Mondol vd., 2007). Şekilden de görüldüğü üzere ilgili parametreler verim üzerinde önemli etkiye sahip olup saha yerleşiminde dikkate alınmaktadır.



(a) (b)

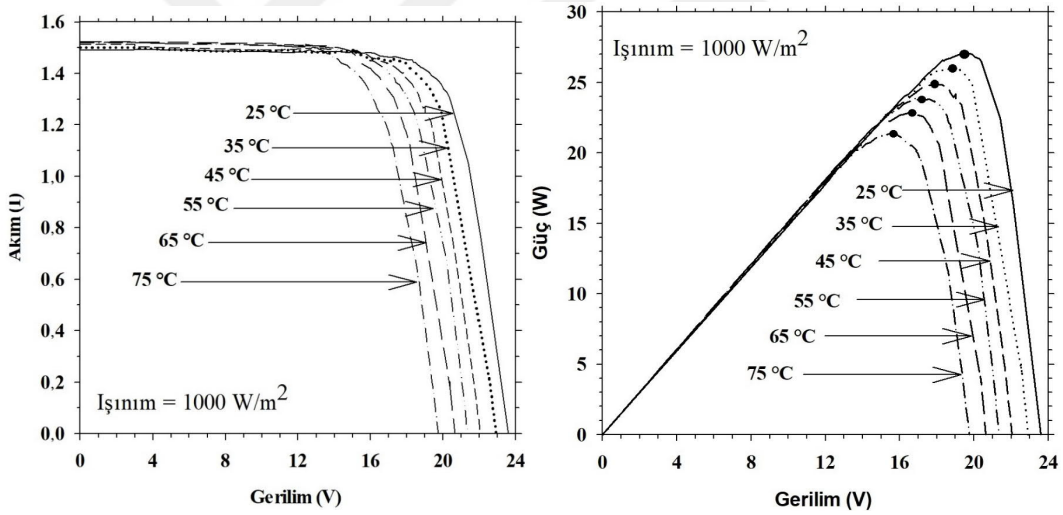
Şekil 7. Örnek bir PV panel için verimin yerleşim açısı ve aylara göre değişimi (Mondol vd., 2007) (a), gölgenin I-V eğri üzerindeki etkisi (Bayrak vd., 2017) (b)

Diğer bir etki olan gölgelenme ise, güneş ışınımının PV hücreler üzerine kısmen veya tamamen düşmediği anlarda ortaya çıkan bir durumdur. Bu duruma sıklıkla, bulutlar, çevredeki binalar, objeler ve bitki örtüsü neden olabilmekte ve bunun sonucunda hücrelerin elektrik üretimini büyük oranda düşebilmektedir. Şekil 10b'de gölge oluşumu durumunda I-V eğrisinde meydana gelen değişime bir örnek verilmiştir (Bayrak vd., 2017). Şekilden görüldüğü üzere yatay gölgelenme durumunda akım değeri düşüş göstermekte ve panelin güç çıktısı azalmaktadır.

1.5.3. Sıcaklık Etkisi

Hücre sıcaklığı, elektriksel performansı etkileyen en önemli parametrelerden biri olup, tez çalışması kapsamındaki araştırma soruları arasındadır. Fotovoltaik hücrelerde, ışınım altında sıcaklık artışı meydana gelebilmekte ve bu artış PV hücrelerin elektriksel karakteristikleri üzerinde önemli değişiklikler meydana getirmektedir.

Fotovoltaik hücreler, daha öncede ifade edildiği üzere N veya P tipi yarı iletkenlerden meydana gelmektedir. Hücrelerin sıcaklığı arttıkça, yarı iletken malzemenin enerji bant aralığı azalmakta ve hücrenin açık devre gerilimi düşürmektedir. Bu durum hücrenin maksimum güç üretim noktasını aşağı çekerek elektriksel verimliliği olumsuz etkilemektedir. Bu sürecin daha iyi anlaşılabilmesi adına, sıcaklığın I-V ve P-V eğrilerine etkileri Şekil 8'de sırasıyla verilmiştir. İlgili şekildeki verilerin çalışma kapsamında kullanılan monokristalin panele ait olduğu ifade edilmelidir.



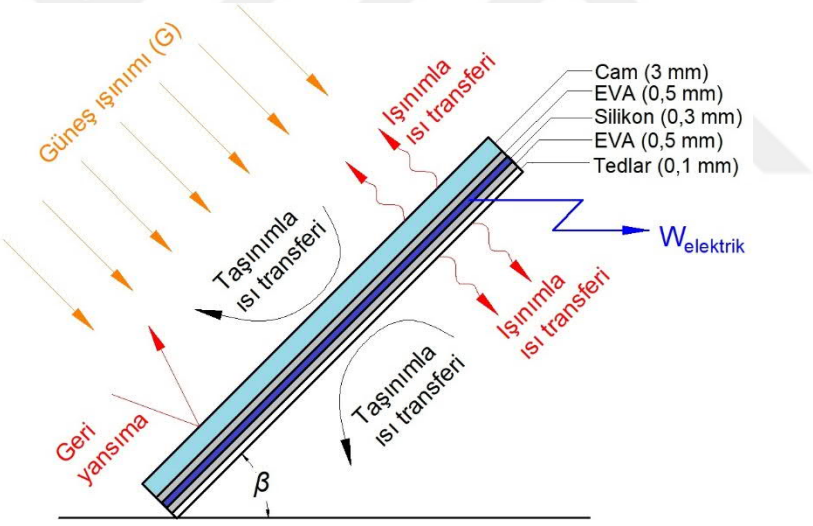
(a) (b)

Şekil 8. Monokristalin PV panele ait I-V ve P-V eğrilerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 8a'da görüldüğü üzere hücre sıcaklığının artması, kısa devre akımı bir miktar artırırken açık devre gerilimi önemli ölçüde düşürmektedir. Bu değişimin güç çıktısı üzerindeki etkisi ise Şekil 8b'de verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere hücre sıcaklığındaki artış, panelin güç çıktısını azaltmaktadır. Literatürde PV hücrelerdeki sıcaklığa bağlı bu düşüş bir sıcaklık katsayısı (β) ile ifade edilmektedir. Bu katsayı, hücrelerin üretildiği malzemeye göre değişkenlik göstermekle birlikte polikristalin için genellikle 0,5 - 0,6 arası, monokristalin hücreler içinse 0,4-0,5 arasında değerler almaktadır

(Hudişteanu vd., 2024). Diğer bir ifadeyle PV hücrelerde sıcaklığın her 1°C artması, güç çıktısını yaklaşık %0,4–0,6 oranında azaltmaktadır.

PV hücrelerde meydana gelen bu sıcaklık artışının temel nedeni ise, absorbe ettikleri güneş enerjisinin sınırlı bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürebilmeleridir. Çeşitli PV teknolojilerine göre değişiklik göstermekle birlikte absorbe edilen güneş enerjisinin yalnızca %15–22'si elektrik üretimine katkı sağlarken, geriye kalan kısım ısıya dönüşerek panel sıcaklığının artmasına yol açmaktadır. Bu durum enerji dengesi ve ısı transfer süreçleri ile Şekil 9'da şematik olarak ifade edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere bir PV panel üzerine düşen ışınımın (G) bir kısmı ön yüzeyden geri yansımakta, bir kısmı taşınım ve ışınımla çevre ortama transfer olmakta, diğer kısmı ise verim değerine bağlı olarak elektrik enerjisine dönüşmektedir ($W_{elektrik}$). Düşen enerjinin kalan kısmı ise PV katmanları tarafından absorbe edilmekte ve PV hücreler üzerinde sıcaklık artışına neden olmaktadır. Sıcaklıktaki bu artış, absorbe edilen ısının çevre ortama transfer olan ısıya eşitlendiği ana kadar devam etmektedir.



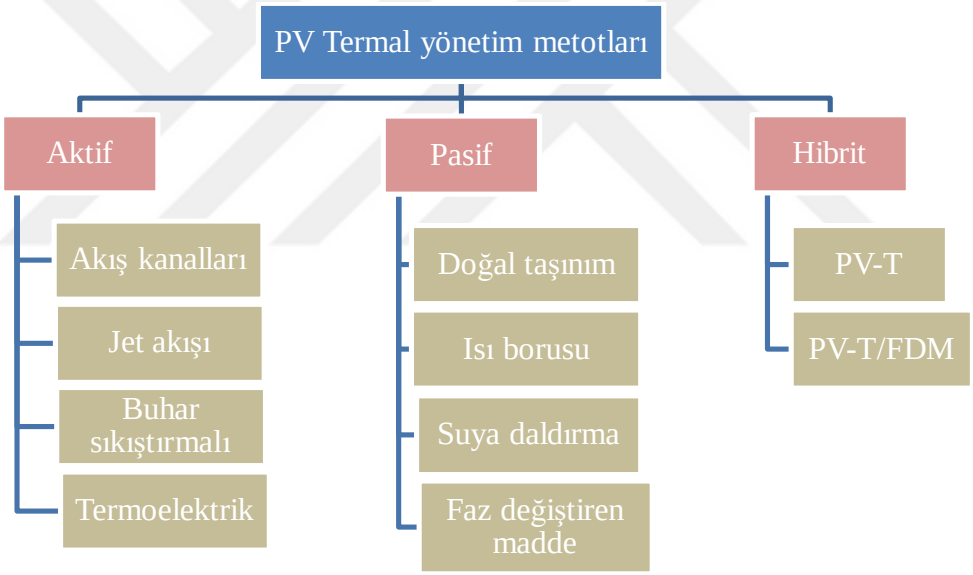
Şekil 9. Isı alıcısız standart bir PV panel üzerinde ısı transferi (Khanna vd., 2018a)

Klasik bir PV uygulaması göz önüne alındığında, panel üzerinde bir ısı alıcı sistem bulunmaması, panel ve çevre ortam arasındaki ısı transfer hızının (ısı atılım kabiliyeti) düşük seviyelerde kalmasına ve hücrelerde 70 °C'lere varan sıcaklık artışlarına neden olabilmektedir. Yüksek ortam sıcaklığı, düşük rüzgâr hızı ve yüksek nem oranı gibi panel yüzeyinden ısı transferini sınırlayan faktörlerin hücre sıcaklıklarının artmasına neden olduğu da ifade edilmelidir (Qu vd., 2024a). Bu nedenle, PV panellerin performansını üst seviyede

tutabilmek ve uzun vadede enerji üretimini en üst düzeye çıkarabilmek için PV sistemlerde meydana gelebilen bu sıcaklık artışının kontrol altına alınması gerekmektedir.

1.6. PV Paneller Üzerinde Uygulanan Termal Yönetim Metotları

PV panellerdeki sıcaklık artışını kontrol altına almak ve hücre verimliliğindeki düşüşü engellemek amacıyla araştırmacılar, çeşitli termal yönetim (soğutma) metotları geliştirilmişlerdir. Literatürde sıklıkla uygulanan bu metotlar Şekil 10'da şematik olarak özetlenmiştir. Şemadan görüldüğü üzere PV paneller üzerinde uygulanan bu metotları, genel olarak aktif soğutma, pasif soğutma ve hibrit soğutma olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür. Konunun daha etkili anlaşılması adına ilgili yöntemlerin detaylarından kısaca ayrı başlıklar altında bahsedilmiştir.



Şekil 10. PV panellere sıklıkla uygulanan termal yönetim metotları

1.6.1. Aktif soğutma metotları

Aktif soğutma metotları, PV panellerin hücre sıcaklığının düşürülmesi için mekanik cihazlar veya pompalama sistemleri gibi dış enerji kaynağına ihtiyaç duyulan yöntemlerdir. Bu metotlar genellikle yüksek verimlilik artışı sağlayabilmektedir. Ancak enerji tüketimleri nedeniyle ek maliyet ve enerji gereksinimleri oluşturmaktadır.

a. Akış kanalları ile soğutma

Panel üzerinde biriken ısının uzaklaştırılması için bir soğutucu akışkanın (hava veya sıvı) fan veya pompa vasıtasıyla panel arka yüzeyine yerleştirilmiş kanallardan geçirildiği yöntemdir. Akışkan olarak hava kullanıldığı durumlarda daha az bakım isteyen ve düşük maliyetli bir uygulama ortaya çıkmaktadır (Şekil 11a). Ancak ısı transfer performansı, sıvı akışlı sistemlere kıyasla, ortam sıcaklığı ve havanın düşük ısı kapasitesi neticesiyle yüksek ışınım altında yetersiz kalabilmektedir. Sıvıların yüksek ısı iletim katsayıları sayesinde (Şekil 11b) hava ile soğutmaya göre daha yüksek ısı taşınım katsayıları elde edilebilmekte ve panel sıcaklıkları daha düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Ancak bu yöntemin yatırım maliyeti daha yüksek olup, akışkanların korozif etkileri sebebiyle daha sık bakıma ihtiyaç duyulmaktadır.

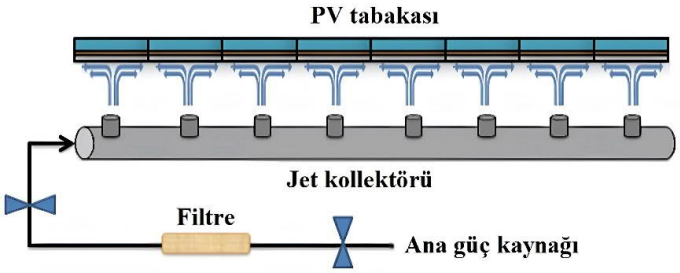


(a) (b)

Şekil 11. Kanaldan hava akışıyla (Mazón-Hernández vd., 2013) (a), su akışıyla PV soğutma, (Alzaabi vd., 2014) (b)

b. Jet akışı ile soğutma

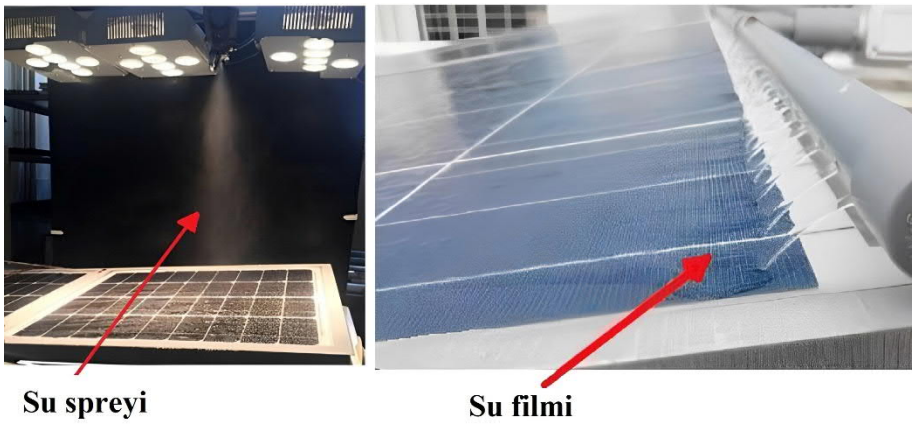
Soğutucu akışkanın, Şekil 12'de gösterildiği gibi jet akışı formunda PV panel yüzeylerine çarptırıldığı yöntemdir. Bu yöntemde hava veya su, jet nozüllerinden panel yüzeylerine genellikle dik olarak püskürtülmekte ve panel bünyesinde biriken ısı uzaklaştırılmaktadır. Soğutucu akışkanın, kanal akışına kıyasla çok daha yüksek hızla gönderilmesi, transfer edilen ısının daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu sebeple jet akışıyla soğutma, çok yüksek ışınımların söz konusu olduğu yoğunlaştırılmış (concentrated) PV uygulamalarında daha fazla tercih edilmektedir.



Şekil 12. PV hücrelerin jet akışıyla soğutulması (Bahaidarah, 2016)

c. Su spreyi veya su filmi ile soğutma

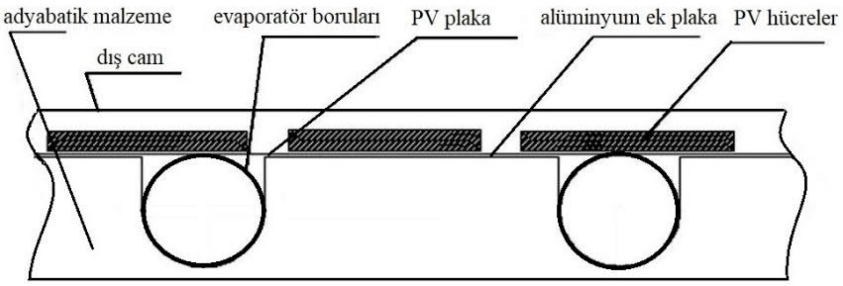
Su spreyi yöntemi, PV panel yüzeyine ince bir su tabakası püskürterek soğutmayı amaçlayan bir tekniktir. Bu yöntemde su, genellikle yüksek basınçlı sprey nozülleri vasıtasıyla su damlacıkları formunda panel yüzeyine püskürtülmektedir. Damlacıkların teması ve buharlaşmalarıyla birlikte panelden önemli ölçüde ısı çekilmekte ve PV panellerin sıcaklık artışı kontrol altında tutulmaktadır. Su filmi ile soğutmada ise su, Şekil 13'de gösterildiği gibi panellerin üst kısmına yerleştirilen özel borular veya dağıtıcılar aracılığıyla panel yüzeyine sürekli olarak dökülmektedir. Bu sayede panel yüzeyinde ince ve kesintisiz bir film tabakası oluşturulmakta ve PV panelden ısı çekilerek ısı artışı kontrol altına alınmaktadır. Bu yöntemlerde, doğrudan sıvı teması nedeniyle yüksek soğutma performansları elde edilebilmektedir. Ayrıca su akışı etkisiyle, hücre verimliliğini olumsuz etkileyen toz ve kir miktarı önemli ölçüde azaltılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin, enerji ihtiyacı, su kaynağı ihtiyacı, sık bakım onarım ihtiyaçları gibi olumsuzlukları da bulunmaktadır.



Şekil 13. Su spreyi (Yesildal vd., 2022) ve su filmi (Mah vd., 2019) ile PV soğutma

d. Buhar Sıkıştırmalı Soğutma

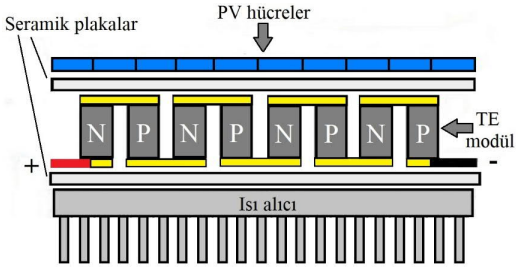
Buhar sıkıştırmalı soğutma, fotovoltaik (PV) panellerin soğutulmasında etkin bir yöntem olarak kullanılan aktif soğutma sistemlerinden biridir. Bu yöntemde evaporatör boruları, Şekil 14'deki gibi panel arkasına temaslı olarak yerleştirilmekte ve buhar çevrimi esnasında panelde biriken ısı uzaklaştırılmaktadır. Bu yöntemle özellikle sınırlı alanlarda, sıcak ve yoğun güneş ışınımına maruz kalan PV panellerde verimlilik kaybı önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Aynı zamanda, bu sistemlerin otomatik kontrol edilebilirliği sayesinde PV panellerin sıcaklığı belirli aralıkta tutulabilmekte, aşırı ısınmaya bağlı malzeme yorulması ve verim kaybı önlenebilmektedir.



Şekil 14. PV evaporatör modülünün kesiti (Keliang vd., 2009)

e. Termoelektrik soğutma

Termoelektrik modüller (TE modüller), PV panellerin soğutulmasında da kullanılabilen ve Peltier etkisine dayanan yenilikçi bir soğutma yöntemidir. Bu yöntemde soğutma, termoelektrik modülün yüzeyine uygulanan bir elektrik akımının, modülün iki tarafı arasında bir sıcaklık farkı oluşturması prensibiyle gerçekleşmektedir. TE modülün soğuk yüzeyi, Şekil 15'te gösterildiği gibi PV panelin arka yüzeyine temaslı olarak yerleştirilir ve panelde biriken ısı modül tarafından uzaklaştırılır. Fakat soğutma sürecinin devamlılığı için, TE modülünün sıcak olan diğer yüzeyinden ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle ek soğutucu veya ısı dağıtıcı elemanlar gerekebilmektedir.



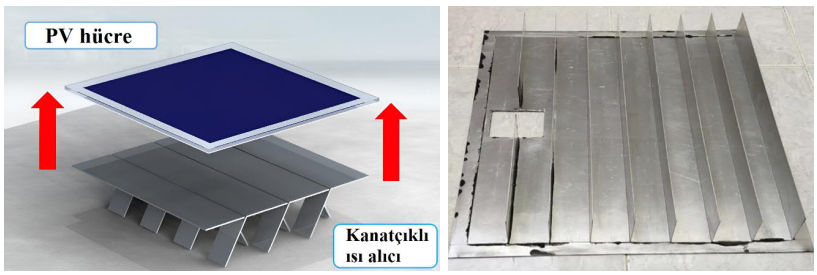
Şekil 15. PV panellerin TE modül ile soğutulmaları (Fabbri & Greppi, 2021)

1.6.2. Pasif Soğutma Metotları

Pasif soğutma metotları, enerji girdisine ihtiyaç duymadan panel sıcaklığını düşürmeyi amaçlayan yöntemleri kapsamaktadır. Bu yöntemler, aktif yöntemlere kıyasla genellikle maliyet açısından daha uygun çözümler sunmakta olup daha az bakım gerektiren, daha sürdürülebilir çözümler sunmaktadırlar. Literatürde araştırmacıların PV paneller üzerinde sıklıkla uyguladığı pasif soğutma yöntemlerinden şu şekilde bahsedilebilir:

a. Doğal taşınım destekli soğutma

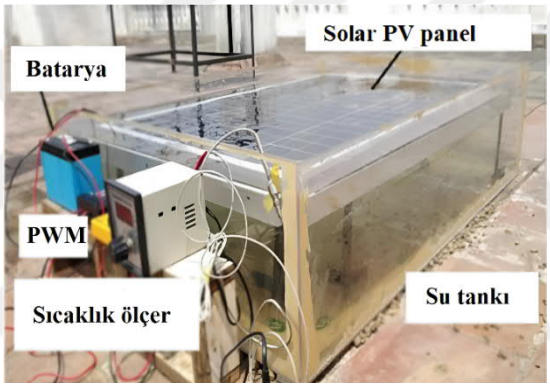
PV paneller üzerinde biriken ısının, hava veya sıvıların doğal taşınımı yoluyla çevre ortama aktarıldığı yöntemdir. Taşınımın etkinliğinin artırılması amacıyla ısı transfer yüzey alanının artırılması araştırmacılar tarafından en sık başvurulan yöntemdir (Şekil 16). Bu yöntem, herhangi bir mekanik parça veya enerji girdisi gerektirmediği için bakım gereksinimi düşük ve uzun vadede sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Buna karşın, doğal taşınım ile sağlanan soğutma kapasitesi aktif soğutma yöntemlerine kıyasla sınırlı olup yüksek güneş ışınımı alan bölgelerde yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca çevre sıcaklığına ve yerleşim açısına bağlılık doğal taşınımlı PV soğutma sistemlerini sınırlayan diğer faktörlerdir.



Şekil 16. Kanatçık destekli doğal taşınımla PV soğutma (Hernandez-Perez vd., 2020)

b. Suya daldırma ile soğutma

Suya daldırma (water immersion) tekniği, fotovoltaik (PV) panellerin verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan yenilikçi bir soğutma yöntemidir. Bu yöntemde PV paneller, Şekil 17'deki gibi tamamen suya daldırılarak veya su dolu bir rezervuarda kısmi olarak yerleştirilerek panel yüzeyindeki ısının suya aktarılması sağlanmaktadır. Suya daldırma yönteminde, PV panelin verimliliğini düşüren sıcaklık artışları minimum seviyede tutulurken aynı zamanda panel yüzeyi temizlenmekte ve güneş ışınımının daha iyi emilmesi sağlanmaktadır. Ancak doğal su kaynağına erişimin kısıtlı olduğu konumlarda düzenli su takviyesi ihtiyacının yanı sıra, uzun süreli uygulamalarda suyun mineral birikintileri, yosun oluşumu ve su kirliliği gibi sorunlar bu uygulamayla söz konusu olmaktadır.

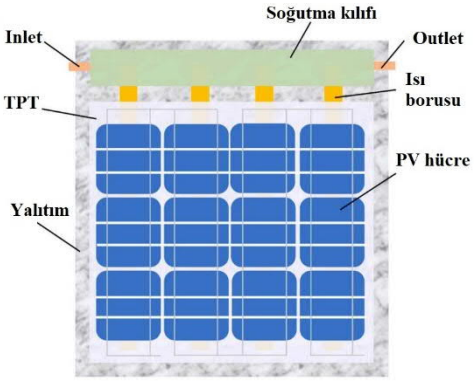


Şekil 17. PV panellerin suya daldırılarak soğutulmaları (Sivakumar vd., 2021)

c. Isı borusu (Heat Pipe) ile soğutma

Isı borusu (heat pipe) uygulaması, fotovoltaik (PV) panellerin soğutulmasında kullanılan yüksek verimli pasif bir ısı transfer teknolojisidir. Isı boruları, Şekil 18'deki gibi kapalı bir sistemde çalışan ve buharlaşma-yoğuşma prensibiyle ısıyı hızlı bir şekilde uzaklaştıran cihazlardır. Isı borusunun iç yapısı, emici (wick) malzeme veya özel bir sıvı ile kaplanarak, düşük sıcaklıklarda buharlaşma ve yüksek sıcaklıklarda yoğunlaşma süreçleri arasında etkin bir ısı taşıma sağlar. Bu sistemde, PV panel yüzeyinden alınan ısı, buharlaşma bölgesindeki sıvıyı buharlaştırmakta ve bu buhar, borunun daha soğuk olan diğer ucuna taşınmaktadır. Bu kısımda yoğunlaşan buhar, iç yüzeyde yeniden sıvı hale geçmekte ve emici malzeme yardımıyla geri dönerek çevrim tamamlanmaktadır (Gao vd., 2023). Bu sayede enerji girdisine ihtiyaç duymaksızın PV panellerdeki sıcaklık artışı düşürülmekte ve verimlilik artırılmaktadır. Fakat ilgili uygulamanın yüksek ilk kurulum maliyeti, belirli

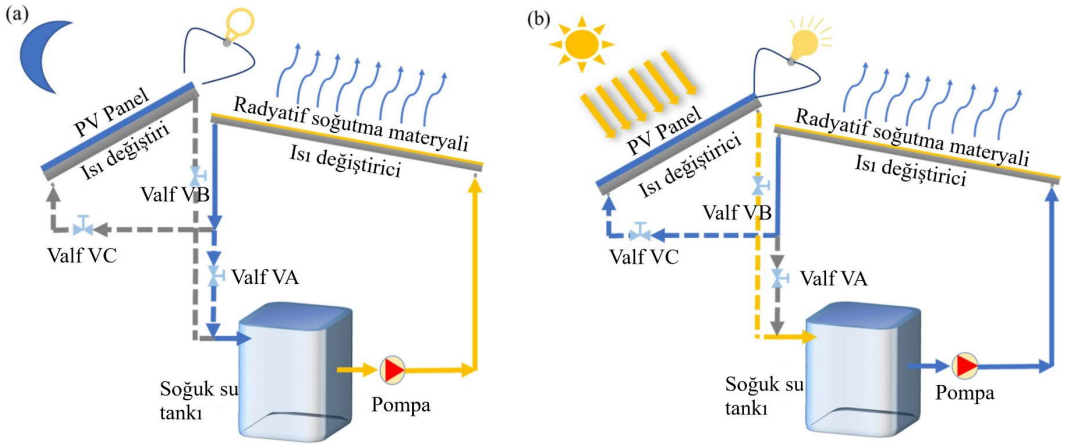
çalışma sıcaklık aralığı, yatay veya düşey yerleşim kısıtları, dış ortam şartlarına bağlılık gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır.



Şekil 18. Isı borusu ile soğutulan PV panel (Gao vd., 2023)

d. Radyatif soğutma

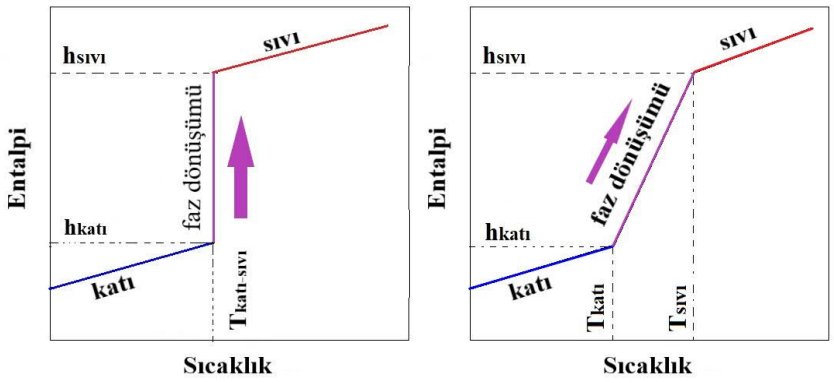
Radyatif soğutma, bir yüzeyin kendi enerjisini elektromanyetik dalgalar yoluyla çevreye yayması prensibine dayanan bir soğutma yöntemidir. Bu yöntemde, özellikle 8-13 µm dalga boyu aralığında yapılan ışıma, atmosferik gazlardan minimum seviyede etkilenmesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Bu sayede yüzeyden yayılan kızılötesi ışınım, atmosfer tarafından emilmeden doğrudan uzaya ulaşmakta ve yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığından bağımsız olarak düşürülmektedir. İlgili uygulamaya bir örnek Şekil 19'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, gündüz ışınım altında bulunurken PV panel üzerinde biriken ısı, bir tank içerisinde bulunan suya aktarılmakta ve bu sayede panel sıcaklığı gün içerisinde kontrol altında tutulmaktadır. Gece ise, sıcaklığı yükselmiş olan su, radyatif soğuma için uygun özelliklere sahip bir yüzeyle bütünleştirilmiş ısı alıcı içerisinden geçirilmekte ve ışımımla uzaklaştırılan ısı sayesinde suyun sıcaklığı çevre ortam sıcaklığının altına düşürülmektedir. PV panellerin soğutulmasında da kullanılabilen bu yöntem, güneş ışınımına maruz kalan yüzeylerde sıcaklık artışını sınırlandırarak panel verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 19. Radyatif olarak soğutulan PV panel (Li vd., 2022)

1.6.3. Faz Değiştiren Madde ile Pasif Soğutma

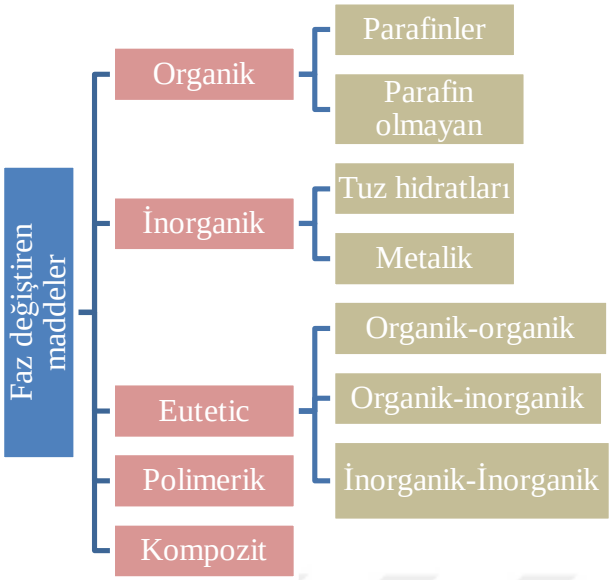
Faz değiştiren madde (FDM) destekli ısı alıcıların kullanılması, PV panellerin termal yönetiminde en sık kullanılan pasif yöntemlerden biridir. FDM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazları arasında geçiş yapan ve bu esnada yüksek miktarda ısı depolayabilen maddelerdir. Bu ısı depolama süreci, Şekil 20'de verilen FDM'lere ait tipik bir entalpi sıcaklık grafiği ile de ifade edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere FDM'ler, saflık oranına da bağlı olarak dar bir sıcaklık aralığında, duyulur ısıya kıyasla oldukça yüksek miktarda gizli ısı depolayabilmektedir. Maddenin faz dönüşümünü geçirdiği sıcaklık değeri ise, FDM'nin türüne ve karbon zincir uzunluğu gibi moleküler yapıya bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. FDM'ler bu termofiziksel özelliği sayesinde ısı depolama ve termal yönetim gereken uygulamalarda sıcaklık kontrolü amacıyla kullanılabilmektedir.



Şekil 20. Parafin için entalpi-sıcaklık grafiği, yüksek saflık için (a), düşük saflık için (b)

Şekil 21’de verilen ve literatürde ısı depolama ve termal yönetim amacıyla kullanılan FDM türlerinden kısaca aşağıdaki gibi bahsedilebilir:

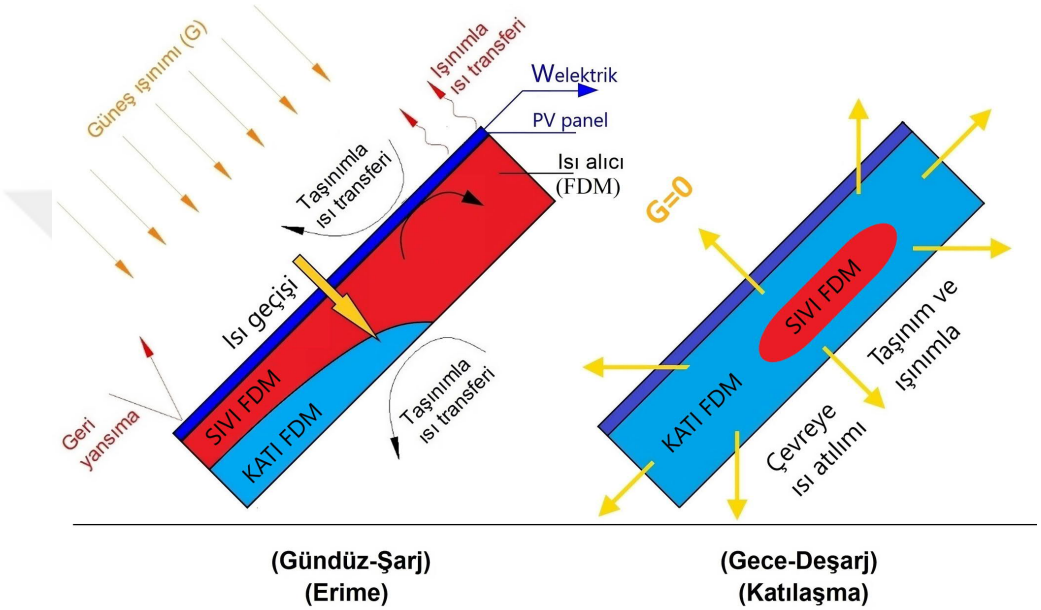
- Organik FDM'ler: Bu grubu büyük çoğunlukla parafinler ve yağ asitleri oluşturmaktadır. Organik FDM’ler kimyasal olarak oldukça kararlı olup korozyona neden olmamaktadırlar. Parafinler, yüksek gizli ısı kapasiteleri, farklı erime sıcaklıklarında üretilebilmeleri ve faz dönüşüm kararlılıkları sayesinde PV paneller gibi ısıya maruz kalan elektronik ekipmanların pasif soğutulmasında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Ancak, organik FDM’lerin düşük termal iletkenlikleri nedeniyle ısı transfer performansı düşük seviyelerde kalabilmektedir. Buna bağlı olarak bu grup FDM’lerin kullanıldığı ısı alıcılarında performansın artırılması için, kanatçık, metal matris, nanoparçacık ilavesi gibi iletkenlik artırıcı önlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir.
- İnorganik FDM'ler: Bu grup FDM’leri tuz hidratları ve metalik bileşikler oluşturmaktadır. Tuz hidratları parafinlere kıyasla genel olarak daha yüksek gizli ısı kapasitesi ve termal iletkenliğe sahiptirler. Ancak, bu FDM’ler, daha düşük faz dönüşüm kararlılığına sahip olup süper soğuma (sub-cooling veya super-cooling) etkisi gösterebilmektedirler. Ayrıca korozif etkileri sebebiyle uygulandıkları sistemlerde zamanla hasara yol açabilmektedirler.
- Eutektik FDM'ler: Bu FDM'ler, iki veya daha fazla bileşiğin belirli bir oranda karıştırılmasıyla oluşturulan ve erime-donma sürecini belirli bir sıcaklıkta gerçekleştiren faz değiştiren maddelerdir. Eutektik karışımlar, diğer grup FDM’lere kıyasla çok daha keskin bir faz dönüşüm sıcaklığına sahip olabilmektedirler. Bu termofiziksel özelliği nedeniyle eutetik FDM’ler, termal yönetimde hassas sıcaklık kontrolü gerektiren, diğer bir ifadeyle düşük sıcaklık değişimlerini tolere etmeyen sistemlerde veya sabit bir sıcaklıkta çalışan sistemlerde daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, eutektik FDM’ler diğer gruplara kıyasla daha düşük gizli ısı kapasitesine sahip olup faz ayrışma gibi olumsuz özellikler gösterebilmektedir.
- Polimerik FDM'ler: Diğer grup FDM’lerden hafif ve esnek yapıları ile ayrılmaktadırlar. Bu nedenle giyilebilir teknolojilerde ve tekstil ürünlerinde kullanılabilirler. Ancak polimerik FDM’ler genel olarak düşük gizli ısı kapasitesine ve termal iletkenliğe sahiptirler. Bu nedenle PV sistemler gibi yüksek ısı girdili sistemlerde daha az tercih edilmektedirler.



Şekil 21. Faz değiştiren madde türleri (Sharma vd., 2009)

Yukarıda ifade edildiği üzere, farklı FDM türleri farklı özellikler sunmakta olup bu maddelerden tekstilden gıdaya, uzay ve havacılıktan medikal endüstriye çok geniş alanlarda faydalanılmaktadır. FDM'ler, sundukları üstün enerji depolama kabiliyetleri sayesinde termal yönetim uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. FDM'lerle, ısıya maruz kalan elektronik ekipmanlarda pasif sıcaklık kontrolü sağlanarak sıcaklık kaynaklı kayıplar azaltılmaktadır. Bu amaçla ilgili sistemlerde ısıya maruz kalan yüzeylere FDM destekli ısı alıcılar entegre edilmektedir. Fakat FDM'lerle pasif sıcaklık kontrolü doğrultusunda göz ardı edilmemesi gereken en önemli husus ilgili sistemlerin periyodik çalışma zorunluluğudur. Bu durum FDM'lerin, daha önce de ifade edildiği üzere temas halindeki yüzeylerden ısı çekmesi durumunda bu ısıyı gizli ısı olarak depolaması (sıcaklık erime noktasında iken) ve bu süreçte zamanla erimesiyle ilişkilidir. Literatürde bu süre "erime veya şarj periyodu" olarak ifade edilmektedir. FDM, erime sürecinin tamamlanmasının ardından sadece duyulur ısı depolayabilmekte ve sıcaklığı artmaya başlamaktadır. Bunun neticesinde ise temas halinde bulunduğu yüzeylerde sıcaklık artışı engellenememektedir. FDM'in tekrar soğutma amacıyla kullanılabilmesi, diğer bir ifadeyle ısısını çevre ortama atıp katılaşabilmesi için sisteme ısı girdisinin ortadan kalktığı bir zaman periyoduna (katılaşma-deşarj) ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda PV sistemler için var olan gece-gündüz döngüsü, ısı çekerek eriyen (şarj olan) FDM'in bı ısıyı çevre ortama bırakarak tekrar katılaşmasına imkân tanımaktadır. Bu durum, FDM destekli ısı alıcılarının PV panellerin pasif sıcaklık kontrolü amacıyla kullanılmasını oldukça uygun kılmaktadır.

PV sistemlerin FDM destekli ısı alıcılarıyla termal yönetimine ait tipik bir süreç Şekil 22'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere gündüz ışınım altındaki panelde biriken ısının bir miktarı FDM tarafından absorbe edilmektedir. Bu sırada ise FDM, hem duyulur hem de gizli ısı depolayarak erime sürecine girmektedir. PV panelden çekilen ısı sayesinde hücrelerin sıcaklıkları pasif olarak kontrol altına alınmakta ve hücrelerin sıcaklığa bağlı verim düşüşü azaltılmaktadır.



Şekil 22. PV paneller için FDM destekli ısı alıcı uygulamasında meydana gelen ısı transfer süreçleri

Özetlenen bu termal yönetim metotları, PV panellerin performansını artırmak ve sıcaklık kaynaklı enerji kayıplarını azaltmak amacıyla akademik ve endüstriyel alanda önemli bir araştırma konusu olarak kabul edilmektedir. Her yöntemin kendi avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte, yöntem seçimi, uygulamanın ihtiyaçlarına ve maliyet/performans dengelerine göre yapılmalıdır. Genel olarak termal yönetim metotlarının avantaj ve dezavantajları üzerinden şu değerlendirme yapılabilir:

PV panellerin düşük nominal verimleri, aktif yöntem tarafından harcanan enerji ve önlenen enerji kaybı arasındaki dengenin sağlanmasını güçleştirmektedir. Bu bağlamda sistemin enerji kazancının pozitif yönde kalabilmesi için atık ısıdan faydalanmak gerekebilmektedir. Ayrıca sık bakım ihtiyacı, soğutucu sıvıların korozif etkileri, su kaynağı gereksinimi gibi olumsuzluklarda aktif soğutma yöntemler için söz konusudur. Pasif yöntemler ise, özellikle enerji girdisine ihtiyaç duymamaları, seyrek bakım ihtiyacı, düşük

yatırım maliyeti, su kaynağı kullanmamaları ve uzun ömürlükleriyle ön plana çıkmaktadır. Pasif metotlar içerisinde ise FDM'ler, keskin ve uzun süreli sıcaklık kontrolü, ani ısıl yükleri dengeleyebilme, çevre koşullardan daha az etkilenme, az bakım ihtiyacı gibi özellikleriyle pasif metotlar arasında öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle FDM destekli ısı alıcıları ve ilgili ısı alıcılarının PV sistemlere entegrasyonu etkili ve gelecek vadeden bir uygulamadır. Bu sebeple konu üzerine yapılan çalışmalar giderek hız kazanmaktadır.

1.7. Literatür Özeti

Bu tez çalışmasında bir PV panelin FDM ile pasif termal yönetimi deneysel olarak ele alınmış ve pasif soğutma performansını artırmayı hedefleyen özgün FDM ve hava destekli ısı alıcı tasarımları geliştirilmiştir. Bu kapsamda ilgili başlık altında, öncelikle konvansiyonel yapı üzerine yürütülmüş çalışmalara, ardından farklı ısı alıcı tasarımları üzerine yapılan araştırmalara yer verilerek konunun kapsamlı bir şekilde aktarılması hedeflenmiştir.

1.7.1. Konvansiyonel PV- FDM Sistem Tasarımı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Konvansiyonel yapıdaki PV-FDM sistemleri, bir PV panel arkasına, içerisinde yalnızca FDM bulunan bir ısı alıcının entegre edilmesiyle meydana gelmektedir. Bu sistemlerde FDM'ler, genellikle metal saclardan üretilmiş prizmatik hacimlerde depolanmakta ve bu depolar PV panelinin arkasına temas edecek şekilde yerleştirilmektedir. Bu düzenleme sayesinde, FDM deposu güneşlenme saatlerinde bir ısı alıcı görevi görmekte, panelde biriken ısının bir kısmını bünyesine çekerek panel sıcaklığını belirli bir süre kontrol edebilmektedir.

Literatürde bu tür sistemler üzerine birçok çalışma yer almakta olup ilgili çalışmalarda PV panel üzerinde sağlanan termal regülasyona etkiyen faktörler geniş çaplı olarak incelenmiştir. Çalışmalar; FDM türleri, depo geometrileri ve boyutları, çevresel koşullar gibi çeşitli parametreler altında sistem performansını değerlendirmektedir.

PV-FDM sistemler üzerine öncü bir dizi çalışma Huang vd., (2002, 2004, 2000) tarafından yapılmıştır. Sistematik olarak yürütülen bu çalışmalarda, bir PV panelin FDM ile termal yönetim potansiyeli, farklı ısıl yükler, geometrik parametreler, ortam şartları ve farklı FDM'ler için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarda PV panel sıcaklığı ve FDM'in erime davranışı arasındaki ilişki, alınan çoklu sıcaklık ölçümleri ve yapılan sayısal

analizlerle ortaya konmuştur. Çalışma sonuçları, ısı alıcısız bir PV panelin yüzey sıcaklığının 1000 W/m^2 (1 Sun) ışınım altında bir saat içerisinde 87 °C'ye ulaştığını, FDM (RT-25) destekli bir ısı alıcının yüzey arkasına entegre edilmesiyle sıcaklığın yaklaşık 90 dakika boyunca 37 °C'de tutulabildiğini göstermiştir. Sıcaklığın kontrol altına alındığı değer, kullanılan parafinin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle erime sıcaklığının yaklaşık 12 °C üzerinde olmuştur. İlerleyen zaman diliminde ise FDM'in büyük oranda erimesi sonucu ısı alıcının soğutma özelliğini yitirdiği ve bu nedenle panel sıcaklığının tekrar hızla arttığı çalışma sonuçlarından anlaşılmaktadır. Çalışma sonuçları genel olarak, bir PV panelin sıcaklık artışının pasif olarak FDM destekli bir ısı alıcısı ile belirli bir süre kontrol altında tutulabileceğini göstermiş ve bu sürenin, ısıl yük, kullanılan FDM miktarı (tabaka kalınlığı) ve ortam sıcaklığıyla ilişkisini ortaya konmuştur.

Isı alıcısında kullanılan FDM'in termofiziksel özellikleri PV-FDM sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkileyen diğer bir unsurudur. Bu bağlamda, kullanılan FDM'nin erime sıcaklığı, gizli ısı depolama kapasitesi, ısıl iletkenliği ve faz dönüşüm kararlılığı sistemin ısıl yük altında ısıl ve elektriksel davranışını değiştirebilmektedir. Ayrıca farklı termofiziksel özellikler, farklı çevresel koşullara göre uygunluk gösterebilmektedir.

Hasan vd., (2010), bu kapsamda yaptıkları bir çalışmada, erime sıcaklıkları 21 ile 29°C arası ve gizli ısı kapasitesi 140 ila 213 kJ/kg arasında değişen beş farklı FDM'in PV- FDM performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, FDM kütlesi, termal iletkenliği ve erime sıcaklıklarının termal ve elektriksel performansa etkisine odaklanmıştır. 1000 W/m² güneş ışınımı altında yapılan deneyler sonucunda, maksimum PV sıcaklığında 30 dakika boyunca 18 °C azalma, ortalama sıcaklıkta ise 5 saat boyunca 10 °C'lik önemli bir azalma, test edilen FDM'ler arasında en yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan tuz hidratı ($CaCl_2$) ile elde edilmiştir. Fakat tuz hidratının potansiyel aşırı soğuma özelliği ve buna bağlı termal kararlılık üzerinde yarattığı olumsuz ekti de sonuçlarda vurgulanmıştır.

Lo Brano vd., (2013), yüksek ışınıma maruz kalan bir PV panelin, paketlenmiş (encapsulated) FDM'ler ile soğutulması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada RT-27, paketler halinde FDM tabakasının arkasına yerleştirilmiş olup PV-FDM sisteminin sıcaklık analizi hem deneysel olarak hem de çalışma kapsamında geliştirilen sayısal bir model ile yapılmıştır. Çalışma sonuçları, paket FDM'in PV sıcaklık artışını yavaşlattığını ve ısı alıcısız duruma kıyasla maksimum sıcaklığın 3°C daha düşük seyrettiğini göstermiştir. Fakat deşarj süresi (gece) içerisinde, düşük ısıl iletkenliğe bağlı olarak FDM içerisinde depolanan ısının tümüyle atılamadığı ve sistemin güneş ışığına uzun süre maruz kaldığı

durumlarda aynı soğutma performansını gösteremediği belirtilmiştir. Çalışmada, soğutma performansının sürekliliği açısından yüksek deşarj performansının gerekliliğini vurgulanmıştır.

Japs vd., (2013), farklı bileşenlere sahip FDM'ler ile oluşturulan PV- FDM sistemlerin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ticari FDM'e kıyasla daha yüksek termal iletkenliğe fakat daha düşük gizli ısı kapasitesine sahip çok bileşenli bir FDM kullanılmıştır. Çalışmada paketlenmiş FDM'ler kullanılmış olup, ısı alıcısız PV, ticari parafinle oluşturulan PV-FDM ve çok bileşenli bir parafinle oluşturulmuş üç farklı sistem dikkate alınmıştır. Çalışma sonuçları, FDM'lerin erime sürecini tamamlamasının ardından panel sıcaklığının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Özellikle düşük ısıl iletkenliğe sahip ticari parafinli sistemde bu sıcaklığın, ısı alıcısız PV panel sıcaklığının da üstüne çıkarak günlük verimi düşürebildiği ortaya konmuştur. Bu çalışmanın, ısı depolama kapasitesinin yeterli gelmediği durumda günlük verimde oluşabilecek negatif etkiyi ifade etmesi açısından önemli olduğu ifade edilmelidir.

Hendricks & van Sark, (2013), bina entegreli PV-FDM sistemlerin yıllık performansı ve sistemin geri ödeme süresinin belirlenmesi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, FDM olarak RT-27 ve RT-42 kullanılmış ve basitleştirilmiş bir ısı dengesi modeli ile PV/FDM sisteminin yıllık bazda sağlayabileceği ek enerji kazancı iki farklı bölge için hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, PV panelin sıcaklığının 6 cm bir FDM tabakası ile ortalama 3 saat boyunca kontrol edilebildiğini ve daha uzun süreli ışınım altında soğutma etkisinin ortadan kalktığını göstermiştir. Çalışmada PV-FDM modülünün geri ödeme süresi 10-20 yıl arası olarak belirlenmiş ve bu sürenin kabul edilebilir seviyelerin ötesinde olduğu da ifade edilmiştir. Bu sebeple FDM'nin PV modül sıcaklığını kontrol etmenin yanı sıra bina iç iklim kontrolü ile entegre edilmesi araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

Hasan vd., (2015, 2014) yaptıkları diğer çalışmalarda ise 2 farklı erime sıcaklığına sahip FDM'nin (22,5 °C yağ asidi ve 29,8 °C tuz hidratı) iki farklı iklime sahip bölge (İrlanda ve Pakistan) altındaki etkinliğini deneysel ve sayısal olarak test etmişlerdir. Çalışmalarda FDM katmanının ısıl iletkenliğin artırılması amacıyla düşey dikdörtgen kesitli kanatçıklar ilave edilmiş bir FDM deposu kullanılmıştır. Sıcak bölgede yapılan deneylerde tuz hidratı yağ asidine kıyasla ortalama 3 – 4 °C daha fazla sıcaklık düşüşü sağlamış ve elektriksel güç kaybını %3 daha fazla engellemiştir. Ayrıca sıcak bölgelerde ısıl yükün yüksek olması ve buna bağlı artan soğutma ihtiyacı nedeniyle PV-FDM sistemlerinin bu bölgeler için daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Hasan vd., (2016), diğer bir deneysel çalışmada ise, aynı PV- FDM sisteminin bina üzerine entegrasyonu ve sıcak bölge performansını test etmişlerdir. Çalışmada hem PV panelin hem de bina iç bölgesinin termal davranışı birbirini takip eden günler için araştırılmıştır. FDM destekli ısı alıcısı sayesinde, PV panelin ön ve arka yüzey sıcaklıkları sırasıyla 12,3 °C ve 22,6 °C azalma göstermiş, panelin güç çıktısı ise maksimum %7,2, günlük ortalama ise %5,5 artış göstermiştir.

Kant vd., (2016), yaptıkları sayısal bir çalışmada bir PV- FDM sistemin termal ve elektriksel davranışını analiz etmişlerdir. Çalışmada PV panel arkasına ısı alıcı olarak 20 mm kalınlığında FDM (RT-35) kullanılmış olup, yerleşim açısı, rüzgâr hızı ve farklı iki sayısal model araştırma parametresi olarak dikkate alınmıştır. Panel arkasına FDM destekli ısı alıcı yerleşimiyle erişilen en yüksek panel sıcaklığı ortalama 6°C düşmüş, günlük ortalama enerji üretimi %5 artış göstermiştir. Rüzgâr hızının 2m/s'den 4 m/s'ye artması durumunda ise sistemden dış ortama atılan ısının artmasıyla erişilen maksimum panel sıcaklığı yaklaşık 3 °C düşüş göstermiştir. İlgili panelin daha dik açıyla (30°'dan 60°'ye konumlandırılmasıyla ise FDM içerisindeki doğal taşınım etkisi güçlenmiş ve bunun sonucunda ısı transferi iyileşerek maksimum sıcaklık 1,5 °C daha düşüş göstermiştir.

Pasif PV-FDM sistemler üzerine başka bir çalışma ise Stropnik ve Stritih (2016) tarafından yapılmıştır. Çalışmada termal regülasyon amacıyla PV panel arkasına doğrudan temaslı halde 35 mm kalınlığında bir RT-28HC tabakası yerleştirilmiş ve panelin sıcaklık-verim ilişkisi izlenmiştir. Dış ortamlarda gerçekleştirilen deneylerde, ısı alıcısız durum için panel sıcaklığı maksimum 75,2 °C olarak ölçülürken PV-FDM sistem için bu sıcaklık 44°C olarak ölçülmüştür. Farklı aylar için TRNSYS yazılımıyla yapılan tahminler neticesinde ise, elektrik enerjisindeki artışın uygulanan pasif sıcaklık kontrolü sayesinde %4,3-8,7 arasında değişen oranlarda arttığı ifade edilmiştir.

Khanna vd., (2017) konvansiyonel prizmatik hacimli bir PV-FDM sisteminin ısıl davranışına, yerleşim açısının, rüzgâr hızı, ortam sıcaklığı ve FDM erime nokta sıcaklığı gibi parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Analiz sonuçları, dikkate alınan değer aralığında rüzgâr hızındaki artışın ve ortam sıcaklığındaki azalmanın, sistemden ortama transfer olan ısıyı önemli ölçüde artırdığını ve PV sıcaklığını 14 °C'ye kadar azaltabildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, panelin daha dik açıyla yerleşmesi durumunda, FDM içerisindeki doğal taşınım güçlendiği ve panelin yatay konumdan dikey konuma gelmesi durumunda maksimum sıcaklığın 8 °C'ye kadar azaldığı hesaplanmıştır. FDM erime sıcaklığı

azaldığında ise, panel daha düşük sıcaklıkta tutulabilmiş, fakat erken tamamlanan erime sonucu ilerleyen süreçte daha yüksek PV sıcaklıklarının elde edildiği gösterilmiştir.

Khanna vd., (2018b) yaptıkları diğer bir çalışmada ise konvansiyonel bir PV-FDM sisteminin farklı çevresel koşullar ve gerekli FDM ihtiyacı ilişkisi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, günlük ısıl yükün artmasıyla, sistemde gereken FDM miktarının orantılı olarak artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca rüzgâr açısında azalma, rüzgâr hızında artış, ortam sıcaklığında düşüş gibi çevre ortama ısı atılımını artırıcı faktörlerin ise soğutma için gerekli FDM miktarını efektif bir şekilde azalttığını ortaya koymuşlardır.

Nouira & Sammouda, (2018) konvansiyonel bir PV-FDM sisteminin termal ve elektriksel davranışını farklı çevresel faktörler altında sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında, yerleşim açısı, FDM erime sıcaklığı, FDM tabaka kalınlığı, rüzgâr hızı ve bunlara ek olarak panel üzerinde biriken toz miktarı çalışma parametreleri olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada FDM'in erime sıcaklığındaki artışın erişilen en yüksek PV sıcaklığını düşürdüğü belirlenmiştir. İlgili sıcaklıklar, ısı alıcısız durum için 76 °C'ye ulaşırken, maksimum sıcaklık 2 cm RT-25, RT-35 ve RT-44 için sırasıyla 65 °C, 68 °C ve 69 °C olarak belirlenmiştir. FDM kalınlığının 3 cm'ye çıkmasıyla ise ısı alıcının gizli ısı depolama kapasitesi artmış ve RT-44 için maksimum PV sıcaklığı düşerek 56 °C olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, rüzgâr hızının 1 m/s'den 4 m/s'ye çıkmasıyla ise sistemin çevreye ısı atılım kabiliyeti önemli ölçüde artmış ve buna bağlı olarak faz dönüşüm hızı düşerek maksimum PV sıcaklığında yaklaşık 16 °C azalma belirlenmiştir.

Rajvikram vd., (2019) 5W nominal güce sahip bir PV-FDM sisteminin günlük performansı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, panel üzerinde biriken ısının pasif olarak uzaklaştırılması amacıyla 30 mm kalınlığında 29 °C erime sıcaklığına sahip organik bir FDM kullanılmıştır. Ayrıca FDM arkasında termal direncin düşürülmesi için alüminyum plaka tercih edilmiştir. Dış ortamda yapılan deneylerde, ısı alıcısız panel için maksimum sıcaklık 59 °C olarak kaydedilirken PV- FDM sistemi için bu sıcaklık 47,7°C olarak kaydedilmiştir. Bu sıcaklık düşüşüne karşılık anlık maksimum elektriksel verim kazancı ise %4 olarak tayin edilmiştir.

Aneli vd., (2021), farklı mevsim koşulları altında RT-28 ve RT-35 kullanılan bir PV-FDM sisteminin termal davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Kış şartlarında yapılan analizlerde panel sıcaklığının 28 °C'yi aşmadığı ve FDM entegrasyonun panel sıcaklığı üzerinde etkisi olmadığı belirtilmiştir. Yaz şartlarında yapılan analiz sonuçları, RT-28'in

panel sıcaklığını belirli bir süre boyunca daha düşük seviyede tuttuğunu, fakat hızlı gerçekleşen erime sonucu meydana gelen ani sıcaklık artışıyla RT-28'li sistemin sıcaklığının RT-35'li sistemin üstüne çıktığı belirlenmiştir. Sonbahar şartlarında ise, ışınım ve ortam sıcaklığının düşmesine bağlı olarak bu olumsuzluk gözlemlenmemiş ve RT-28 kullanan sistem en iyi performansı vermiştir. FDM'lerin gece katılaşma süreci incelendiğinde ise RT-28'in yaz şartlarında gece tamamen katılaşamadığı ve buna bağlı olarak bir sonraki gün sistemin soğutma kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir.

Díaz vd., (2022) pasif PV-FDM sistemleri üzerine yaptıkları sayısal bir çalışmada, erime sıcaklıkları 18 °C ile 30 °C arası değişen yedi farklı FDM'nin, kurak ve yarı-kurak iki mevsim koşulu altında ortaya koyduğu performans araştırılmıştır. İncelenen tüm FDM kalınlıkları ve mevsim koşulları için en iyi soğutma performansı ve en yüksek elektrik çıktısı $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ kullanımıyla elde edilmiştir. Özellikle yarı-kurak bölgede yaz ve sonbahar mevsimlerinde 40 mm FDM kullanımıyla PV sıcaklığında 17°C'ye kadar düşüş ve yıllık elektrik üretimini %5 oranında artış sağlanmıştır.

Maghrabie vd., (2023), konvansiyonel bir PV-FDM sisteminin termal ve elektriksel davranışı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında PV panelin ön yüzeyindeki sıcaklık dağılımı, farklı FDM (RT-42) kalınlıkları ve yerleşim açıları için hem termoelemanlar üzerinden hem de bir termal kamera ile takip edilmiştir. Panel sıcaklığındaki maksimum azalma, artan gizli ısı kapasitesinin ve iyileşen doğal taşınımlı ısı transferinin bir sonucu olarak incelenen en geniş FDM kalınlığı (3 cm) ve en dik açı (30°) altında elde edilmiştir. Ayrıca termal kamera görüntüleri, FDM içerisindeki doğal taşınım hareketine bağlı olarak panelin üst kısmında sıcaklığın daha yüksek seyrettiğini, alt ve üst bölgeler arası bu farkın 15° açı için %17'ye ulaştığını ortaya koymuştur.

Qu vd., (2024a) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bir PV-FDM sisteminin güç çıktısı ve ortam sıcaklığı arası ilişki incelenmiştir. Deneyler, 7,3 °C, 14,1 °C ve 20,7 °C ortam sıcaklıklarında, 1000 W/m² ışınım şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre, ortam sıcaklığı arttıkça FDM'nin soğutma etkisinin arttığı ve sıcaklığa bağlı güç düşüşünün daha yüksek oranda düşürülebildiği ifade edilmiştir. FDM uygulaması PV ön yüzey sıcaklığını, ortam sıcaklığına göre sırasıyla 33,94 °C, 30,34 °C ve 26,77 °C düşürmüş, güç verimliliğini ise %1,63, %1,59 ve %1,55 oranında iyileşmiştir.

Qu vd. (2024b) tarafından yürütülen diğer bir çalışmada ise, FDM'in PV panel üzerindeki pasif soğutma performansı farklı panel eğim açıları altında analiz edilmiştir. Araştırmada, 42 °C erime noktasına sahip 30 mm kalınlığında organik parafin FDM

kullanılarak farklı eğim açılarında (15°, 30°, 45° ve 60°) PV- FDM sistemlerinin sıcaklık ve elektriksel performans çıktıları incelenmiştir. Sonuçlar, panel eğim açısı arttıkça sistem sıcaklığının düştüğünü ve FDM'nin soğutma etkisinin güçlendiğini göstermiştir. Özellikle 60° eğim açısında, PV- FDM sisteminin maksimum güç çıktısının 13,34 W'a, verimliliğinin %16,1'e ve doluluk faktörünün (FF) 0,75'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, PV-FDM sistemlerinin eğim açısının optimize edilmesi ile verimliliğin artırılabileceğini ve bu tür entegre sistemlerin PV ömrünü uzatılabileceğini vurgulamışlardır.

1.7.2. PV-FDM Sistemleri İçin Farklı Isı Alıcı Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Konvansiyonel PV-FDM sistemler üzerine yapılan çalışmaların açıkça ortaya koyduğu üzere FDM'ler, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde PV panellerin pasif olarak soğutulması amacıyla kullanılabilmektedirler. Bu gurubun içerisinde yer alan parafinler ise kararlı faz dönüşüm karakteristikleri nedeniyle PV-FDM sistemlerinde en sık tercih edilen FDM türü olmaktadırlar. Fakat parafinlerin düşük ısıl iletkenlikleri ısı transfer hızını limitlemekte ve termal regülasyon süresi boyunca PV panel sıcaklığının erime sıcaklığına kıyasla daha yüksek seyretmesine neden olmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar, PV-FDM sistemler içerisinde, kanatçık, nanoparçacık, metal matris, metal köpük veya grafit yapılar gibi farklı ısıl iletkenlik artırıcı önlemler almaktadırlar. Bu kapsamda yapılan bazı önemli çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Huang vd., (2006) yaptıkları çalışmada, önceki yıllardaki çalışmalarına ek olarak FDM tabakası içerisindeki ısıl iletkenliğin artırılması ve panel sıcaklığının kanatçık ilavesiz ısı alıcısına kıyasla daha fazla düşürülmesi üzerine odaklanmışlardır. Bu kapsamda FDM içerisinde farklı kanatçık düzenlemeleri dikkate alınmıştır. 750 W/m² ışınım altında yapılan deneyler, kullanılan kanatçık sayısındaki artışa bağlı olarak yüzey sıcaklığını 63°C'den 27 °C'ye kadar düşürdüğünü göstermiştir. Fakat sonuçlar aynı zamanda, panel sıcaklığındaki düşüşle beraber sıcaklık kontrol süresinin kısaldığını da göstermiştir. Bu durumun artan ısı transfer hızı sonucu hızlanan erime süreciyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Atkin & Farid, (2015) ise, PV hücre verimliliğini korumak amacıyla FDM ve grafit katkılı bir ısı alıcı kullanmışlardır. Çalışmada, PV hücrelerinin sıcaklıklarını düzenlemede, ısı alıcısız, grafit+FDM, yalnızca alüminyum kanatçıklı ve grafit+ FDM+kanatçık olmak üzere 4 yöntem deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler laboratuvar ortamında yapılmış olup PV sıcaklığı ve güç çıktısındaki değişim 12 ve 18 saatlik ışınım uygulaması için takip

edilmiştir. İncelenen düzenlemeler içerisinde en yüksek verimlilik artışı %12,97 ile grafit+ FDM+kanatçıklı durumdan elde edilmiştir. Isıl iletkenliğin artırılması amacıyla grafit infüzyonlu FDM'nin kanatçıkla birlikte kullanılmasının PV hücrelerinin sıcaklık regülasyonunda etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Parafin/grafit kompozit FDM ile sıcaklık kontrolü üzerine diğer bir çalışma Luo vd., (2017) tarafından yapılmıştır. Çalışma deneysel ve sayısal olarak yürütülmüş olup panel arkasında form-stabil parafin/grafit yapı kullanılarak termal iletkenliğin artırılması ve sıcaklık kontrolünün iyileştirilmesi hedeflenmiştir. 901 W/m² ışınım altında yapılan deneylerde maksimum ısı alıcısız panel sıcaklığı 61 °C olarak belirlenirken bu sıcaklık FDM katkılı ısı alıcılı durumda 4°C daha düşük belirlenmiştir. Fakat sonuçlar FDM'nin erimesiyle birlikte panel sıcaklığının tekrar hızla artmaya başladığını ve ısı alıcısız panel sıcaklığını geçtiğini göstermiştir. Bu durum, FDM'nin faz dönüşümünü tamamlaması ve düşük ısıl iletkenliğin bir sonucu olarak PV panel arkasında termal direncin artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

(Khanna vd., 2019, 2018a, 2018b) kanatçık ilaveli ısı alıcılı PV- FDM sistemlerinin farklı ortam şartlarındaki etkinliği ve optimizasyonu üzerine bir dizi çalışma yapmışlardır. Çalışmalarda, ısı alıcılarına ilave edilen kanatçıkların sayı, kalınlık, derinlik gibi parametrelerin optimum değerleri farklı ortam şartlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Ayrıca ilgili sistemlerin farklı mevsim koşulları altında sunduğu performanslar da Khanna vd., (2018c) araştırmacılar tarafından sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışma sonuçları genel olarak, ısı transfer yüzeyinin artmasıyla ısı transfer hızının arttığı ve buna bağlı maksimum PV sıcaklığının 6 °C'ye kadar azaldığı göstermiştir. Fakat artan ısıl iletkenliğin sonucu olarak erimenin daha erken tamamlandığı ve bu nedenle termal regülasyonun devamlılığı için ısı alıcı içerisinde daha fazla FDM'e ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Ortam şartları dikkate alındığında ise, rüzgâr hızında azalma, ortam sıcaklığında ve ışınım şiddetinde artma gibi ısıl yükü artıran değişimlerin, kanatçık destekli ve desteksiz ısı alıcıları arasındaki performans farkını daha belirgin hale getirdiği ortaya konmuştur.

Abdulmunem & Jalil (2018), alüminyum kanatçık ve FDM destekli ısı alıcısının maksimum PV panel sıcaklığına ve elektriksel parametreler üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sabit ışınım altında, yalnızca FDM destekli ısı alıcı kullanımıyla panel sıcaklığının %18,3 oranında düştüğü, kanatçık ve FDM destekli ısı alıcının kullanılmasıyla bu düşüşün %27,8 seviyesine çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak, sadece FDM kullanıldığında maksimum güçte %9,84 ve doluluk faktöründe

%5,1 oranında iyileşme sağlandığı, FDM ve kanatçıkların birlikte kullanımında ise bu iyileşmelerin sırasıyla %14,19 ve %7,37 seviyelerine ulaştığı rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca alüminyum kanatçıkların sistem içerisinde sıcaklık dağılımını iyileştirdiği, fakat artan iletkenlik sonucu FDM'nin erime süresinin 3 cm FDM katmanı için 14 dakika kadar kısaldığı tespit edilmiştir.

Nada vd., (2018) yaptıkları deneysel bir çalışmada nano katkılı bir PV-FDM sisteminin performansını incelemişlerdir. Çalışmada FDM olarak RT-55 kullanılmış olup FDM içerisine iletkenliğin artırılması amacıyla %2 oranda Al_2O_3 nanoparçacık eklenmiştir. Dış ortam deneylerinde ısı alıcısız durum için en yüksek PV sıcaklığı 75 °C olarak kaydedilirken bu değer katkısız FDM'li durum için 63 °C ve yüksek iletkenliğe sahip nano katkılı FDM için 57 °C olarak kaydedilmiştir. PV sıcaklığında elde edilen düşüş ile günlük ortalama 5,7 W'lık bir enerji kazancı elde edilmiştir.

Abdelrahman vd., (2019) yaptıkları çalışmada nanoparçacık ile zenginleştirilmiş FDM (NEPCM) destekli ısı alıcıyla bütünleştirilmiş bir PV panelin ısıl davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada ısıl iletkenliğin artırılması amacıyla ısı alıcısında dairesel kesitli kanatçıklar ve farklı oranlarda (%0,11-%0,77) Al_2O_3 nanopartikül ilaveli FDM (RT-35HC) birlikte kullanılmıştır. Çalışma kapsamında deneyler, kanatçık alan oranının %1,29-2,57, partikül oranının %0,11-0,77 ve ısıl yükün 279-820 W/m^2 arasında değişen değerleri için yapılmıştır. Çalışmada, artan ısıl iletkenliğin bir sonucu olarak panel yüzey sıcaklığı, kanatçık alan oranının %2,57 değeri için %46,3 (35 °C) azalma göstermiştir. Bu değer, nanopartikül ilavesiyle %52,3'e (40 °C) kadar çıkarılmıştır.

Qasim vd., (2020), PV- FDM sistemlerde, farklı kanatçık sayılarıyla ve iki farklı FDM katmanıyla desteklenmiş ısı alıcılarının kullanımını üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. İlk düzenlemede panel arkasına RT-35, tek katmanlı ve 2-11 arası değişen sayılarda kanatçık destekli olarak yerleştirilerek hücre sıcaklığındaki değişim belirlenmiştir. İlgili durumda PV sıcaklığındaki en yüksek düşüş, 11 kanatçık için 26,5 °C, maksimum güç çıktısındaki artış ise %13,3 olarak belirlenmiştir. İkinci düzenlemede ise ikinci bir FDM (RT-44) birinci katmanın arkasına farklı sırayla ve tekrar kanatçık destekli bir şekilde yerleştirilmiştir. Yapılan bu düzenleme ile sistem performansına genel olarak artış sağlanamamış ve en yüksek performans tek katman ve düşük erime sıcaklığına sahip FDM ile elde edilmiştir.

Velmurugan vd., (2020), PV panellerin soğutulması için yenilikçi bir FDM matrisi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada alüminyum silindirik tüplerden oluşan

matris, PV panele fiziksel temas etmeyecek şekilde 6-12 mm arası değişen mesafeler ile yerleştirilmiştir. Yapılan bu uygulamayla, matrisin panel arkasında oluşturduğu termal direncin azaltılması ve buna ek olarak panel ve matris arasındaki ısı transferine ışınımın da dâhil edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar, 6 mm boşluklu FDM matrisinin en etkili soğutma performansını sunduğu ve PV panel sıcaklığını maksimum 2,5 °C düşürerek % 0,2'lik bir verim artışı sağladığını göstermiştir.

Charles Divyateja vd., (2021) yaptıkları sayısal çalışmada, kanatçık ilaveli bir FDM destekli ısı alıcısına nanoparçacık ilavesinin (NEPCM), PV panel soğutma performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada yatay yerleşimli bir PV- FDM sistemi dikkate alınmış olup analizler farklı kanatçık sayıları ve partikül hacim oranları için yapılmıştır. Yalnızca FDM'nin kullanıldığı durumda düşük ısıl iletkenlik ve yatay yerleşime bağlı zayıf doğal taşınım sebebiyle panel sıcaklığı sürekli artış göstermiş ve en yüksek panel sıcaklığı 120 dakikanın sonunda yaklaşık 52 °C olarak belirlenmiştir. Kanatçık ilavesiyle bu artış önemli ölçüde azalmış ve maksimum sıcaklık 3 kanatçık ilaveli durum için 37 °C'ye düşürülmüştür. Kanatçıklara ek olarak, FDM içerisine yapılan %4 CuO ilavesiyle ısıl iletkenlik güçlenmiş ve panel sıcaklığı 100 dakika boyunca ortalama 2 ℃ daha düşük seyretmiştir.

Duan (2021), eğimli PV panellerin soğutulması için FDM-porous (gözenek) düzenlemesinin etkinliği ve optimizasyonu üzerine deneysel ve sayısal bir araştırma yapmıştır. Çalışmada gözenekli yapı olarak bakır metal köpük yapı kullanılmış olup 0°- 90° arasında farklı eğim açılarında ve çeşitli Rayleigh sayılarına göre sistemin soğutma verimliliği sadece FDM'in kullanıldığı duruma kıyasla incelenmiştir. Sonuçlar, gözeneklilik oranının düşmesiyle ısıl iletkenliğin arttığı ve buna bağlı olarak panel sıcaklığının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Ayrıca sonuçlar, metal köpük kullanımıyla erime hızının sistem açısına olan bağlılığını büyük ölçüde azalttığını ortaya koymuştur.

Senthil Kumar vd., (2021), PV- FDM sistem performansına kalsiyum karbonat, silikon karbür ve bakır nanopartikül katkılı FDM kombinasyonlarının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, yalnızca PV panel ve NEPCM destekli PV panel olmak üzere iki düzenleme dikkate alınmıştır. Çalışma sonuçları NEPCM'li sistemin maksimum PV sıcaklığının, ısı alıcısız duruma kıyasla ortalama 4,4 °C daha az olduğunu ve buna bağlı elektriksel verimlilikte %2,2'lik bir artış sağlandığını göstermiştir.

Rabie vd., (2021), yoğunlaştırılmış ışınım altındaki bir PV - FDM sisteminin kanatçık ilavesiyle performans artırımı üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Isı alıcılarında alüminyum yatay kanatçıklar kullanılmış olup, PV+kanatçık, PV + FDM, PV-FDM+iç

kanatçık, PV-FDM+iç+dış kanatçık olmak üzere 4 farklı sistem düzenlemesi dikkate alınmıştır. Çalışmada, FDM'nin erime sürecinin tamamlanmasının ardından PV sıcaklığının hızla artarak kabul edilebilir değerlerin üstüne çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum PV-FDM+iç-dış kanatçık düzenlemesiyle büyük oranda giderilmiş ve ilgili sistem en iyi performansı sağlamıştır. Bu düzenlemeyle sistemin çevreye ısı yayılım kabiliyeti artmış ve erimenin tamamlanması ardından gözlemlenen sıcaklık artışı 15 mm FDM için yaklaşık 60 °C düşürülmüştür.

Al-Najjar vd., (2022) tarafından yapılan sayısal çalışmada, arka dış katmanına metal köpük yapı iliştirilmiş bir PV- FDM sisteminin termal davranışı incelenmiştir. Çalışmada ilgili sistem, farklı FDM kalınlıkları, metal köpük için taşınım katsayıları ve ortam koşulları altında geniş çapta ele alınmıştır. Sonuçlar, FDM kalınlığı ve yerleşim açısı için doğrusal bir değişim ortaya koyarken, ortam koşulları ve PV sıcaklığı arasında doğrusal olmayan bir değişim ortaya koymuştur. Sonuçlar ayrıca, metal köpük katmanının ısı alıcısının arka yüzeyinden ısı atılımını kuvvetlendirmesi sonucu PV hücre sıcaklığını yaklaşık 12 °C kadar düşürülebileceğini ve FDM erime süresinin %127 oranında uzatılabileceğini göstermiştir.

Moein-Jahromi vd., (2022) çalışmalarında, yoğun ışınıma maruz bırakılan PV- FDM sisteminin sıcaklık yönetiminin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada FDM içerisine grafen nanoplatelet (GNP) ve bakır oksit (CuO) ilave edilerek oluşturulan kompozit FDM'ler panel arkasına entegre edilmiştir. Saf FDM'e kıyasla, %3 oranında GNP-CuO hibrit kompozit NEPCM'in %91,81 oranında daha yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip olması sayesinde panel sıcaklığı 6,6 °C daha düşürülmüş ve elektriksel güç üretiminde %3'lük bir artış sağlanmıştır.

Al-Lami vd., (2022), FDM destekli ısı alıcıyla soğutulan ve depo arka iç yüzeyi kanatçık ilavesiyle düzenlenmiş bir PV-FDM modülünün yüksek ortam sıcaklık koşulu altındaki elektriksel performansı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneylerde, referans PV panelin arka yüzey sıcaklığının 80 °C ulaştığı, modifiye edilmiş PV- FDM uygulamasıyla bu sıcaklığın başarılı bir şekilde 60 °C'ye düşürüldüğü belirtilmiştir. Sağlanan termal regülasyon sayesinde ise maksimum çıkış gücünde %36,1–38,4 oranında bir artış sağlanmıştır.

Sharaf vd., (2022), PV panelin termal regülasyonu amacıyla metal köpük+FDM destekli bir ısı alıcısı kullanımının yıllık enerji ve ekserji performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, temmuz ayında yapılan deneylerde PV-FDM ve PV-FDM-AMF (alüminyum metal köpük) sistemleri için PV sıcaklıkları, referans PV'ye kıyasla sırasıyla

%8,1 ve %13,4 oranında daha düşük elde edilmiştir. Kışın ise bu oranlar sırasıyla %3,8 ve %5 seviyelerinde kalmıştır. Çalışma, PV- FDM-AMF sisteminin yüksek ısıl iletkenliği sayesinde, ısı atılımına en çok ihtiyaç duyulan sıcak yaz aylarında daha yüksek verim artışı elde edildiğini göstermiştir.

Khanna vd., (2022), PV- FDM sistemler için sıcaklık yönetiminin iyileştirmeyi amaçlayan termal iletkenlik artırıcı konteynerler (TCEC) üzerine deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. TCEC'ler, FDM'yi çevreleyen tüm yüzeylerden FDM'ye ısı geçişini sağlayarak ısı transfer hızı ve şarj verimliliğini artırmıştır. Ayrıca ilgili uygulamayla konvansiyonel duruma kıyasla daha üniform bir erime profili elde edilmiştir. Chennai-Hindistan ve Portsmout-İngiltere iklim koşullarında yapılan analizler, TCEC destekli FDM kullanıldığında PV elektriksel verimliliğinin %17,6'dan %19,2'ye yükseldiğini ve ortalama termal enerji depolama hızının 249 W/m²'den 302 W/m²'ye çıktığını göstermiştir.

Metal matris ile zenginleştirilmiş FDM ile PV panellerin soğutulmaları üzerine diğer bir çalışma ise Homlakorn vd., (2023) tarafından yapılmıştır. Çalışmada FDM'nin dış ortama ısı yayılımının iyileştirilmesi amacıyla dış yüzeyi kanatçık ilaveli bir FDM deposu tercih edilmiştir. Metal örgü ile güçlendirilmiş FDM destekli ısı alıcılarının, maksimum PV sıcaklığını 10 °C düşürdüğü ve modülün elektriksel verimliliğinde %5,04 oranında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada, matris ilaveli FDM konteynerinin yüksek sıcaklıkların yaşandığı tropik iklim koşullarında PV verimliliğini artırmak için etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Bria vd., (2023), FDM (RT42) ve kanatçık destekli ısı alıcılı bir PV-FDM sisteminin ısıl davranışı ve termoekonomik analizi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Analizlerde FDM'nin erime davranışı ve panel sıcaklığı zaman bağımlı olarak ortaya konmuştur. Çalışmada dikkate alınan aralık içerisinden 60 mm FDM kalınlığının, performans ve malzeme ihtiyacı yönünden en uygun performansı sağladığı belirlenmiştir. 60 mm FDM kullanımıyla 40 mm'den 70 mm'e artırılmasıyla, en yüksek PV sıcaklığı 77 °C'den 54 °C'ye düşürülmüş, anlık en yüksek güç çıktısı ise yaklaşık %50 artırılmıştır.

Praveen Kumar vd., (2023), düşük üretim maliyetini hedefleyen bir PV-FDM sistem tasarımı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada pasif soğutma amacıyla çinko nanoparçacık katkılı FDM, panel boyutlarına kıyasla ufak hacimli depolar içerisinde PV panel arkasına yerleştirilmiştir. Ayrıca belirli sayıda zig-zag formunda alüminyum kanatçıklar, doğal hava taşınımlı ısı transferinin iyileştirilmesi için panel arkasına entegre edilmiştir. İncelenen durumlar içerisinde en iyi performans reflektör-PV-

FDM+nanoparçacık sistemiyle elde edilmiş olup maksimum PV sıcaklığındaki azalma ve güç artışı sırasıyla 22 °C ve % 18,16 olarak belirlenmiştir.

Unnikrishnan vd., (2023), PV- FDM sistemlerinde kanat şekli, kanat sayısı, uzunluğu, sistem eğiminin termal regülasyon ve verime etkisi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada yer alan ısı alıcılarında kare ve dairesel kesitli kanatlar dikkate alınmış olup yalnızca PV, kanatçık ilavesiz FDM ve kanatçık ilaveli FDM yapılandırmaları karşılaştırılmıştır. İncelenen ısı alıcı düzenlemeleri arasında en yüksek sistem performansı dikkate alınan tüm eğim açıları ve kanatçık sayıları için kare kesitli kanat geometrisiyle ortaya koymuştur. Bu durum kare kesitin daha fazla ısı transfer alanı sunmasıyla açıklanmıştır. Özellikle, 45° eğimde ve 16 kare kanat içeren ısı alıcısıyla, en düşük PV sıcaklığı ve maksimum verim artışı sağlanmış, panel sıcaklığında 57,56 °C azalma ve verim değerinde %43.47 artış elde edilmiştir.

Bestas vd., (2024) yaptıkları bir deneysel bir çalışmada, RT-35'e farklı yüzde oranlarda eklenen Al_2O_3 nanoparçacıkların PV-FDM performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında referans PV, PV-FDM ve PV-NEPCM (%0,05-%0,15) üzerinde deneyler dış ortamda gerçekleştirilmiştir. İncelenen durumlar içerisinde ortalama en düşük PV sıcaklığı ve en yüksek hücre verimliliği en çok nanopartikül içeren sistem olan PV-NEPCM (%0,15) ile elde edilmiştir. Bu sistem ile ortalama PV sıcaklığı 6,43 °C düşürülmüş ve güç çıktısı %12 artmıştır.

Moein-Jahromi vd., (2024), yoğunlaştırılmış fotovoltaik (CPV) hücrelerin FDM ile soğutma performanslarının iyileştirilmesi için yeni ısı alıcı tasarımları üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında, FDM'nin erime davranışına uygun tasarlanan farklı kenar oranlarına sahip, kanatçık ilaveli ve ilavesiz trapez depo geometrileri ve arka yüzeyi zig-zag formunda çıkıntılara sahip depo geometrileri dikkate alınmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacıyla konvansiyonel metal köpüklü ve kanatçık ilaveli prizmatik PV-FDM sistemleri de araştırmaya dâhil edilmiştir. Sonuçlar, küçük üçgen kanatçık ilaveli trapez geometriye sahip ısı alıcının ortalama CPV sıcaklığını 22 °C azalttığını, FDM'in toplam erime süresini %50 kısalttığını ve panelden emilen ısı miktarını %7,43 artırdığını ortaya koymuştur.

Mahdavi vd., (2024), pasif PV-FDM sistemlerin soğutma performansına farklı kanatçık geometrilerinin etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında tasarlanan ısı alıcılarında iğne kanatçık, Y-kanatçık ve yay kanatçık gibi üç farklı kanatçık geometrisi dikkate alınmıştır. Sonuçlar, iğne kanatçıkların diğer kanatçık

geometrilerine kıyasla daha yüksek ısı transferi sağladığı ve panel sıcaklığını daha fazla düşürdüğünü göstermiştir. Çalışmada, ısı alıcısız durumda PV sıcaklığının 85 °C'yi aştığı ve bu sıcaklığın 3 cm - 100 adet iğne-kanatçık ilavesiyle 64.5 °C seviyesine düştüğü görülmüştür. Sağlanan bu termal regülasyonla ise elektriksel verimde %4'lük bir artış elde edilmiştir.

Refaey vd., (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli yüzey yapılarındaki kanatçıkların, PV panelle bütünleştirilmiş bir PV paneli soğutma performansına etkilerini incelenmiştir. RT42 FDM kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, 510-850 W/m² arası ışınım şiddetleri altında, yarı silindirik, üçgen ve dikdörtgen şeklinde üç farklı alüminyum kanatçık geometrisi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üçgen kanatçıklı RT42 sistemi en yüksek radyasyon yoğunluğunda (850 W/m²) PV panel yüzey sıcaklığını %19,4 oranında düşürürken panelin elektriksel verimliliğini %8,4 oranında artırmıştır. RT42'nin, daha yüksek termal dayanıklılık sağlaması ve daha hızlı katılaşması nedeniyle RT35'e göre daha uzun ömürlü bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır.

Unnikrishnan vd., (2024) çalışmalarında, PV'lerin FDM ile pasif soğutma performansının iyileştirilmesi için, zigzag kesitli kanatçıklar entegre edilmiş FDM destekli bir ısı alıcının optimizasyonu üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, 0, 15 ve 30 derecelik eğim açıları altında 750 W/m² ışınıma maruz bırakılan referans PV, PV- FDM ve kanatçıklı PV-FDM sistemleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, tüm eğim açılarında 4 kanatçık ilaveli sistemin en iyi performansı sergilediğini göstermiştir. 4 kanatçıklı sistemle PV sıcaklığında elde edilen düşüş 0° ve 30° eğim açıları için sırasıyla 38,6 °C ve 30° olarak belirlenmiştir. Sistem verimliliğinde 0°'de %28,1 ve 30°'de %22,3 oranında bir artış gözlenmiştir.

Literatür özeti kapsamında sunulan bu çalışmalar, PV panellerin çalışma saatlerinde oluşan ısıl yüklerin yönetiminde FDM destekli ısı alıcılarının kullanımının etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, literatürde pasif PV-FDM sistemlerin etkinlikleri, bu çerçevede geniş bir parametre aralığında incelenmiştir. Konunun daha etkili anlaşılması adına sunulan çalışmaların bulguları maddeler halinde aşağıda verilmiştir. Bu maddeler, pasif soğutmalı PV-FDM sistemlerinin ısıl davranışlarına dair genel bir özet niteliği taşımakta olup bu doktora tezinin ana fikrinin şekillenmesine katkı sağlamıştır.

- FDM destekli ısı alıcıları, entegre edildikleri PV paneller üzerinde belirli bir süre boyunca pasif soğutma (termal regülasyon) sağlamaktadır. Bu süreçte sıcaklığa bağlı verim kaybı pasif olarak belirli bir süre engellenebilmekte, ancak ilgili süre

ve sistemin ısıl davranışı, kullanılan FDM'nin türü, erime sıcaklığı, miktarı ve ortam koşulları gibi faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik göstermektedir.

- FDM'nin erime süresi, sistemin soğutma süresini belirleyen temel unsurlardan biridir. Erimenin devam ettiği süre boyunca FDM'ye transfer edilen ısı büyük ölçüde gizli ısı olarak depolanmakta ve bu süreçte FDM sıcaklığındaki artış minimum seviyede seyretmektedir. Bu durum, PV panelden çekilen ısı sayesinde panel sıcaklık artışını önemli ölçüde yavaşlatmaktadır.
- Erime büyük oranda tamamlandığında FDM'nin panel üzerindeki soğutma etkisi sona ermekte ve panel sıcaklığı hızla yükselişe geçmektedir. Erime sonrası sıcaklığı yükselmiş olan ve düşük ısıl iletkenliğe sahip FDM'nin panel arkasında oluşturduğu termal direnç nedeniyle bu sıcaklık anlık olarak ısı alıcısız PV panelin sıcaklığının üzerine çıkabilmektedir. Özellikle, FDM kapasitesinin günlük ışınım miktarına kıyasla yetersiz kaldığı durumlarda bu durum gerçekleşebilmekte ve elektriksel verim üzerinde olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle, anlık sıcaklık düşüşlerinin yanı sıra, ısı alıcı tarafından sağlanan soğutma süresi de günlük ortalama verimin korunması açısından kritik öneme sahiptir.
- FDM'lerin düşük ısıl iletkenlikleri (0,2–1 W/mK), PV panel ve FDM arasındaki ısı transfer hızını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu durum, FDM katmanı içerisinde ısının yayılımını yavaşlatmakta ve panel yüzeyine yakın bölgelerde yoğun duyulur ısı depolanmasına yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak panel sıcaklığı, hedeflenen değerlerin (FDM'nin faz dönüşüm sıcaklığının) üzerinde seyredebilmektedir.
- Doğal taşınım hareketi, düşük ısıl iletkenliğin etkisiyle zamanla FDM içerisindeki ısı transferini yönlendiren baskın mekanizma haline gelmektedir. Bu durum, PV panelden çekilen ısının FDM katmanının üst bölgelerine doğru ilerlemesine ve bu bölgelerde erken faz dönüşümü gerçekleşmesiyle sonuçlanmaktadır. Bunun neticesinde PV panelin alt ve üst bölgeleri arasında sıcaklık farkı oluşmakta ve bu durum, termal gerilmeler nedeniyle panelin ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir.
- Literatürde ısıl iletkenliği artırıcı yöntemler, bu tür olumsuzlukları gidermek için kullanılmaktadır. Bu doğrultuda araştırmacılar, FDM içerisine metal kanatçık, metal matris ve nanoparçacık ilavesi veya FDM'nin gözenekli yapılar içine hapsedilmesi gibi yöntemlere sıklıkla başvurulmaktadır. Bu yöntemler, FDM

katmanı içerisindeki ısıl iletkenliği artırmakta ve faz dönüşümünün daha geniş bir alanda eş zamanlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. Böylece, ısı transfer katsayısı iyileşmekte ve panel sıcaklığı ile FDM erime sıcaklığı arasındaki fark azalmaktadır.

- FDM'nin sınırlı gizli ısı depolama kapasitesi göz önüne alındığında, FDM içerisindeki iletkenlik artışı, erime süresini kısaltarak termal regülasyon süresini olumsuz etkileyebilmektedir. FDM miktarının artırılması, bu durumun etkilerini azaltmak için ilgili çalışmalarda önerilmiş olsa da, artan FDM miktarı, özellikle geceleri gerçekleşen katılaşma süresini uzatmaktadır.
- Gece süresi yetersizlikleri, ışınım yoğunluğunun yüksek olduğu yaz aylarında belirginleşmekte, kısa gece süreleri ve yüksek ortam sıcaklıkları nedeniyle FDM'nin katılaşma süresi yetersiz gelmekte ve soğutma kapasitesinin sürekliliği bu durumdan olumsuz etkilenmektedir.

PV-FDM sistemlerinin ısıl davranışlarına yönelik derlenen bu maddeler, PV-FDM sistemlerinde PV sıcaklıklarının düşürülmesi için FDM'nin ısıl iletkenliğinin güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Literatür özetinde de açıkça anlaşılacağı üzere konu üzerine yapılan çalışmalar büyük çoğunlukla bu gereksinim üzerine odaklanmış durumdadır. Fakat konvansiyonel yaklaşımlar bazı önemli sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bu sınırlamalardan ilki, ısıl iletkenlik artışına bağlı olarak FDM'nin daha hızlı erimesi ve buna bağlı regülasyon süresinin kısalmasıdır. İkincisi ise, daha uzun regülasyon sağlamak amacıyla FDM miktarının artırılması durumunda katılaşma süresinin önemli ölçüde uzamasıdır. Bu olumsuzluklar sistem performansını artırma amacıyla yapılan konvansiyonel girişimlerin etkinliğini sınırlandırmaktadır. Konu kapsamında yürütülen çalışmaların genelinde olduğu gibi FDM'nin yalnızca ısıl iletkenliğini güçlendirmenin bu olumsuzlukları ortadan kaldırmayacağı açıktır. Bu doğrultuda, konvansiyonel yaklaşımların ötesine geçen ısı alıcı tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı

PV panellerin termal yönetimi, panel sıcaklığını kontrol altında tutarak enerji verimliliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir. Mevcut literatürde, faz değiştiren maddeler (FDM) kullanılarak yapılan termal yönetim uygulamalarının bu sorunu belirli bir ölçüde çözebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, konvansiyonel PV-FDM sistemleri, bazı

yapısal ve operasyonel sınırlamalardan ötürü performans açısından yeterince verimli olamamaktadır. Bu tez çalışmasının amacı ise, PV panellerin termal regülasyon sürecini daha etkin ve güvenilir hale getirebilecek özgün ısı alıcı tasarımları geliştirmektir. Bu doğrultuda, konvansiyonel PV-FDM sistemlerinde gözlemlenen ve literatür özetinin sonunda ifade edilen sınırlamaları eş zamanlı olarak azaltabilen, yüksek performanslı ve güvenilir bir termal yönetim süreci sunulması hedeflenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada yalnızca FDM'nin ısıl iletkenliğini artırmaya yönelik metal ilavelerle sınırlı bir yaklaşım yerine, FDM ile birlikte doğal hava taşınımı ile desteklenmiş özgün yapılı ısı alıcılar geliştirilmiştir. Özgün sistemlerde, FDM tabakası içerisine farklı sayıda ve çapta dikey metal borular yerleştirilmiştir. Bu borular hem FDM'nin ısıl iletkenliğini artırmakta hem de çevre ortamına doğal taşınım yoluyla ısı aktarımını mümkün kılmıştır. Bu düzenlemeler sonucunda, konvansiyonel PV-FDM sistemlerine kıyasla şu temel iyileşmeler elde edilmiştir:

- ✓ PV sıcaklığı termal regülasyon boyunca ve regülasyon sonrasında düşürülmüştür.
- ✓ FDM miktarı artırılmadan termal regülasyon süresi uzatılmıştır.
- ✓ Termal regülasyon sonrası aşırı sıcaklık artışı azaltılmıştır.
- ✓ PV panelin elektriksel güç kaybı azaltılmıştır.
- ✓ Katılaşma süreleri kısaltılarak sistemin güvenilirliği artırılmıştır.

Tez kapsamında, geliştirilen özgün sistemlerin termal ve elektriksel performansları laboratuvar ortamında kapsamlı deneylerle değerlendirilmiştir. Bu süreçte izlenen yöntem ve araştırmanın kapsamı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ✓ PV panellerin termal regülasyonu için konvansiyonel (yalnız FDM destekli) ve özgün (FDM+hava destekli) ısı alıcıları tasarlanmış ve üretilmiştir.
- ✓ Farklı ışınım şiddetleri, yerleşim açıları ve çevresel koşullar altında konvansiyonel ve özgün sistemlerin performansları karşılaştırılmıştır.
- ✓ Laboratuvar deneyleriyle FDM'in faz dönüşüm davranışı, sıcaklık profilleri ve bu davranışların PV sıcaklığı ile güç çıktısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.
- ✓ Özgün sistemlerdeki boru sayısı ve çaplarının performansa etkileri optimize edilmiş ve farklı geometrik parametreler için optimum tasarımlar belirlenmiştir.
- ✓ Konvansiyonel ve özgün sistemlerin hem ısı depolama (şarj) hem de ısı yayılımı (deşarj) süreçleri birlikte ele alınarak tam çevrim davranışları incelenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

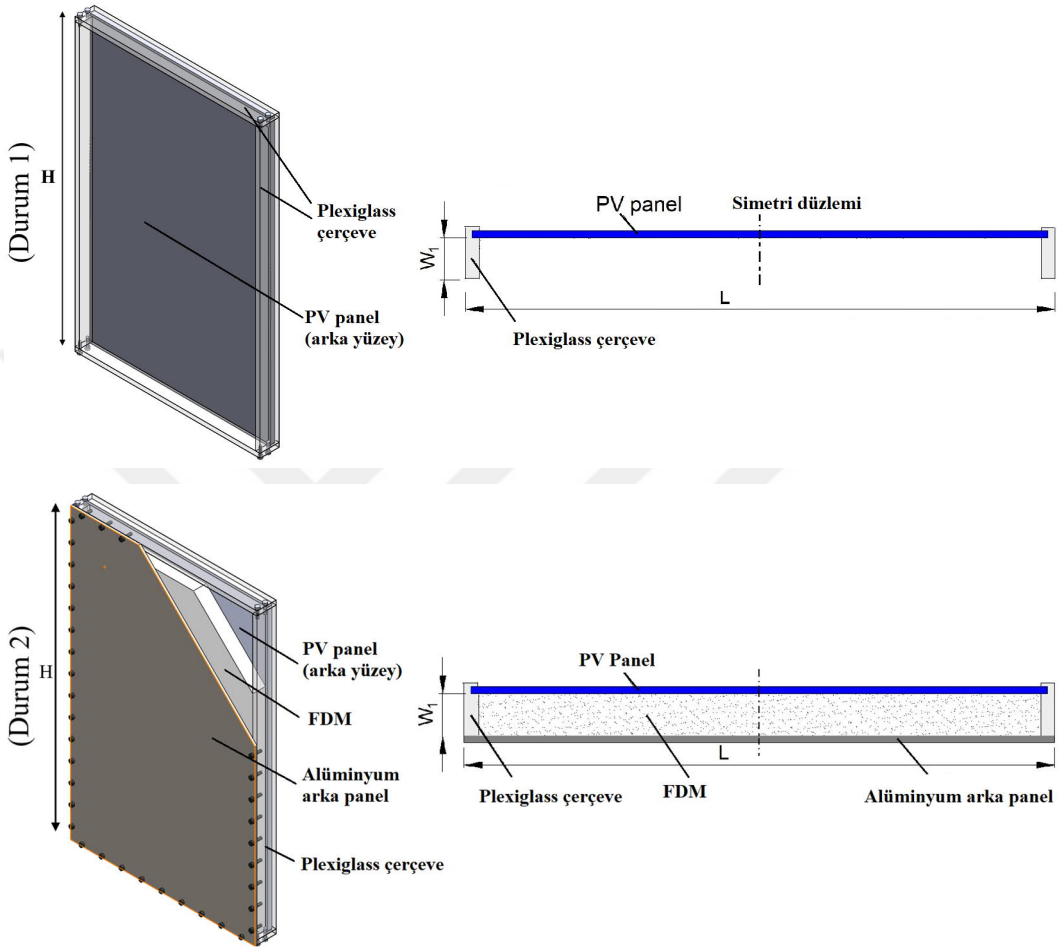
Bu tez kapsamında, PV-FDM sistemlerinin performanslarını, özgün FDM+hava destekli ısı alıcılarıyla artırmaya yönelik deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Özgün yaklaşımla elde edilen iyileşmenin kapsamlı olarak ortaya konması için ilgili süreç konvansiyonel yapılarla birlikte ele alınmıştır. Çalışmanın genel akışı kapsamında öncelikle araştırma parametreleri belirlenmiş, ısı alıcılarının üretilip test bölgeleri oluşturulmuş, deneysel ölçümler için uygun test düzeneği hazırlanmış, farklı koşullar için deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Tüm bu süreçler, kapsamlı bir şekilde ayrı başlıklar altında açıklanmıştır.

2.1. Test Bölgelerinin (PV-FDM sistemlerin) Tasarımı ve İmalatı

Çalışma kapsamında termal davranışları incelenmek üzere tasarlanan konvansiyonel ve özgün sistemlerin 3-boyutlu görselleri ve kesit görüntüleri sırasıyla Şekil 23 ve 24'te verilmiştir. Şekiller, her bir sisteme ait bileşenleri ve geometrik karakteristikleri sunmaktadır. İlgili geometrik ölçüler ise Tablo 1'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere çalışma kapsamında beş farklı sistem düzenlemesi dikkate alınmıştır. Bunlar içerisinde "Durum 1" ısı alıcısı uygulanmayan PV paneli, "Durum 2" yalnız FDM ile soğutulan konvansiyonel yapıyı, "Durum 3, 4 ve 5" ise farklı kanal sayıları ve çapları içerecek şekilde tasarlanmış özgün FDM + hava destekli ısı alıcılı yapıları temsil etmektedir. Konvansiyonel yapılı PV-FDM sistem (Durum 2), yalnız FDM ile sağlanan pasif termal regülasyon sürecinin analizi ve sürece ait performans sınırlayıcı faktörlerin tespiti için öncelikli olarak ele alınmıştır. Ayrıca, Durum 1 ve 2, özgün tasarımların performans analizleri için referans veriler sağlamıştır.

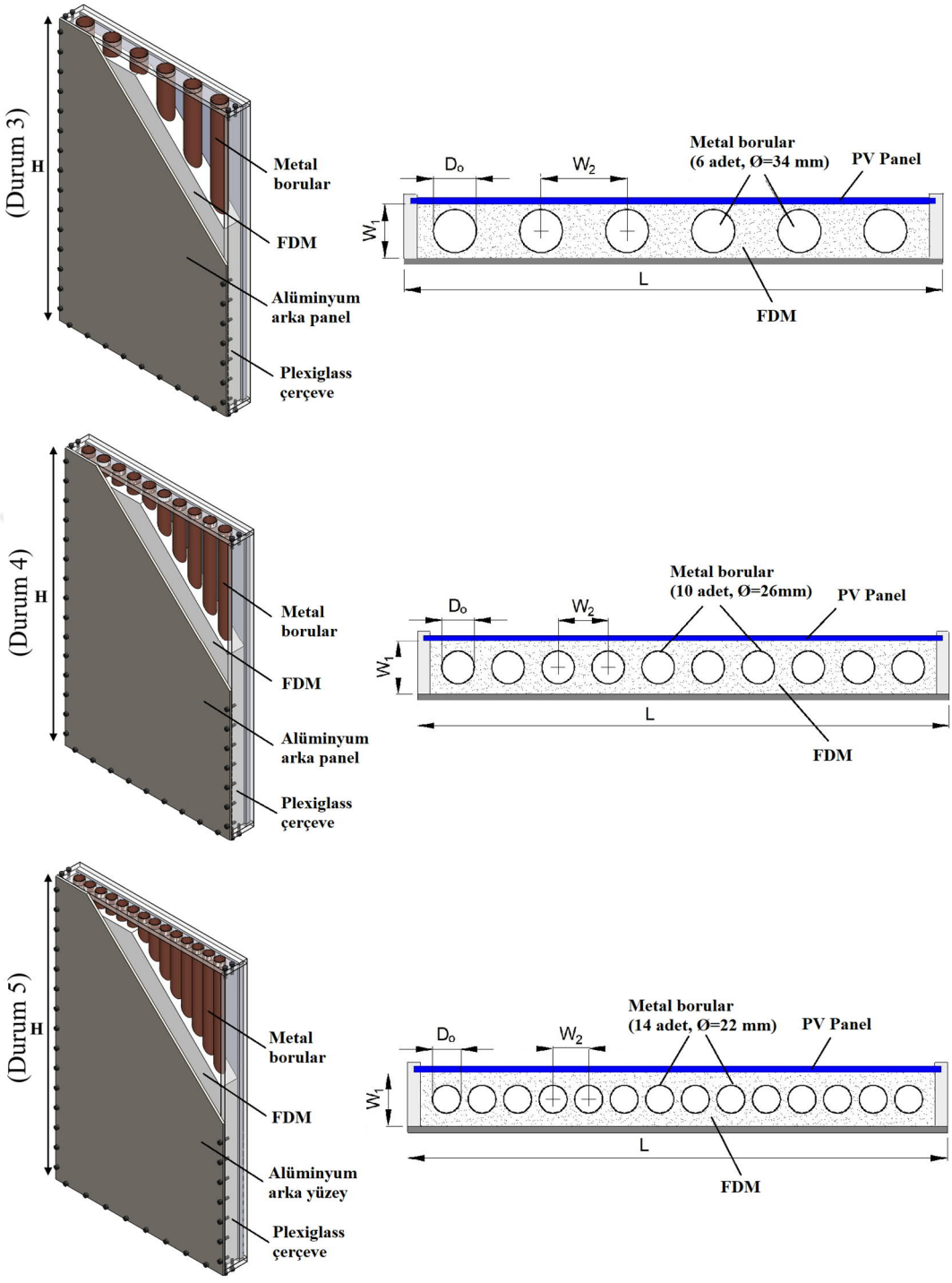
Şekil 23'ten görüldüğü üzere konvansiyonel yapılı PV-FDM sistemi temel olarak, bir PV panel ve panel arkasında yer alan ve içerisine yalnızca FDM'nin depolandığı dikdörtgen prizmatik bir hacimden meydana gelmektedir. İlgili hacmi sınırlayan çerçeve yapı 10 mm kalınlığında plexiglass plakalardan üretilmiş ve çerçeve arkasında 1,5 mm kalınlığında alüminyum bir plaka kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan, FDM ve çevre ortam arası termal direncin düşük tutulması amacıyla ısı alıcının dış yüzeylerinin tümünde alüminyum malzeme tercih edildiği görülmektedir (Rajvikram vd., 2019). Bu çalışmada ise farklı olarak

yalnız çerçeve imalatı için plexiglass malzeme tercih edilmiştir. Bu tercih, termoelemanların termal gerilmeye bağlı panel arka yüzeyinden ayrılması veya FDM miktarında sızmaya bağlı azalmalar gibi deney sürecinde ortaya çıkabilecek olası sorunların tespiti için yapılmıştır.



Şekil 23. Referans PV (Durum 1) ve konvansiyonel PV-FDM (Durum 2) sistemlerinin şematik görüntüsü ve geometrik karakteristikleri

Özgün ısı alıcılarında ise (Durum 3, 4 ve 5), Şekil 24'ten görüldüğü üzere konvansiyonel yapıdan farklı olarak FDM içerisine dikey yerleşimli olarak, farklı çap ve adetlerde borular yerleştirilmiştir. Bu işlem için dış çerçevenin alt ve üst yüzeylerinde uygun çap ve sayıda delikler açılmış ve borular bu deliklere iki ucu atmosfere açık olacak şekilde yerleştirilmiştir. Konvansiyonel sistemden farklı olarak yapılan bu düzenleme ile FDM katmanı içerisine doğal hava akış desteği sağlanmış ve FDM+hava destekli ısı alıcılı sistemler oluşturulmuştur.



Şekil 24. Özgün hava ve FDM destekli ısı alıcılı PV- FDM sistemlerinin şematik görüntüsü ve geometrik karakteristikleri, Durum 3: 6 kanallı, Durum 4: 10 kanallı, Durum 5: 14 kanallı

Deneylerde 50 W nominal güce sahip 424 mm × 670 mm × 3 mm boyutlarında monokristal bir fotovoltaik panel kullanılmıştır. İmal edilen ısı alıcılar, ilgili tablo ve

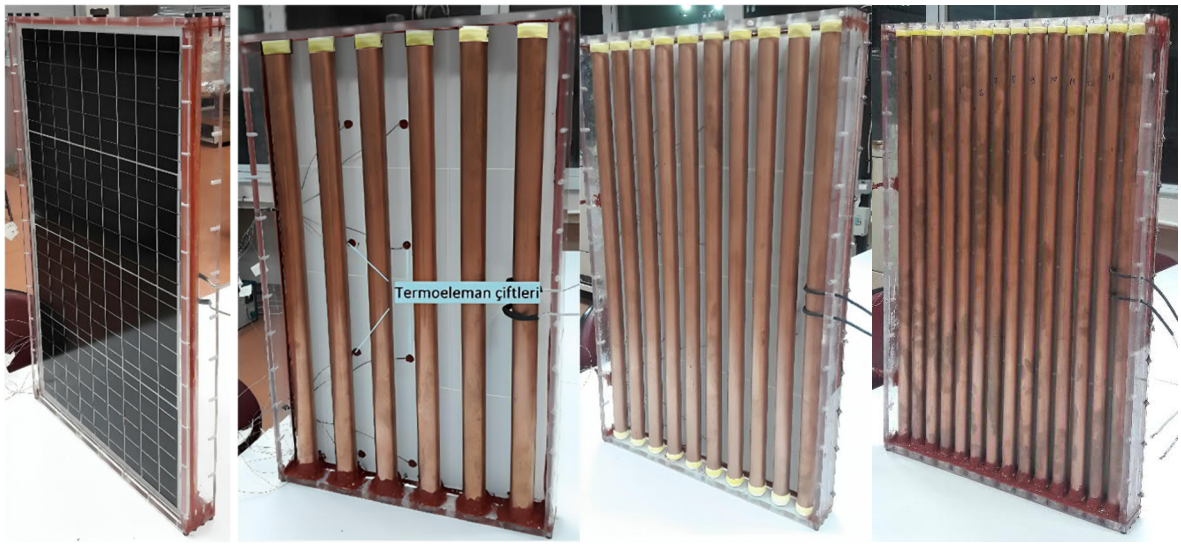
şekillerden de görüldüğü üzere fotovoltaik panelle aynı taban alanına sahip olup panelin arka kısmına temaslı yerleştirilmiştir.

Tablo 1. FDM katkılı ısı alıcılarına ait geometrik ölçüler

	Boru (kanal) sayısı (N)	**D_o (mm)**	**W_1 (mm)**	**W_2 (mm)**	**L (mm)**	**H (mm)**
Durum 1 (Isı alıcısız)						
Durum 2 (Yalnızca FDM ile soğutulan)	0		30		424	670
Durum 3 (Hava+ FDM)	6	34	42,55	68	424	670
Durum 4 (Hava+ FDM)	10	26	42,55	42	424	670
Durum 5 (Hava+ FDM)	14	22	42,55	30	424	670

FDM depo hacminin düşey yüzey alanı ise şekilde görüldüğü üzere panelin yüzey alanıyla sınırlı tutulmuştur. Diğer bir ifadeyle FDM deposunun en ve boy ölçüleri uygulandığı PV panel ile özdeştir. Bu kısıtlama, PV-FDM sistemlerin yan yana konumlandırılmaları durumunda meydana gelebilecek fazla yer işgalini engellemek için gerekli olup konuyla ilgili çalışmalarda da dikkate alınmaktadır. Ayrıca, prizmatik hacim imal edilirken sızdırmazlığın sağlanması amacıyla tüm birleşim yüzeylerinde ısıya dayanımlı sıvı conta malzeme kullanılmış ve birleşim işlemleri, ilgili şekilden de görüldüğü üzere vidalı bağlantılarla gerçekleştirilmiştir. İlgili sistemlere ait üretim sonrası fotoğraflar Şekil 25'te sunulmuştur.

FDM içeren tüm ısı alıcıları içerisinde (Durum 2-5) yaklaşık 6,75 kg FDM kullanılmıştır. Bu değer, ısı alıcıları içerisinde FDM için ayrılan hacmin tamamen sıvı FDM ile doldurulması için gerekli FDM miktarıdır. FDM katı durumdayken ise yoğunluktaki artışa (hacimsel büzülmeye) bağlı depo hacmi üzerinde yaklaşık %11'lik bir hava boşluğu oluşmaktadır. FDM deposunun derinlik değerleri her bir Durum için incelendiğinde ise Durum 2 için ilgili değerin 30 mm, özgün sistemler (Durum 3-5) bu değerin 42,55 mm olduğu görülmektedir. Bu farklılık, özgün sistemler içerisinde ihtiva edilen metal boruların kapladığı hacmin telafisi içindir. Daha öncede ifade edildiği üzere, depo yükseklik ve en değerinin PV panelle sınırlı tutulmaktadır. Bu sebeple boruların kapladığı hacim panel arkasına eklenmiş ve FDM depo derinliği Durum 3-5 için 42,55 mm'e genişletilmiştir. Bu sayede FDM içeren tüm sistemler (Durum 2-5) için FDM miktarı sabit tutularak madde miktarından bağımsız bir araştırma yapılmış ve iç boruların sürece etkisine odaklanılmıştır.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 25. (a) PV panel ve üretim süreci sonrası FDM ve hava destekli ısı alıcılarının fotoğrafları, (b) 6 kanallı (Durum 3), (c) 10 kanallı (Durum 4), 14 kanallı (Durum 5)

Özgün ısı alıcıları kapsamında sisteme dâhil edilen doğal hava taşınım desteğinin sürece etkisi, PV-FDM sistemler için tanımlı enerji dengesi ile açıklanabilir:

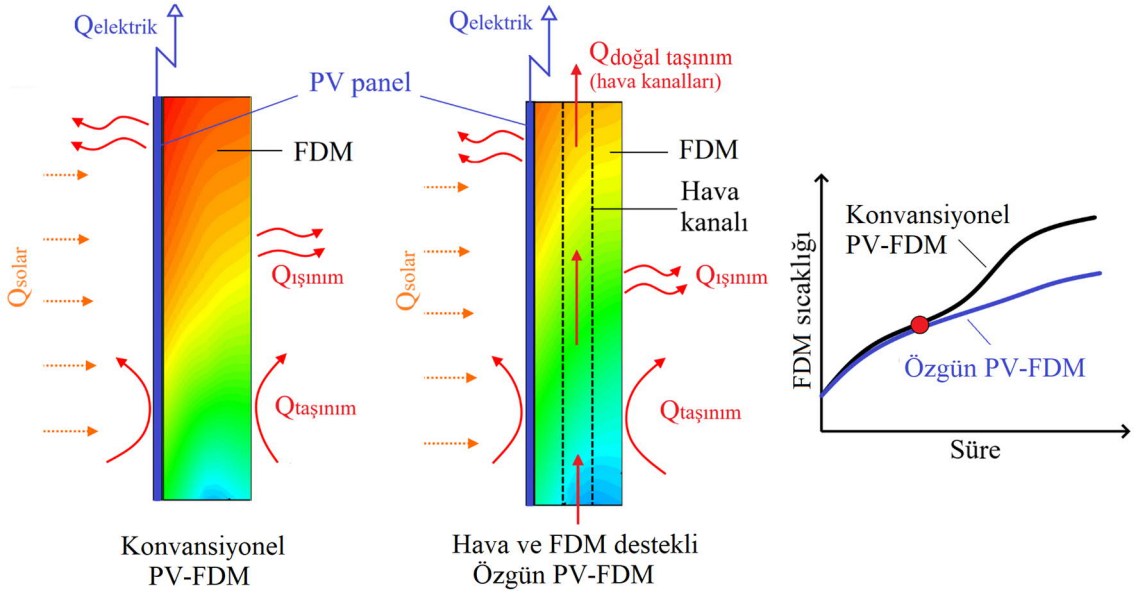
$$Q_{solar} - Q_{taşınım} - Q_{ışınım} - Q_{elektrik} = Q_{FDM} \quad (5)$$

Burada Q_{solar} PV panel yüzeyine düşen ışınım enerjisini, $Q_{taşınım}$ ve $Q_{ışınım}$ sırasıyla PV-FDM sistem yüzeylerinden çevre ortama taşınım ve ışınım ile geçen ısı miktarını, $Q_{elektrik}$ elektriğe dönüşerek sistemden ayrılan enerji miktarını ve Q_{FDM} ise FDM içerisine depolanan ısıl enerji miktarını ifade etmektedir. Özgün hava ve FDM destekli ısı alıcılarıyla FDM katmanı içerisine yapılan doğal hava taşınım desteği ile sistemden bir miktarı ısı doğal taşınım yoluyla uzaklaştırılmaktadır. Bu durumda yukarıdaki ifade şu şekilde düzenlenebilir.

$$Q_{solar} - Q_{taşınım\ (dış\ yüzey)} - Q_{doğal\ taş.\ (hava\ kanalları)} - Q_{ışınım} - Q_{elektrik} = Q_{FDM} \quad (6)$$

İfadeden de görüldüğü üzere, hava kanalları üzerinden doğal taşınım yoluyla meydana gelen ek ısı çıkışının FDM içerisinde biriken ısı miktarını azaltacağı açıktır. Bu ısı atılımı sayesinde ise FDM'nin erime süresinin uzatılması ve buna bağlı zamanla ortaya çıkan daha

düşük PV sıcaklıkları hedeflenmiştir. İfade edilen bu durumun daha kolay anlaşılması için ilgili süreç, Şekil 26'da temsili sıcaklık dağılımları üzerinden gösterilmiştir.

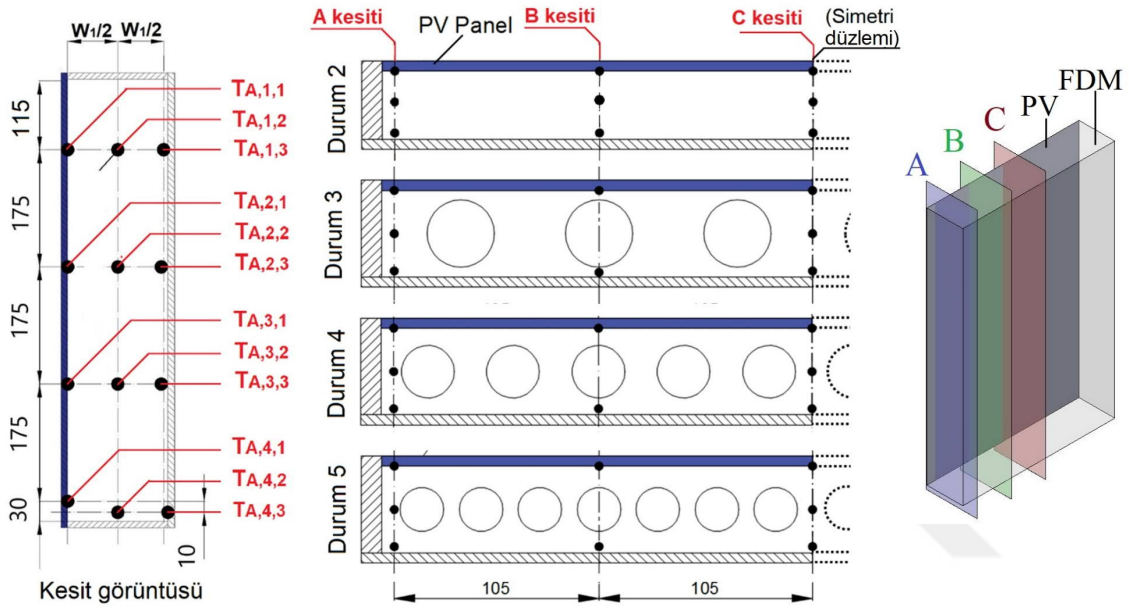


Şekil 26. PV-FDM sistemler üzerinde yapılan özgün düzenlemenin (hava desteğinin) FDM sıcaklığına etkisinin temsili gösterimi

Şekilden görüldüğü üzere FDM içerisine doğal hava taşınım desteği sağlanarak, ısıl yük altında FDM'de biriken ısının bir miktarının (q_{hava}) sistemden enerji girdisine ihtiyaç duyulmadan uzaklaştırılması amaçlanmıştır. Buna ek olarak kullanılan metal boruların yüksek ısıl iletkenliklerinin, FDM içerisinde ısı dağıtımına yardımcı olabileceği de göz önünde bulundurulmuştur. Bu sayede, çalışma saatleri içerisinde daha düşük FDM sıcaklığı ve buna bağlı FDM'nin daha geç erime sürecini tamamlaması ve daha düşük PV sıcaklıkları, bu çalışmanın ana hedefini oluşturmaktadır.

Konvansiyonel ve özgün PV-FDM sistemlerinin zaman bağımlı kapsamlı sıcaklık haritaları, test bölgesinden çoklu sıcaklık ölçümleriyle ortaya konmuştur. Sıcaklık ölçümleri PV panel arkasına ve FDM katmanı içerisine yerleştirilmiş ± 0,5 °C hassasiyete sahip T-tipi termoeleman çiftleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Test bölgesi üzerine yerleştirilen termoeleman çiftlerinin konumları Şekil 27'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, PV panelin arka yüzeyinde 12 noktada, FDM katmanı içerisindeki ise 20 noktada sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu sayede PV panel üzerinde ve FDM katmanı içerisinde bölgesel sıcaklık farkları elde edilebilmiş ve FDM'nin toplam erime süresi gözlemlenerek farklı ısı alıcısı geometrilerinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca

termoelemanlar konumlarına göre $T_{X,Y,Z}$ formunda üç alt indisle tanımlanmıştır. İlk alt indis, termoelemanın ilgili şeklin sağ tarafında yer alan A, B veya C kesitlerinden hangi kesit üzerinde yer aldığını, ikinci ve üçüncü alt indisler ise sırasıyla ilgili kesitte hangi yatay ve düşey eksende yer aldığını göstermektedir. Örneğin $T_{A,2,3}$ ile kodlanmış termoeleman, A kesiti üzerinde 2. yatay eksen ve 3. düşey eksen üzerinde yer almaktadır. Bu kodlama, konum bağlı sıcaklık değişimlerinin sunulduğu grafiklerde kullanılmıştır.



Şekil 27. Test bölgesindeki termoelemanlara ait yerleşim planı

2.2. Isı alıcısında Kullanılan Faz Değiştiren Madde

Isı alıcılar içerisinde belirli bir miktar FDM, daha önce de gösterildiği üzere kendine ayrılan hacim içerisine doldurulmuştur. Daha önce de ifade edildiği üzere bu tez çalışması kapsamında, FDM'nin yanında hava desteği üzerine odaklanılmış ve çeşitli geometrik parametrelerin sürece etkisi incelenmiştir. Çalışmada, FDM miktarı ve türünde değişikliğe gidilmemiş, tüm deneyler tek bir FDM üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple tüm çalışma parametrelerine uygunluk gösteren bir FDM'nin seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda, FDM seçimi için, literatürde 4 madde ile tanımlanan şu kriterler dikkate alınmıştır (Hasan vd., 2017):

1. FDM'nin erime sıcaklığı, PV panellerin nominal çalışma sıcaklığı olarak tanımlanan 25 °C'ye yakın olmalıdır. Bu durum, PV sıcaklığının kontrol altına alındığı değeri etkilemekte olup bu değerin mümkün olduğunca düşük olması sıcaklığa bağlı güç kaybını azaltmaktadır.
2. Faz dönüşüm sıcaklığı yaz aylarındaki ortalama gündüz sıcaklığından yüksek olmalıdır. Bu sayede gündüz saatlerinde dış ortamdan FDM içerisine geçen ısı faz dönüşümüne sebep olmamakta, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi yalnızca PV panel ve FDM arası ısı transferine harcanmaktadır.
3. Kış aylarında PV panelin güneşlenme saatleri içerisinde eriştiği sıcaklık, FDM'nin faz dönüşüm sıcaklığından yüksek olmalıdır. Bu madde FDM destekli ısı alıcının kış aylarında sunduğu fayda ile ilişkilidir. İlgili şartın sağlanmasıyla FDM, kış aylarında da faz dönüşümü gerçekleştirebilmekte ve sistem sıcaklığındaki artış yavaşlatabilmektedir.
4. Erime sürecini tamamlayan FDM'nin gece saatlerinde katılaşabilmesi için, katılaşma sıcaklığı yaz ayları ortalama gece sıcaklığından yüksek olmalıdır. Bu sayede, sıcaklığı azalarak katılaşma noktasına erişen FDM, gece boyunca ısı atmaya ve katılaşmaya devam edebilecek ve bir sonraki gün benzer bir ısı depolama kapasitesi sunabilecektir.

Bu çalışmada, yukarıdaki kriterler göz önüne alınarak "Rubitherm/RT-35HC" marka/ kodlu parafin tercih edilmiştir. Tercih sürecinde gerekli olan gece-gündüz ve yaz-kış sıcaklıkları için Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sunulan değerler (sıcaklık ve ışınım düzeyleri) dikkate alınmıştır. İlgili parafin, yanıcı, korozif veya toksik özellikler göstermeyen, yüksek saflık ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesi sunan ticari bir parafin olup, PV-FDM sistemler üzerine yapılan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. FDM'ye ait termofiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir (Martinelli vd., 2016; Nedumaran vd., 2022).

Tablo 2. RT-35HC'nin termofiziksel özellikleri

Katı yoğunluk *(kg.m^{-3})*	880
Sıvı yoğunluk *(kg.m^{-3})*	770
Erime sıcaklık aralığı (°C)	34-36
Katılaşma sıcaklık aralığı (°C)	36-33

Tablo 2'nin devamı

Özgül ısı *(kJ.kg^{-1}.K^{-1})*	2
Gizli ısı *(kJ. kg^{-1})*	220
Isıl iletkenlik *(W.m^{-1}.k^{-1})*	0,116
Dinamik viskozite *(kg.m^{-1}.s^{-1})*	0,0044
Hacimsel genleşme katsayısı (K^{-1})	0,000865

2.3. Deneysel Parametreler

Çalışma kapsamında, yukarıda tanımlanan ve 5 farklı durum ile isimlendirilmiş (Durum 1-5) farklı geometrik özelliklere sahip konvansiyonel ve özgün PV-FDM sistemlerinin şarj ve deşarj süreçleri boyunca gösterdikleri ısıl ve elektriksel davranışlar aşağıdaki araştırma parametreler altında deneysel olarak incelenmiştir:

- 30°, 45°, 90° olmak üzere 3 farklı yerleşim açısı.
- 1000 W/m^2-25°C ve 750 W/m^2-17°C ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı.
- Özgün ısı alıcıları içerisindeki kanalların çap ve adetleri (bkz. Tablo 1).

Bu parametreler, konvansiyonel ve özgün ısı alıcılarının sunduğu soğutma performansının, farklı koşullara gösterdiği tepkinin kapsamlı bir şekilde araştırılması amacıyla dikkate alınmıştır. İlgili parametrik değerlerin belirlenmesinde dikkate alınan kriterler ayrı başlıklar altında aşağıda açıklanmıştır:

2.3.1. Yerleşim Açıları

PV panellerin anlık maksimum elektriksel güç çıktısı güneş ışınımına dik açıda yerleştirildiklerinde elde edilmektedir. Ancak bu ideal açı, panellerin kurulumunun planlandığı bölgenin coğrafi enlem-boylam konumu ve mevsimsel değişikliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Günümüzde PV paneller, geleneksel güneş tarlası uygulamalarının yanı sıra duvar, çatı gibi bina yapılarında entegre olarak da sıkça kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar literatürde "Building Integrated Photovoltaics" (BIPV) olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada, hem geleneksel kurulumları hem de BIPV uygulamalarını kapsayacak şekilde PV-FDM sistemlerinin farklı eğim açılarında performansı incelenmiştir. İlk etapta

30°, 45° ve 90° olmak üzere üç temel eğim açısı dikkate alınmış ve deneysel analizler bu açılar altında gerçekleştirilmiştir. Bu açılar, mevcut literatürde PV-FDM sistemleri için sıklıkla tercih edilen değerler arasında yer almaktadır (Khanna vd., 2017; Qu vd., 2024a).

En düşük açı olarak 30°'nin seçilmesinin temel nedeni, FDM destekli ısı alıcı sistemlerde doğal taşınımın baskın ısı transfer mekanizması olmasıdır. Literatürde, 30°-45° arası eğim açılarının, doğal taşınım hareketlerini etkinleştirmek için kritik bir aralık olduğu ifade edilmektedir (Khanna vd., 2017). Bu bağlamda, 30° başlangıç açısı olarak belirlenmiştir.

Dış ortamda (Güneş ışınımı altında) yapılan deneylerde meteorolojik koşulların değişkenlik göstermesi art arda yapılacak deneylerde tekrar edilebilir şartların temin edilmesini güçleştirmektedir. Bu olumsuzluk, geniş parametre aralığı içeren deneysel çalışmaların yürütülmesini güçleştirmekte ve çalışmaların farklı günlerde yapılması durumunda elde edilen verilerin güvenirliğini azaltmaktadır. İlgili olumsuzluğun önüne geçmek ve araştırmanın güvenilir ve hızlı bir şekilde yürütülmesini sağlamak için deneyler sıcaklığı kontrol altında tutulan bir laboratuvar ortamında yapay ışık kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Uygulanan ışınım şiddeti ve ortam sıcaklıklarının belirlenmesinde ise literatüre uyumluluk gözetilmiştir. Bu kapsamda laboratuvar ortamında yapılan benzer çalışmalarda, farklı değerler de dikkate alınmakla birlikte 1000 W/m² (1 Sun) sabit ışınım şiddeti ve 20-25°C arası ortam sıcaklığının en sık tercih edilen değerler olduğu görülmektedir (Fayaz vd., 2019; Huang vd., 2006; Klugmann-Radziemska & Wcisło-Kucharek, 2017). Bu değerler PV paneller için tanımlanan standart test koşulları olup bu değerlerin genel olarak güneş potansiyeli yüksek bölgelerde güneşin etkili olduğu saatlerdeki ışınım şiddeti ve günlük ortalama sıcaklık seviyeleriyle benzerlik gösterdiği ifade edilebilir. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında 1000 W/m² sabit ışınım şiddeti ve 25 °C ortam sıcaklığı tüm ısı alıcılı sistemler ve yerleşim açıları üzerine uygulanmıştır. Bu koşula ek olarak, dikkate alınan PV sistemlerin farklı bir ortam şartı altındaki davranışlarının incelenebilmesi amacıyla 750 W/m² sabit ışınım şiddeti ve 17 °C ortam sıcaklığı da çalışmaya dâhil edilmiştir. 750 W/m² sabit ışınım altında ısı alıcısız PV ve konvansiyonel PV-FDM sistemi ile tüm yerleşim açıları altında, özgün PV-FDM sistemleri ile ise "yalnızca 45°" yerleşim açısı altında ilgili şarj ve deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir.

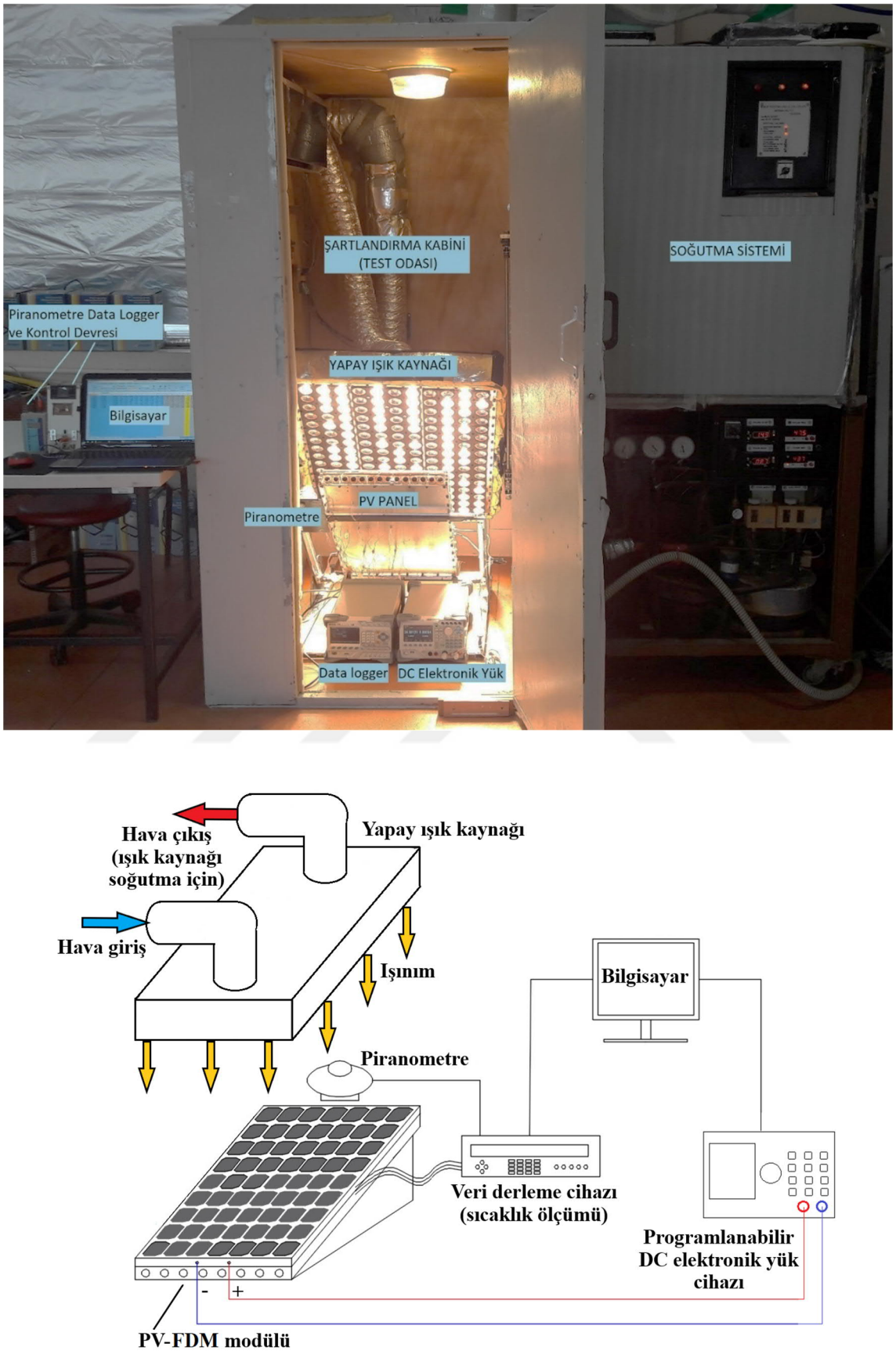
Literatürde özellikle laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda, dikkate alınan deney sürelerinde tayininde farklı yaklaşımlar göze çarpmaktadır. Bazı çalışmalar deney sürelerini FDM ile sağlanan termal regülasyon süresiyle sınırlı tutarken bazı çalışmalar bu süreyi daha

geniş aralık için sunmaktadır. Deney sürelerinin, yalnız termal regülasyon süresiyle sınırlı tutulması durumunda, regülasyon sonrası ani sıcaklık artışı ve buna bağlı verim düşüşü gibi meydana gelebilen olumsuzlukların göz ardı edileceği bir gerçektir. Bu sebeple deney sürelerinin, regülasyon sonrasını takip eden belirli bir süreye kadar sürdürülmesi ve uygulanan toplam ışınım miktarının günlük gerçekçi bir değere ulaştırılması, sistemin soğutma sınırlarının ve elektriksel iyileşme periyotlarının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu doğrultuda deney süresi belirlenirken, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının sunduğu Türkiye için yaz ayları günlük toplam ışınım miktarının ortalaması olan 6600 Wh/m^2 ışınlanma değerine karşılık standart test koşulu olan 1000 W/m^2 sabit ışınım şiddeti dikkate alındığında deney süresi 7 saat ile sınırlandırılmıştır (URL-5). İlgili sürenin, 1000 W/m^2 sabit ışınım altında yapılan deneylerde tüm sistemlerin sıcaklık yönünden daimi duruma erişmesi için yeterli olduğu yapılan ön deneylerle tespit edilmiştir. Bu durumun termal regülasyon öncesi ve sonrası sistem davranışının birlikte incelenmesi yönünden bir avantaj olduğu ifade edilmelidir.

2.4. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Çalışma kapsamında kurulan deney düzeneğinin fotoğrafı ve şematik resmi Şekil 28'de verilmiştir. Deney düzeneğinin genel tasarımı çalışma kapsamında dikkate alınan tüm deneysel parametreleri uygulamaya imkân tanıyacak şekilde yapılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere deney düzeneği; temel olarak PV-FDM modülü (test ünitesi), yapay ışık kaynağı, piranometre, DC elektronik yük cihazı, veri derleme cihazı ve tüm verilerin toplandığı bir bilgisayardan oluşmaktadır.

PV-FDM modülleri, deneyler boyunca sıcaklığı kontrol altında tutulan, 2000 mm × 1000 mm × 1500 mm ölçülere sahip bir şartlandırma kabini içerisinde tutulmuştur. Kabinin iç ortam sıcaklığı ise, kabinle bütünleşik, 5200 W soğutma gücüne sahip hava şartlandırma ünitesiyle kontrol altında tutulmuştur. Modül üzerine ısıl yük (ışınım) bir yapay ışık kaynağı vasıtasıyla gönderilmiştir. Veri derleme ve elektronik yük cihazı ise test modülünün sırasıyla anlık sıcaklık ve elektrik güç değerlerinin ölçülmesi için kullanılmıştır. Deney düzeneğinde yer alan tüm bu bileşenlerin özellikleri, detaylı bir şekilde ayrı başlıklar altında açıklanmıştır.



Şekil 28. Deney düzeneğinin fotoğrafı ve şematik resmi

2.4.1. Yapay Işık Kaynağı ve Isıl Yükün Uygulanması

PV sistemler üzerinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde yapay ışık kaynaklarının (solar simülatörlerin) kullanımı gereklidir. Bu kaynaklar, istenilen ışınım şiddetlerini sağlayarak meteorolojik koşullardan bağımsız deneyler yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, yapay ışık kaynakları deney sistemlerinin temel bir bileşeni olup, deneylerin doğruluğu açısından sürece uygun özelliklere sahip olmaları kritik öneme sahiptir.

Ticari solar simülatörler incelendiğinde, bu cihazların güneş ışınımına oldukça yakın özelliklerde ışınım sağlayabildiği, ancak genellikle küçük alanlara yönelik çıktılar sundukları için büyük ölçekli panel testlerine uygun olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, özel olarak tasarlanmış yapay ışık kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde, araştırmacıların genellikle farklı tür ve sayılarda lambaları çeşitli şekillerde bir araya getirerek yapay ışık kaynakları tasarladıkları görülmektedir. Tasarımların sürece uygunluğu ise, literatürde Tablo 3'de verilen standartlara göre değerlendirilmektedir (Esen vd., 2017).

Tablo 3. Solar simülatörlerin sınıflandırılması

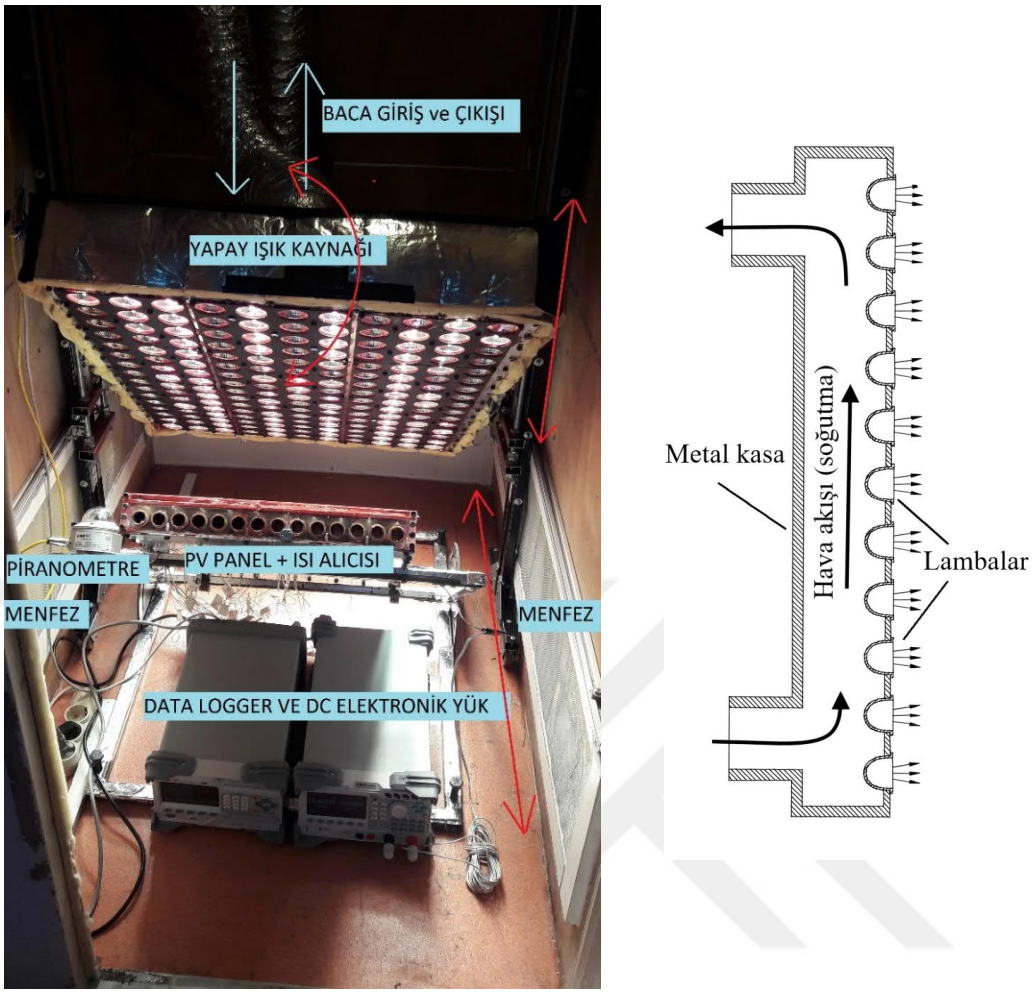
		Standartlar	
Performans kriterleri		**ASTM**	**IEC**
Güneş ile spektral benzerlik	A Sınıfı	0,75 – 1,25	0,75 – 1,25
	B Sınıfı	0,6 – 1,4	0,6 – 1,4
	C sınıfı	0,4 – 2,0	0,4 – 2,0
Işınım şiddetinin dağılım farkı	A Sınıfı	≤ %3	≤ %2
	B Sınıfı	≤ %5	≤ %5
	C sınıfı	≤ %10	≤ %10
Işınım şiddetinin kararlılığı	A Sınıfı	≤ %2	≤ %2
	B Sınıfı	≤ %5	≤ %5
	C sınıfı	≤ %10	≤ %10

Tablodan da görüldüğü üzere solar simülatörler, genel olarak üç kritere göre sınıflandırılmaktadır: yayılan ışık ile güneş spektrumu arasındaki benzerlik (spectral match), ışınımın hedef yüzey üzerindeki dağılımı (spatial non-uniformity) ve ışık şiddetinin zamansal kararlılığı (temporal instability). Bu kriterlere göre ışık kaynakları, ideal değerlerden sapma yüzdelerine bağlı olarak A, B veya C sınıflarına ayrılmaktadır. Deneylerde kullanılan yapay ışık kaynaklarının en az C sınıfı özelliklere sahip olması beklenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, ilgili sınıflandırmalara uygun bir yapay ışık kaynağı tasarlanmış ve deney düzeneğinde kullanılmıştır. Bu ışık kaynağının fotoğrafı ve kesit

görüntüsü Şekil 29'da verilmiştir. Tasarımda, Tablo 3'de belirtilen sınıflandırma kriterlerini mümkün olan en üst seviyede sağlama hedeflenmiştir. Bu sınıflandırmalar incelendiğinde, ışınımın eş dağılımının uygun bir reflektör ve lamba yerleşim düzeniyle, ışık şiddetinin kararlılığının ise sabit bir elektrik güç kaynağı ve geri besleme kontrollü bir sistem ile sağlanabileceği görülmektedir. Ancak, güneş spektrumu ile spektral benzerlik, kullanılan lamba türüne bağlıdır. Literatür incelendiğinde, Xenon, metal halide, tungsten-halojen ve UV lambaları gibi farklı türlerin yapay ışık kaynaklarında kullanıldığı görülmektedir. Her bir lamba türünün avantaj ve dezavantajları bulunmakta olup, uygun seçim araştırma parametrelerine ve çalışmanın hedefine göre yapılmalıdır. Bu çalışmada ise halojen lambalar tercih edilmiştir. Halojen lambalar, yüksek ışınım yoğunluğu, kolay güç kontrolü ve zehirli gaz içermemeleri nedeniyle literatürde özellikle termal yönetim süreçlerine odaklanan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Darkwa vd., 2019; Sathe ve Dhoble, 2020). Halojen lambalar, Güneş gibi siyah cisim radyasyonu yaymalarına karşın, tungsten elementinin erime sıcaklık sınırları nedeniyle yayılan ışınım yaklaşık 3000-3200 K yüzey sıcaklıkları üzerinden gerçekleşmektedir. Bu nedenle, halojen lambaların yayımladığı ışınım spektrumu, standartlara göre C sınıfında değerlendirilmektedir (Namin vd., 2012).

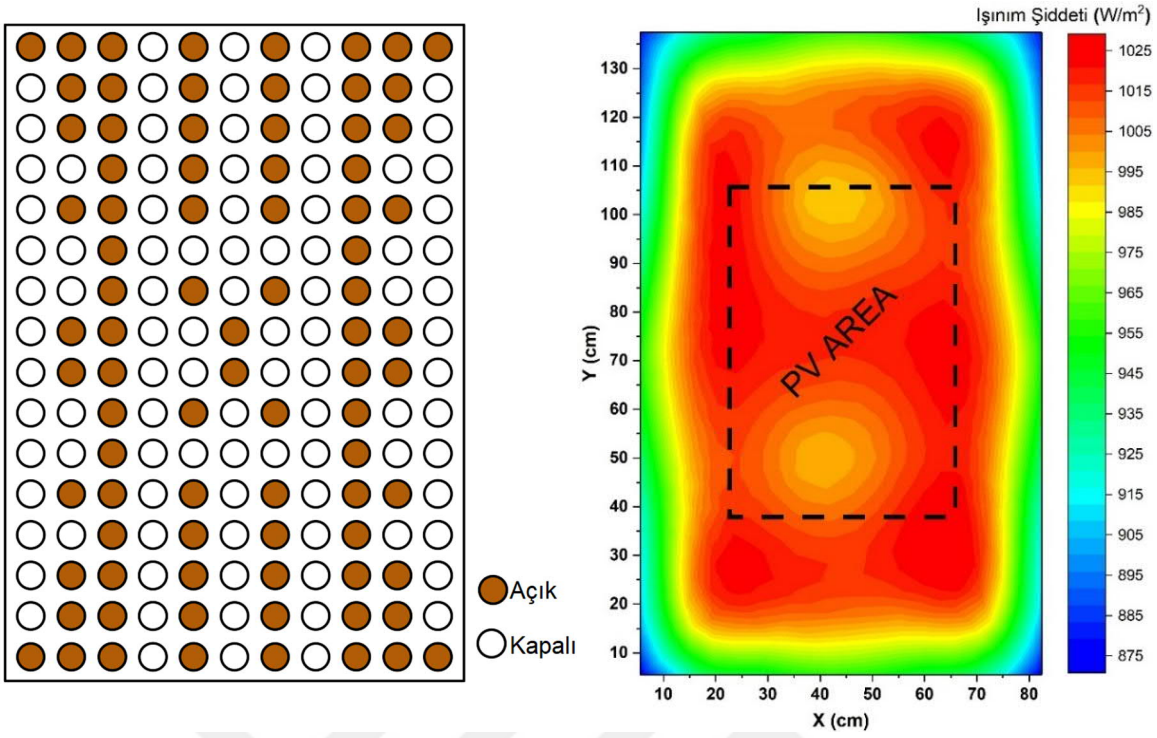
Panel yüzeyinde ışık şiddetinin eş dağılımını sağlamak amacıyla çok noktadan ışınım sağlayan bir armatür tasarlanmıştır. Bu bağlamda, 176 adet 50 W gücünde halojen spot lamba, Şekil 29'da görüldüğü üzere içi boş, hava giriş ve çıkış bağlantılarına sahip prizmatik bir metal kasanın ön yüzeyine 11 × 16 matris formunda yerleştirilmiştir. Panel yüzeyinde eş ışınım dağılımı elde etmek için tüm lambalar aktif duruma getirilmemiş, panel iz düşüm alanında ışınım şiddeti taraması yapılarak lambalar için uygun bir yanma düzeni belirlenmiştir. Bu düzen, PV panel ile ışık kaynağı arasında 50 cm mesafe bırakılarak optimize edilmiştir. Söz konusu mesafe, kabin içi ısıl yükü sınırlamak için aktif lamba sayısı ve ışık dağılım düzeni göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Işınım şiddeti ölçümleri, ikincil standart termopil bir piranometre ile gerçekleştirilmiş olup, bu cihazın detayları ayrı bir başlıkta açıklanmıştır. Lamba yanma düzeninde yapılan optimizasyon sonucu bölgesel fark yönünden %5'i aşmayan bir ışınım dağılımı elde edilmiş ve standartlara göre ışık kaynağı bu yönden B sınıfı olarak belirlenmiştir. Simülatör için belirlenen lamba düzeni ve sunduğu eş ışınım şiddeti haritası Şekil 30'da birlikte verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 29. Yapay ışık kaynağı ve PV-FDM sisteminin kabin içerisindeki yerleşimi (a), yapay ışık kaynağının kesit görüntüsü (b)

Lambalar tarafından üretilen direnç kaynaklı ısının kabin içerisine yayılmadan hızlıca uzaklaştırılması için simülatörün ön yüzü hariç diğer tüm yüzeyleri cam yünü ile izole edilmiş ve simülatör içerisine fan destekli bir havalandırma desteği sağlanmıştır. Bu doğrultuda, metal kasanın iç hacmi yüksek debi sağlayabilen radyal bir fan ile soğutulmuştur. Fanın sağladığı hava kabinin dış ortamından esnek bir baca yardımıyla alınmış ve tekrar dış ortama aynı şekilde ikinci bir baca ile atılmıştır. Bu sayede kabin içerisindeki şartlanmış hava lambaların soğutulması amacıyla kullanılmamış (soğutma sistemine ek yük oluşturulmamış) ve kabin içerisinde fan kaynaklı oluşabilecek hava hareketi engellenmiştir.

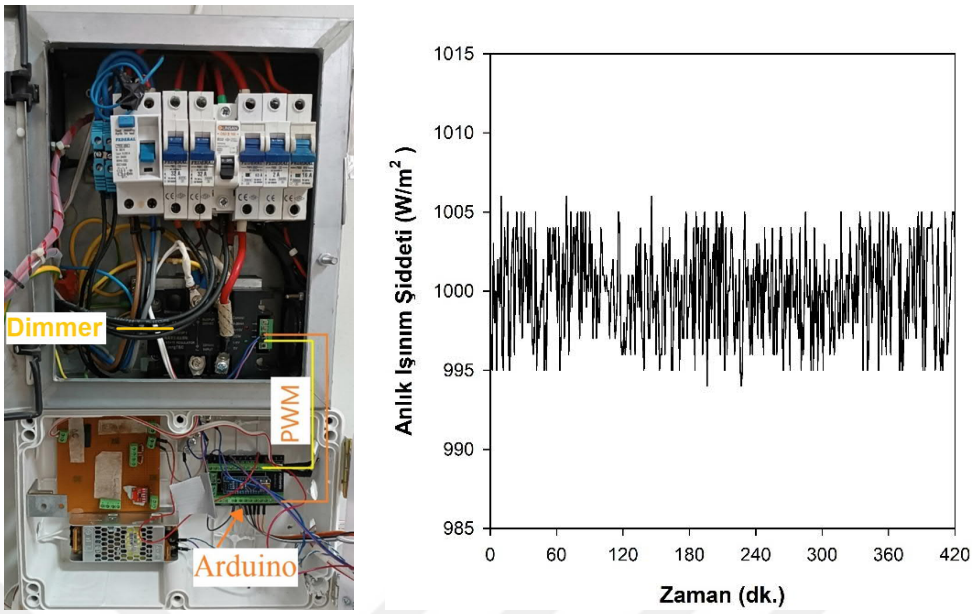


(a) (b)

Şekil 30. Işık kaynağındaki lambaların çalışma düzeni (a), çalışma düzenine karşı elde edilen ışınım şiddet haritası (b)

Lambalara sağlanan elektriksel gücün (ışınım şiddetinin) değiştirilebilmesi ve güç kontrolü için PWM sinyali ile kontrol edilebilen bir kısma (dimmer) ünitesi elektrik hattında kullanılmıştır. Devrede kontrolcü olarak ise Arduino Nano modülü kullanılmıştır (bkz. Şekil 31). Kısma ünitesinin çıkışındaki anlık gerilim kontrolcü tarafından ölçülmüş ve voltaj değerindeki gerekli değişim için PWM sinyalindeki gerekli düzenleme yine kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 31'de ilgili devreler ile birlikte elde edilen anlık ışınım şiddeti grafiği 7 saatlik bir zaman periyodu için verilmiştir. Yapılan analiz sonucu ışınım şiddetindeki anlık değişimin %1'i aşmadığı ve ışık sisteminin kararlılık yönünden A sınıfı bir özellik sunduğu belirlenmiştir.

Özetle, dikkate alınan bu yapay ışık kaynağı tasarımının, spektral benzerlik, ışınım dağılımı ve kararlılık yönünden sırasıyla C, B ve A sınıfı özellikler sunduğu belirlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 31. Lamba güç kontrol devresine ait görsel (a), anlık ışınım şiddeti grafiği (b)

2.4.2. Piranometre (Işınım Şiddetinin Ölçümü)

Piranometreler, güneş radyasyonunun veya yapay ışık kaynaklarından yayılan radyasyonun yoğunluğunu ölçmek için sıklıkla kullanılan cihazlardır. Piranometreler temel olarak merkezinde yer alan ışınıma duyarlı bir sensör ve sensör çevresinde farklı açılardan gelen ışınımı sensör üzerine yönlendirmek ve sensörü korumakla görevli cam bir kubbeden meydana gelmektedir. Piranometrelerde sensörlerin çıktıları ikincil ekipmanlar yardımıyla ölçülmekte ve ışınım şiddeti W/m² cinsinden belirlenmektedir.

Konuyla ilişkili çalışmalar incelendiğinde farklı sensör tiplerine sahip piranometrelerin bu amaç doğrultusunda kullanıldığı görülmektedir (Eltbaakh vd., 2011). Tüm sensör tipleri farklı avantaj ve dezavantajlar sunmakla birlikte, dalga boyu ölçüm aralıkları da farklılık göstermektedir. Bu farklılık, özelikle güneşten farklı bir spektral dağılımın söz konusu olduğu laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda dikkate edilmesi gereken bir noktadır. Sensörlerin temelde güneş ışınımına göre kalibre edildiği düşünüldüğünde, daha geniş bir spektral aralıkta ölçüm yapabilen ve spektral dağılımdaki değişime duyarlı bir sensörün tercih edilmesi çalışmanın doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında deneylerin, tungsten-halojen lambalar içeren bir yapay bir ışık kaynağı altında yapılması sebebiyle termopil sensöre sahip, Kipp&Zonen CMP11 marka/model bir piranometre deney düzeneğinde kullanılmıştır. Piranometre tarafından

sağlanan çıktı, piranometre ile uyumlu bir veri derleyici ile okunmuştur (Kipp&Zonen METEON). Şekil 32'de ilgili piranometreye ait görsel, Tablo 4'de ise teknik özelliklere yer verilmiştir. Termopil sensörlü piranometreler, sundukları geniş spektral ölçüm aralığıyla (285-2800 nm) halojen lambalar tarafından yayılan ışınımın dalga boyu aralığını büyük oranda kapsamaktadır.



Şekil 32. Çalışmada kullanılan piranometre ve veri derleyicisi

Tablo 4. Kipp&Zonen CMP11 piranometrenin teknik özellikleri

Spektral aralık	285-2800 nm
Hassasiyet	7 -14 µV/W/m²
Tepki süresi	< 5sn
Yön hatası	(1000 W/m²'de 80°'ye kadar) < 10 W/m²
Maksimum akı	4000 W/m²
Görme alanı	180°

2.4.3. Veri Derleme Cihazı (Sıcaklık Ölçümü)

Test bölgesine yerleştirilen termoeleman çiftleri üzerinden sıcaklık verileri, Rigol/M300 marka/model yüksek hızlı bir veri derleme cihazı ile toplanmıştır. İlgili cihaz, farklı tip termoeleman çiftleri üzerinden periyodik ve yüksek hızlı ölçüm yapma imkânı tanımakta, ayrıca toplanan verileri bilgisayar ortamına aktarabilmektedir. Bu doğrultuda, Şekil 27'de konumları verilen 36 adet T tipi termoeleman çifti (Omega - TFCC ve TFCP), 2 adet 20 kanallı çoklayıcı modül (Rigol/MC3120) aracılığıyla veri derleme cihazına bağlanmış ve tüm termoleman çiftleri üzerinden 30 saniye ara ile sıcaklık taramaları gerçekleştirilmiştir. Bu sayede deney süresi boyunca PV-FDM üniteleri içerisindeki sıcaklık

dağılımları zaman bağımlı olarak elde edilmiştir. Şekil 33'te ilgili ekipmana ait fotoğraf, Tablo 5'de ise cihazın çalışmayla ilişkili teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 33. Çalışmada kullanılan veri derleme cihazı ve çoklayıcı modül

Tablo 5. Rigol M300 veri derleme cihazı ve MC3120 çoklayıcı modül teknik özellikleri

DC voltaj ölçüm limiti	300 V
DC akım ölçüm limiti	1 A
Kanal sayısı (MC3120)	20
Bağlantı türü	2-kablolu (2-wire)
Doğruluk (T tipi termoeleman)	±0.5°C
Veri tarama hızı	60 kanal/s
Filtreleme bant genişliği	3 Hz-300 kHz

2.4.4. DC Elektronik Yük Cihazı (Elektriksel Güç Ölçümü)

PV panellerin elektriksel güç çıktıları, panele uygulanan elektriksel yük değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu ilişki, Şekil 5'de sunulan I-V ve P-V eğrilerinde açıkça görülmektedir. Bu ilişki nedeniyle, panelin belirli bir koşul altında üretebileceği maksimum gücü ölçebilmek için elektriksel yükün adımsal olarak değiştirilmesi gerekmektedir.

Literatürde, bu amaçla reostalar, MPPT (maksimum güç takipçisi) devreleri ve DC elektronik yük cihazları gibi çeşitli ekipmanların kullanıldığı görülmektedir. Reostalar, PV panellere seri bağlanarak direnç değerinin manuel olarak değiştirilmesiyle farklı adımlarda akım ve gerilim ölçümü yapılmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntem, açık devre geriliminden (V_{OC}) kapalı devre akımına (I_{SC}) kadar ölçüm yapılmasını sağlasa da manuel doğası nedeniyle uzun süreli ve tekrarlı ölçüm doğrultusunda pratik bir çözüm sunmamaktadır. MPPT devreleri ise, solar bataryaları maksimum güç noktasında şarj etmek amacıyla tasarlanmış devreler olup bağlandıkları paneli sürekli olarak maksimum güç

noktasında çalıştırmaktadır. Ancak bu yaklaşım, sabit çalışma noktası nedeniyle V_{OC} ve I_{SC} gibi elektriksel karakteristiklerin belirlenmesini engellemektedir. DC elektronik yük cihazları ise bu doğrultuda hassas ve hızlı bir şekilde dijital olarak yük değiştirme olanağı sağlayan, eş zamanlı ölçüm yaparken veri kaydı da sağlayabilen cihazlardır. Bu cihazlar, dijital olarak periyodik komut alma, akım, gerilim ve güç ölçümlerini bilgisayar ortamına aktarma özellikleri sayesinde laboratuvar deneyleri için hassas ve uygulanabilir çözüm sunmaktadırlar.

Sunulan avantaj ve dezavantajlar dikkate alınarak bu çalışmada, Rigol/DL3021 marka/model programlanabilir bir DC yük cihazı kullanılmıştır. Şekil 34'te cihazın görseli ve PV panel bağlantı şeması, Tablo 6'da ise teknik özellikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere PV panelin +,- uçları ikincil bir ölçüm cihazı gereksinimi olmadan doğrudan cihazın terminallerine bağlanmaktadır. Deneylerde, cihazın sabit direnç modu ve liste fonksiyonu (list function) kullanılarak, panele uygulanan direnç değeri 2 **Ω** ile 1000 **Ω** arasında hızlı ve küçük adımlarla değiştirilmiştir. Bu yöntemle, farklı zaman dilimlerinde periyodik olarak I-V ve P-V eğrileri elde edilmiş, incelenen tüm sistemler için maksimum güç takibi yapılmıştır. Sunulan yöntem, hızlı ve hassas ölçüm sağlaması nedeniyle deneysel düzeneği için ideal bir çözüm sunmuş olup literatürde konuyla ilişkili güncel çalışmalarda tercih edilmektedir (Adibpour vd., 2021; Singh vd., 2020; Xu vd., 2020; Yin vd., 2019).



Şekil 34. Çalışmada kullanılan DC elektronik yük cihazı (Rigol/DL3021a)

Tablo 6. Rigol DL3021a DC elektronik yük cihazına ait teknik özellikleri

Maksimum ölçüm voltajı ve doğruluk	150 V, ±%0,05
DC akım ölçüm limiti ve doğruluk	40 A, %0,1
İç direnç	350k**Ω**
Bağlantı türü	2-kablolu (2-wire)
Ölçüm modları	CP, CR, CV, CC

2.5. Deney Prosedürü

Çalışma kapsamında ortaya konan farklı tasarımlara sahip her bir PV-FDM sistemleri ile tanımlanan çalışma parametreleri altında deneyler gerçekleştirilmiş ve performans çıktıları için gerekli veriler toplanmıştır. Deney sürecinde sırasıyla şu adımlar takip edilmiştir.

1. Performansı test edilecek PV- FDM sistemi kabin içerisinde yer alan taşıyıcı sistem üzerine yerleştirilir. Daha sonra taşıyıcı sistemin ve yapay ışık kaynağının açısı deneysel olarak incelenecek açı değerine ayarlanır.
2. Kabinde tutulan PV-FDM sisteminin tüm noktalarında sıcaklığın kabin ortam sıcaklığına şartlanması sağlanır. Bu doğrultuda gerekli süre her bir PV-FDM sistemi için farklılık göstermekte olup şartlanma durumu, PV-FDM sistemine yerleştirilen tüm termolemenlar üzerinden takip edilir.
3. Şartlanmanın ardından ışık kaynakları açılır, ışınım şiddeti piranometre ve kontrol devresi yardımıyla hızlıca istenilen değere ayarlanır (<5sn).
4. Işık kaynağının açılmasıyla birlikte tüm ölçüm cihazları üzerinden periyodik ölçümler alınmaya başlanır ve deney süreci başlatılmış olur. Bu noktadan itibaren elektrik ve sıcaklık verileri ilgili ölçüm cihazları vasıtasıyla bilgisayar ortamına 30 saniye arayla kaydedilir.
5. Deney süresi (420 dakikanın) tamamlandıktan sonra ışınım kaynağı kapatılır ve PV- FDM sistemi için deşarj (katılaşma) süreci başlatılmış olur. Bu andan itibaren elektrik ölçümleri sonlandırılırken sıcaklık ölçümlerine devam edilir. PV-FDM sistemi içerisindeki tüm noktalarda sıcaklık değeri başlangıç koşuluna (ortam sıcaklığına) dönene kadar deşarj süreci devam ettirilir.

2.6. Deneysel Verilerin İşlenmesi ve Dikkate Alınan Performans Çıktıları

Çalışma kapsamında, her bir PV-FDM sistemi üzerinden toplanan zaman bağımlı sıcaklık ve elektrik verileri üzerinden performans değerlendirmesine yönelik hesaplamalar yapılmıştır. İlgili çıktılar, gereksinimleri ve kullanılan bağıntılarıyla birlikte şu şekildedir:

2.6.1. PV Panel ve FDM Sıcaklığı

PV panel yüzeyinde ve FDM katmanı içerisindeki bölgesel sıcaklık değerleri, FDM destekli ısı alıcı destekli sistemlerde önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılık temel olarak, FDM içerisindeki ısı transfer mekanizmaları ve erime davranışının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında PV panel arka yüzeyi ve FDM katmanına ait bölgesel sıcaklık haritaları sunulmuş olsa da, sistemler arasında kolay karşılaştırma yapabilmek adına ortalama değerlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde genellikle bu doğrultuda panel arkasına ve FDM katmanı içerisine yerleştirilmiş ölçüm ekipmanlarından alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmaktadır.

Bu çalışma kapsamında da, anlık ortalama PV panel sıcaklığı (T_{PV}) ve FDM sıcaklığının (T_{FDM}) hesaplanması için benzer yaklaşım dikkate alınmış ve ilgili değerler, sırasıyla panel arkasından ve FDM ile temas halinde bulunan tüm sıcaklık ölçüm noktaların aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda kullanılan formüller, termoelemenlara ait ilgili alt indislerle birlikte aşağıda verilmiştir (bkz. Şekil 27):

$$T_{PV} = \frac{\sum_{i=1}^{4}\left(T_{A,i,1} + T_{B,i,1} + T_{C,i,1}\right)}{12} \tag{7}$$

$$T_{FDM} = \frac{\sum_{i=1}^{4}\left(T_{A,i,1} + T_{B,i,1} + T_{C,i,1} + T_{A,i,2} + T_{B,i,2} + T_{C,i,2} + T_{A,i,3} + T_{B,i,3} + T_{C,i,3}\right)}{36} \tag{8}$$

2.6.2. Toplam Erime ve Katılaşma Süreleri

FDM'in erime ve katılaşma sürelerinin belirlenmesi, PV-FDM sistemlerinin termal yönetim performansını değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Faz değişim sürecinin yavaş olması, panel sıcaklığının istenilen seviyede tutulmasını zorlaştırabilirken, çok hızlı gerçekleşmesi ise FDM'nin ısı depolama kapasitesinin verimsiz kullanılmasına yol açabilmektedir. Bu bağlamda erime süresi, FDM'nin PV panelden gelen fazla ısıyı ne kadar süre boyunca absorbe edebileceğini ve sistemin sıcaklık kontrol süresini belirleyen önemli bir parametredir. Katılaşma süresi ise FDM içerisinde depolanan gizli ısının dış ortama atılarak tamamen katı hale gelmesi için gereken süreyi ifade etmektedir. Her bir sistem için bu sürelerin izlenmesi, katılaşma oranına bağlı olarak ardışık günlerde sağlanacak soğutma performansının değerlendirilmesi açısından gereklidir.

Bu çalışmada, erime ve katılaşma süreleri, her bir ısı alıcı ve deney parametresi için FDM tabakası içerisine yerleştirilmiş termoeleman sıcaklıkları üzerinden tespit edilmiştir. Erime süresi, tüm ölçüm noktalarındaki sıcaklıkların faz dönüşüm sıcaklığını (36 °C, bkz. Tablo 2) aştığı an olarak tanımlanırken, katılaşma süresi ise ilgili noktaların sıcaklıklarının faz dönüşüm sıcaklığının altına düştüğü an olarak dikkate alınmıştır.

2.6.3. Termal Regülasyon Süresi

FDM destekli ısı alıcıları ile sağlanan termal regülasyon süresi, PV panellerin sunduğu soğutma kapasitesinin ve bu süreye etki eden parametrelerin analizinde kritik bir parametredir. Termal regülasyon süresi, belirli bir ışınım altında uygulanan soğutma ile PV panel sıcaklığının, kritik bir eşik değerin altında tutulduğu süreyi ifade etmektedir. Bu çalışmada, eşik değer olarak aynı ortam koşullarında ısı alıcısız (referans) bir PV panelin ulaştığı maksimum sıcaklık değeri esas alınmıştır. Elektriksel performansın iyileştirildiği bu regülasyon süresi, ısı alıcılı PV panel sıcaklığının referans sıcaklığa ulaştığı zaman aralığı olarak tanımlanmıştır. Bu süre literatürde, farklı ısı alıcı tasarımlarının etkinliğinin karşılaştırılmasında önemli bir performans göstergesi olarak dikkate alınmaktadır.

2.6.4. Anlık Maksimum Elektriksel Güç

PV panel tarafından üretilebilen anlık maksimum güç, hücre sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Çalışmanın ana hedefi, sıcaklığa bağlı güç düşüşünün engellenmesi olması sebebiyle bu değerin takibi, uygulanan soğutma sisteminin anlık performansının izlenmesi için gereklidir. Bu doğrultuda PV panel tarafından üretilen anlık maksimum güç (P_{MAKS}), elektronik yük cihazı ile periyodik olarak (30 s aralıklarla) elde edilen I-V (akıma karşılık voltaj) verileri üzerinden belirlenmiştir. Farklı zaman adımları için elde edilen her bir I-V veri listesi analiz edilmekte ve P_{MAKS} değeri anlık veri listesi üzerinden şu şekilde belirlenmektedir:

$$P_{MAKS} = maksimum(I \times V) \tag{9}$$

Burada P_{MAKS}, PV panelin maksimum anlık güç çıkışını ifade etmekte olup, periyodik olarak gerçekleştirilen I-V taramaları sonucunda elde edilen veri listesindeki I × V değerlerinin maksimumu olarak belirlenmektedir.

2.6.5. Toplam Elektrik Enerjisi Üretimi

Işınım altında çalışan PV-FDM sistemleri, tasarımlarına bağlı olarak farklı zaman adımlarında değişken elektriksel güç çıktıları sunmaktadır. Bu nedenle, anlık maksimum elektriksel güç takibine ek olarak, her bir ısı alıcı sistem için deney süresi boyunca üretilen toplam elektrik enerjisinin belirlenmesi, performans karşılaştırmaları açısından önemli bir kriterdir. Bu bağlamda, toplam elektrik enerjisi (P_{TOPLAM}), anlık maksimum elektriksel güç verileri kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$P_{TOPLAM} = \sum_{1}^{n} \left(P_{MAKS_n} \times \left(\frac{30\ (s)}{3600\ (s)} \right) \right) \tag{10}$$

Burada P_{TOPLAM}, Watt-saat (Wh) cinsinden ifade edilmiş olup, $P_{MAKS,n}$ herhangi bir ölçüm anındaki maksimum güç çıktısını temsil etmektedir. Denklemden de anlaşılacağı üzere toplam elektrik enerjisi üretimi, güç ölçüm periyodu nedeniyle 30 saniyelik adımlarla hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında dikkate alınan tüm bu performans çıktıları, her bir ısı alıcının PV soğutmadaki başarısını ve uygulanan soğutma sistemi ile elektrik üretimine etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Her bir sistem için ilgili değerler elde edilmiş ve çalışmanın bulgular kısmında karşılaştırmalı olarak detaylıca sunulmuştur.

2.7. Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada gerçekleştirilen sıcaklık, elektriksel değerler ve ışınım şiddeti dâhil olmak üzere tüm ölçümler, kullanılan ölçüm cihazlarının doğasında bulunan belirli bir hata payına tabidir. Deneysel sonuçların hesaplanmasında kullanılan tüm parametrelerin hata analizi, sunulan sonuçların doğruluğunun tespiti adına büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda bir belirsizlik analizi bu çalışma kapsamında da gerçekleştirilmiştir. Gerekli belirsizlik değerleri, her bir ölçüm cihazına ait kataloglardan elde edilmiş ve Tablo 7'de verilmiştir. Ayrıca cihazların kalibrasyon ve doğruluk durumları daha yüksek hassasiyete sahip cihazlarla kontrol edilmiştir. Bu amaçla, ±0,02 °C hassasiyetinde bir kalibrasyon banyosu (Labo/DX-300) ve %0,05 DC voltaj hassasiyetinde bir yüksek hassasiyetli multimetre (Fluke/87V) kullanılarak, ölçüm sonuçlarının katalog değerleriyle

karşılaştırılması yapılmıştır. Belirsizlik analizi, Kline ve McClintock tarafından önerilen ve yaygın olarak bilinen yönteme göre gerçekleştirilmiştir (Kline, S.J., 1963).

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2\right)^2 + \cdots \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (11)$$

Burada WR, hesaplanan R değerinin hata oranını temsil etmektedir. WR, n bağımsız değişkenin (x_1, x_2, ..., x_n) hata oranlarından (W_1, W_2, W_3, ..., W_n) etkilenmekte ve bu oranlar cinsinden ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında ölçülen büyüklükler üzerinden temel olarak anlık güç çıktısı hesaplanmış ve diğer birçok parametre bu güç çıktısı üzerinden türetilmiştir. Bu kapsamda PV panel güç çıktısındaki hata (W_{PPV}), gerilim (V) ve akım (I) ölçümlerindeki hatalardan etkilenmekte olup şu şekilde ifade edilmektedir:

$$W_{P_{PV}} = \left[\left(\frac{\partial_{P_{PV}}}{\partial_V} \delta W_V\right)^2 + \left(\frac{\partial_{P_{PV}}}{\partial_I} \delta W_I\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Tablo 7'de sunulan formül ve hata oranları kullanılarak PV panelin anlık ve toplam güç çıktısına ilişkin belirsizlik %0,11 olarak hesaplanmıştır. Hata oranı benzer çalışmalarda %1,4 seviyesinde olup güç çıktısına ilişkisin hesaplanan bu değer kabul edilebilir düzeyde değerlendirilmiştir (Qu vd., 2024a).

Tablo 7. Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm ekipmanlarına ait belirsizlikler

Ölçüm	**Ekipman**	**Marka/model**	**Belirsizlik**
Sıcaklık	Veri derleme cihazı	Rigol / M300	± 0.1ºC
Voltaj (PV)	DC yük cihazı	Rigol / DL3021A	± %0,05
Akım (PV)	DC yük cihazı	Rigol / DL3021A	± %0,1
Işınım	Piranometre	Kipp&Zonen / CMP11	± %0,5

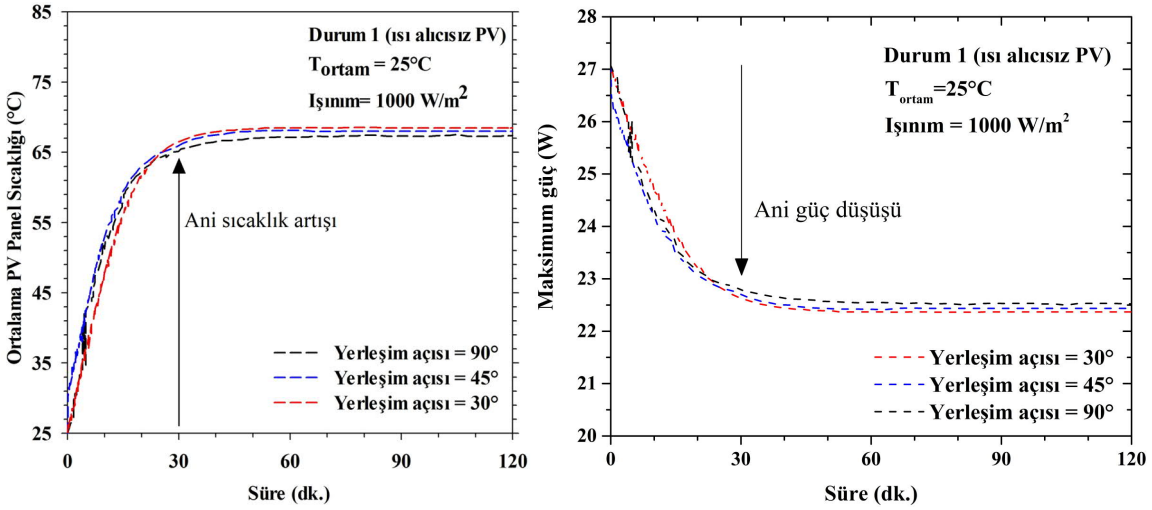
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada fotovoltaik bir panelin hava ve faz değiştiren madde destekli ısı alıcılarıyla soğutulma süreci deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında konvansiyonel ve özgün ısı alıcılı sistemlerin farklı çalışma koşulları altında paneli soğutmadaki başarısı, sistemin termal davranışının belirlenmesi ve elektriksel performans takibi çalışmanın ana çıktıları olarak sunulmuştur.

3.1. Isı Alıcısız PV Sisteminin (Durum 1) Isıl ve Elektriksel Davranışının Belirlenmesi (Referans Durum)

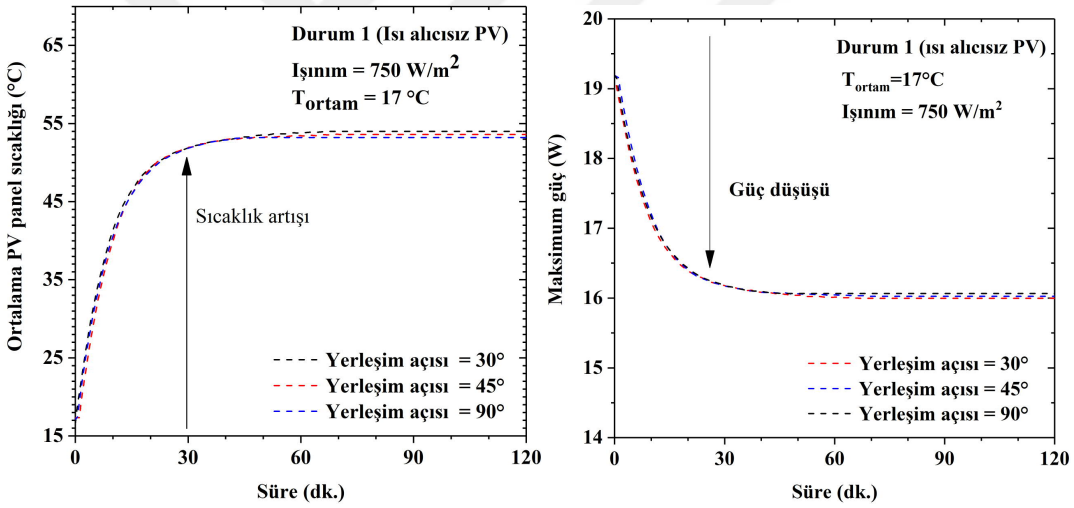
Çalışma kapsamında ilk aşamada ısı alıcısız PV panelin (Durum 1) ışınım yükü altındaki ısıl davranışı ve buna bağlı elektriksel karakteristiklerindeki değişimler yapılan deneylerle ortaya konmuştur. Ayrıca Durum 1 için yapılan deneylerle ısı alıcılı sistemlerin performanslarının değerlendirilmesi doğrultusunda referans veriler elde edilmiştir.

Şekil 35 ve 36'da ısı alıcısız PV panele ait zaman bağımlı ortalama sıcaklık ve maksimum güç çıktısındaki değişimler verilmiştir. Şekil 35a ve 36a'dan görüldüğü üzere PV panel üzerine ışınım yüklerinin uygulanmasıyla birlikte PV panel sıcaklığında ilk 30 dakika içinde ani bir artış gözlemlenmiş ve yaklaşık 50 dakika itibariyle panel sıcaklığı maksimum değerine ulaşmıştır. Panel sıcaklığındaki bu artış, panele entegre edilmiş ısı alıcı herhangi bir sistemin olmamasının ve ısı transferinin sınırlı yüzeyden gerçekleşmesinin bir sonucudur. Daha önce de ifade edildiği üzere, sınırlı verim değerine bağlı olarak paneller üzerine düşen ışınım enerjisinin büyük kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir. Isı alıcı olmadığı durumda ise bu ısı, panelden çevre ortama büyük oranda doğal taşınım yoluyla transfer olmakta, yetersiz ısı transfer yüzeyi ve düşük ısı transfer katsayıları sonucu hücre sıcaklıklarında yüksek sıcaklık artışları gözlemlenmektedir. İlgili şekillerden görüldüğü üzere, 1000 W/m^2 ışınım şiddeti ve 25 °C ortam sıcaklığı altında yapılan deneylerde Durum 1 için maksimum PV sıcaklık değeri 30° yerleşim açısı için yaklaşık 69 °C olarak tespit edilmiştir. Bu değer 750 W/m^2 ışınım şiddeti ve 17 °C ortam sıcaklığı için ise 54 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca ilgili sıcaklıklar, artan yerleşim açısına bağlı olarak panel ön ve arka yüzeylerinde ısı taşınım katsayısının iyileşmesi sonucu 90° için yaklaşık 2 °C azalma meydana gelmiştir.



(a) (b)

Şekil 35. Isıl yük altında ısı alıcısız PV panel (Durum 1) için ortalama PV panel sıcaklığı ve maksimum gücün zamanla değişimi, (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C)



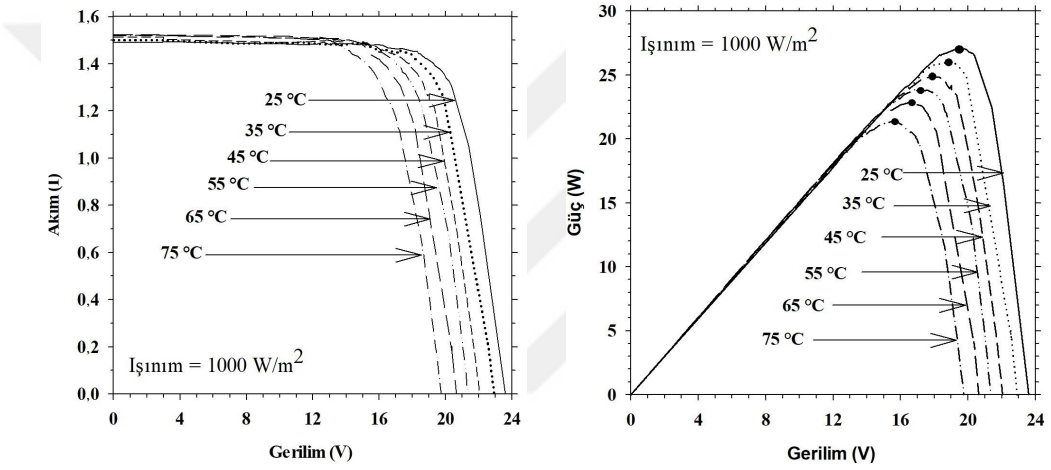
(a) (b)

Şekil 36. Isıl yük altında ısı alıcısız PV panel (Durum 1) için ortalama PV panel sıcaklığı ve maksimum gücün zamanla değişimi, (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)

Şekil 35b ve 36b'de sunulan PV panele ait maksimum güç takibi incelendiğinde ise hücre sıcaklığındaki değişimin elektrik üretimi üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere PV panelin maksimum güç çıktısı, sıcaklık artışına paralel olarak ani bir şekilde düşmektedir. Şekil 35b'den görüldüğü üzere, ilk 30 dakika içinde PV sıcaklığının 25°C'den 68°C'ye çıkmasıyla güç çıktısı 27 W değerinden 22,3 W değerine düşerek yaklaşık %17 oranında azalma göstermiştir. 750 W/m^2 ışınım şiddeti ve 17 °C ortam

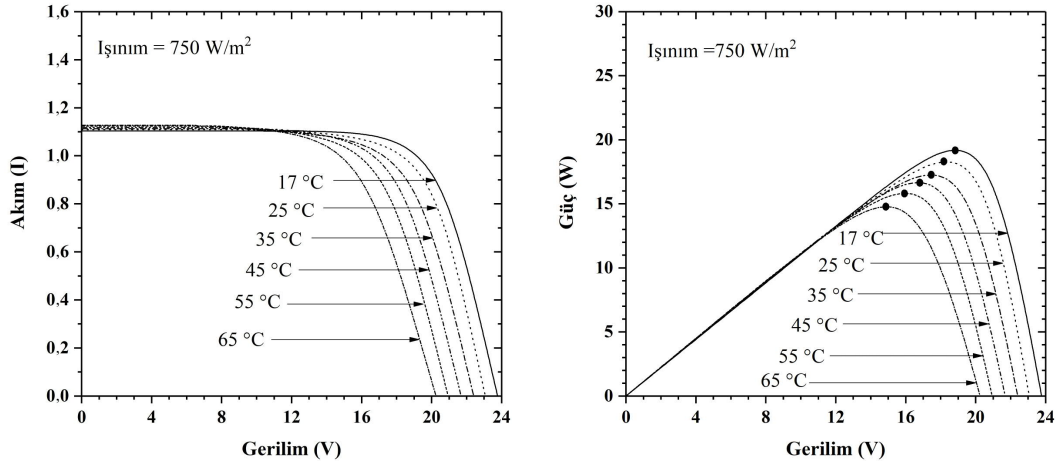
sıcaklığı altında yapılan deneylerde ise bu değer %16,6 oranında azalarak 19,3 W değerinden 16 W'a gerilemiştir.

Sıcaklık artışı ve güç düşüş ilişkisi arasındaki fiziki mekanizmalar, I-V ve P-V eğrileri üzerinden daha net açıklanabilmektedir. Bu amaçla PV panele ait karakteristik eğriler farklı sıcaklık adımları için elde edilmiş ve Şekil 37 ve 38'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde sıcaklık artışıyla beraber kısa devre akımının bir miktar arttığı fakat açık devre geriliminin daha büyük oranda düştüğü görülmektedir. Bu düşüş, aynı ışınım miktarı için panelden alınan maksimum gücün şekillerde görüldüğü üzere yaklaşık lineer olarak azalmasına neden olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 37. PV sıcaklığındaki meydana gelen artışın, ölçülen (a) I-V ve (b) P-V değerleri üzerindeki etkileri (Işınım = 1000 W/m^2)



(a) (b)

Şekil 38. PV sıcaklığındaki meydana gelen artışın, ölçülen (a) I-V ve (b) P-V değerleri üzerindeki etkileri (Işınım = 750 W/m^2)

Sıcaklık artışına kıyasla maksimum güçteki azalma değerleri göz önüne alındığında, hücre sıcaklığında meydana gelen her bir derece artış için gücün %0,42 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu değer PV paneller için sıcaklık katsayısını ifade etmekte olup literatürde monokristalin PV modüller için raporlanan değerlerle uyum içerisinde olduğu ifade edilmelidir (Takyi ve Nyarko, 2020). Durum 1'e ait sonuçlardan elde edilen ve FDM destekli sistemler için referans niteliği taşıyan bazı veriler Tablo 8'de derlenmiştir.

Durum 1 için elde edilen bu sonuçlar, sıcaklık artışının engellenmesi ve güç çıktısının korunması amacıyla PV panel ile entegre edilecek bir ısı alıcı uygulamasının gerekliliğini açıkça göstermektedir. Bu çalışma kapsamında ise, PV paneller üzerinde sıcaklık kontrolünün FDM destekli pasif ısı alıcılarla yapılması ve ilgili sürecin FDM ve hava destekli özgün ısı alıcılarıyla iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Bu bağlamda FDM destekli ısı alıcıları içerisinden öncelikle konvansiyonel (yalnız FDM destekli) sisteme ait elde edilen sonuçlar sunulmuş ve irdelenmiş, daha sonra ise özgün ısı alıcılı sistemlere (Durum 3, 4 ve 5) ait sonuçlara yer verilmiştir.

Tablo 8. Isı alıcısız PV panelden (Durum 1) elde edilen referans veriler

	Işınım = 1000 W/m^2			**Işınım = 750 W/m^2**		
	T_{ortam}= 25 °C			**T_{ortam}= 17 °C**		
Yerleşim açısı	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**
Maksimum PV sıcaklığı (°C)	68,9	68	67	54	53,4	53
Maksimum güçte azalma (%)	17,4	17,1	16,7	16,67	16,49	16,29

3.2. Konvansiyonel FDM destekli Isı Alıcısıyla Entegreli PV Sisteminin (Durum 2) Isıl ve Elektriksel Davranışı

Bu başlık altında, konvansiyonel FDM destekli ısı alıcısıyla entegre edilmiş PV panelin ısıl ve elektriksel davranışına ilişkin sonuçlar sunulmuş ve incelenmiştir. Konvansiyonel yapılı bu sistemin detaylı olarak değerlendirilmesindeki amaç aşağıdaki temel çıktıları ortaya koymaktır:

- Konvansiyonel FDM destekli ısı alıcının PV panelde sağladığı pasif soğutma performansı ve soğutma süresinin (termal regülasyon süresinin) belirlenmesi
- Regülasyon sonrası PV-FDM sisteminin davranışının tespiti

- FDM'nin ısı alıcı içerisindeki ayrıntılı erime davranışı ve panel sıcaklığına olan etkisinin açıklanması
- FDM destekli soğutmanın PV güç çıktısı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
- Konvansiyonel FDM destekli bir ısı alıcının performansını sınırlayan faktörlerin belirlenmesi
- FDM'nin katılaşma (deşarj) süreci ve konvansiyonel FDM destekli ısı alıcının bir çevrime verdiği cevabın net olarak ortaya konması

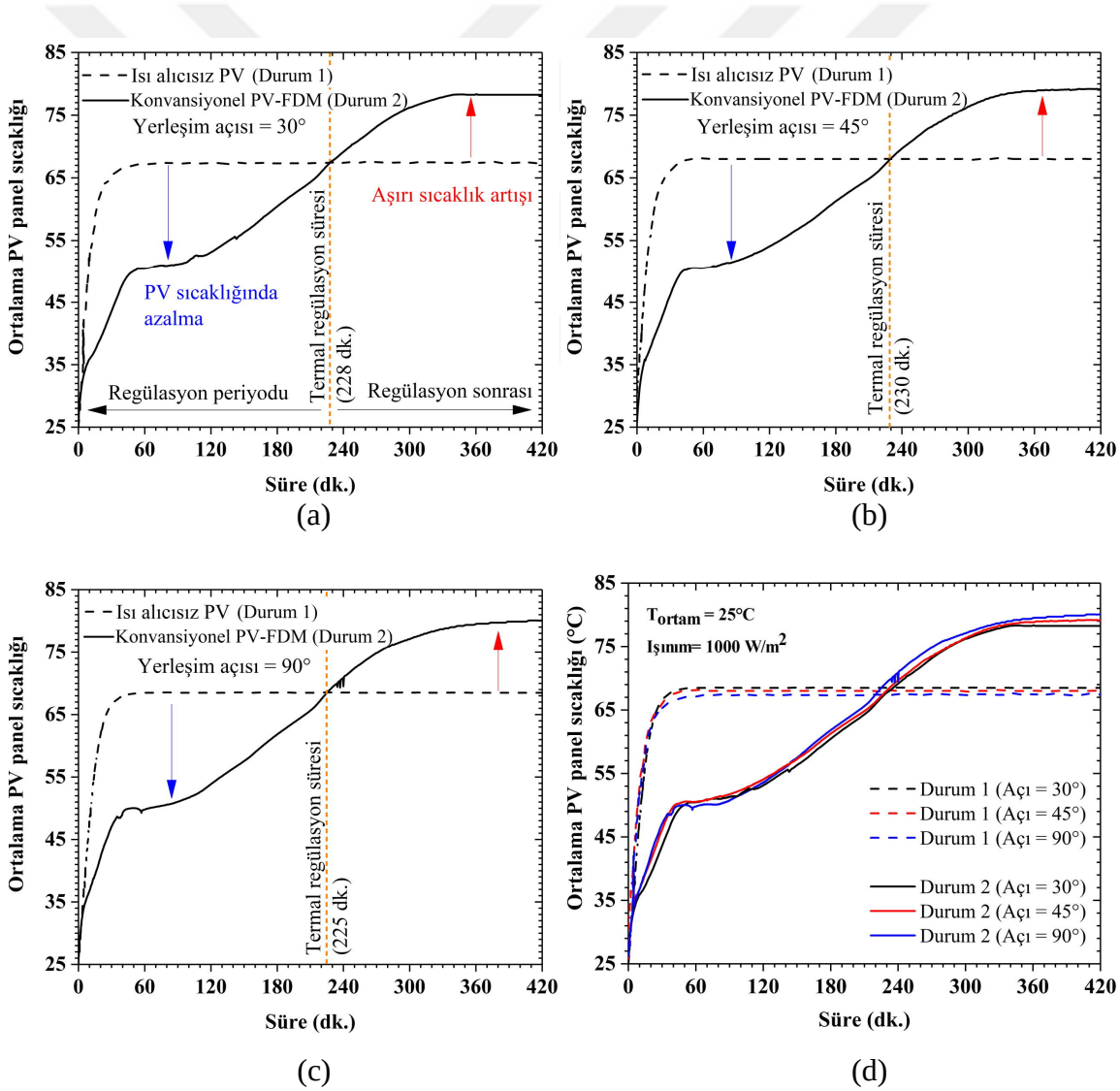
3.2.1. Durum 2'ye Ait Ortalama PV Panel Sıcaklığının Analizi

Durum 2'ye (konvansiyonel PV-FDM) ait elde edilen sonuçlar, öncelikle PV panel sıcaklığı ve güç çıktısı bakımından değerlendirilmiş, ardından bu değişimlerin arkasındaki fiziksel mekanizmalar açıklanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle konvansiyonel PV-FDM sistemine ait PV sıcaklık değerleri referans sistemle birlikte, 1000 W/m^2 ve 750 W/m^2 ışınım şiddetleri için sırasıyla Şekil 39 ve 40'ta sunulmuştur.

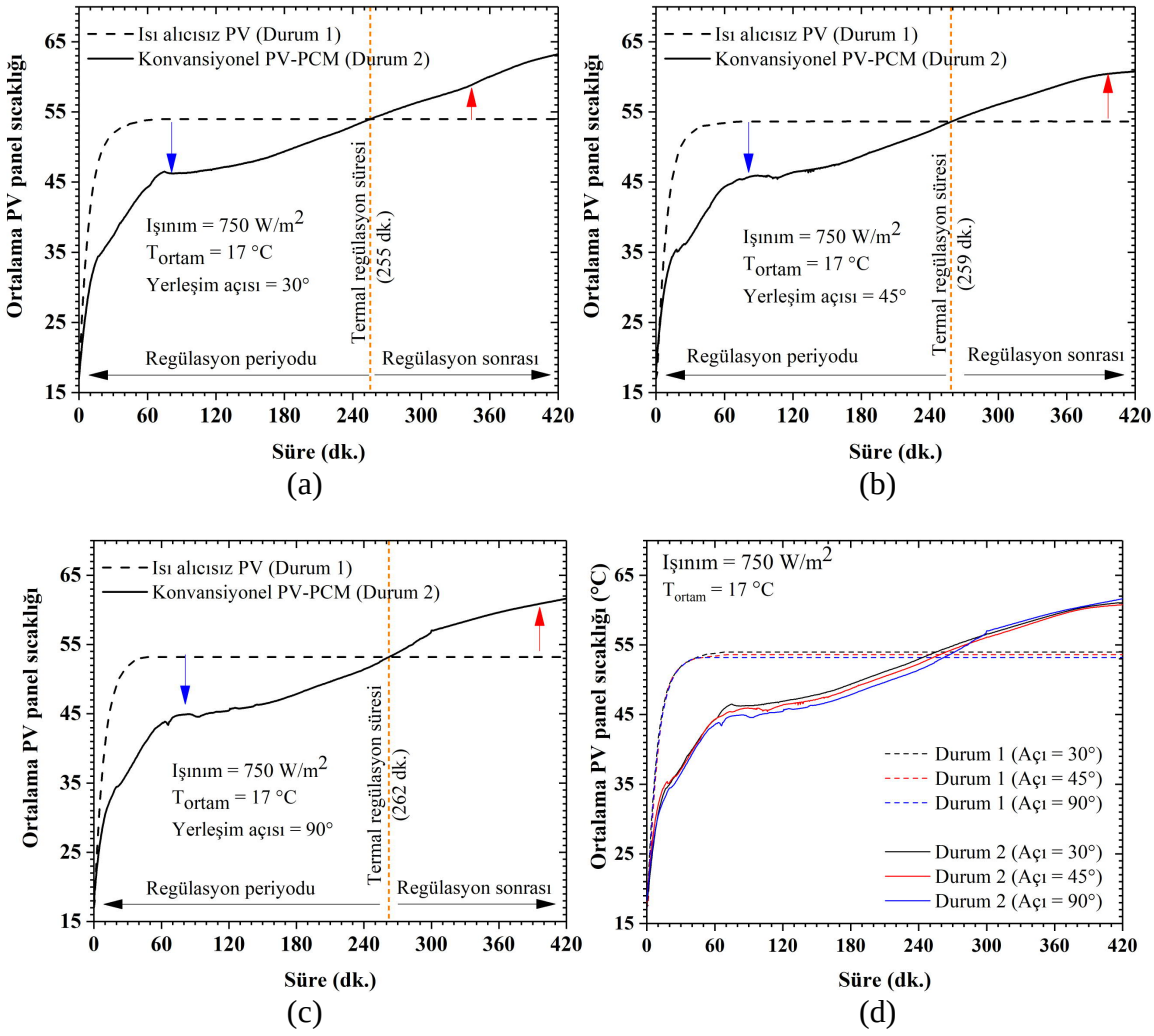
Eğriler incelendiğinde, konvansiyonel PV-FDM sistemine ait panel sıcaklığının belirli bir süre boyunca referans panelden daha düşük olduğu, ancak sürecin ilerlemesiyle bu sıcaklığın artarak referans PV sıcaklığının da üzerine çıktığı gözlemlenmektedir. Panel sıcaklığının zamanla değişimi daha detaylı incelendiğinde, sıcaklık artışının ilk olarak yaklaşık 35 °C'ye ($t \approx 10$ dk.) ulaştığı anda yavaşladığı görülmektedir. Bu durum, panel arka yüzeyinden FDM ortamına aktarılan ısının öncelikle duyulur formda depolanması ve ardından FDM'nin (RT-35HC) erime sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte gizli ısı depolamaya başlamasından kaynaklanmaktadır. Faz dönüşümü (erime) esnasında FDM önemli miktarda ısıyı soğurarak panel sıcaklığındaki artışı kontrol altında tutmakta, ancak düşük ısıl iletkenlik, sıcaklık artışının tamamen durmasını engelleyerek sürecin belirli bir artış hızıyla devam etmesine yol açmaktadır. İlerleyen dakikalara ait sıcaklık değişimi incelendiğinde ise sıcaklık artışındaki belirgin yavaşlamanın 1000 W/m^2 ışınım için yaklaşık 50. dakikadan sonra meydana geldiği ve yaklaşık 120. dakikaya kadar devam ettiği görülmektedir. Bu süreçte PV sıcaklığı 50 °C'den yalnızca 52 °C'ye yükselmektedir. Bu durum, 750 W/m^2 ışınım değeri için 80-150. dakikalar arası meydana gelmekte ve ilgili süreçte PV sıcaklığı benzer şekilde yaklaşık 2 °C'lik bir artış sergilemektedir. Fakat bu zaman aralıklarında, ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığındaki azalmayla birlikte PV sıcaklığında FDM kaynaklı düşüşün azaldığı görülmektedir. Örneğin 30° yerleşim açısı altında, değerler incelendiğinde,

1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı için 60 ve 120. dakikalar arasında PV sıcaklığında yaklaşık 17 °C'lik bir düşüş göze çarpmaktadır. Bu azalma 750 W/m^2 ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı için 7 °C olarak eğrilere yansımaktadır. Bu durum, PV panel üzerinde azalan ısıl yüke bağlı olarak ısı alıcısız PV panel sıcaklığının düşmesi ve FDM destekli ısı alıcıya duyulan ihtiyacın azalmasıyla açıklanabilir.

PV panelin sıcaklık artışındaki bu ani değişimler, panel ile FDM arasındaki ısı transfer katsayısında ani ve kayda değer bir artışın oluştuğuna işaret etmekte olup baskın ısı transfer mekanizmalarında zamanla oluşan farklılaşmadan kaynaklanmaktadır. Söz konusu mekanizma, FDM'nin erime davranışının ele alındığı sonraki başlıkta daha ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.



Şekil 39. Durum 2'ye ait ortalama PV sıcaklığının zamanla değişimi (a) 30°, (b) 45°, (c) 90°, (d) açısal karşılaştırma (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C)



Şekil 40. Durum 2'ye ait ortalama PV sıcaklığının zamanla değişimi (a) 30°, (b) 45°, (c) 90°, (d) açısal karşılaştırma (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)

PV panel sıcaklığı daha ileri dakikalar için incelendiğinde ise (t > 120 ve t > 180), sıcaklığın yeniden artış göstererek belirli bir sürenin ardından ısı alıcısız PV sıcaklığına (Durum 1) ulaştığı görülmektedir. Bu süre 30° yerleşim açısı altında, 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı için 228 dakika, 750 W/m^2 ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı için 255 dakika olarak tespit edilmiştir. Yerleşim açısının değişmesiyle ise benzer süreler elde edilmiş olup ilgili süreler farklı parametreler için Tablo 9'da derlenmiştir.

Tablo 9. Durum 2 için tespit edilen termal regülasyon süreleri

	1000 W/m^2 ışınım 25 °C ortam			**750 W/m^2 ışınım 17 °C ortam**		
Yerleşim açısı	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**
Termal regülasyon süresi (dakika)	228	230	225	255	259	262

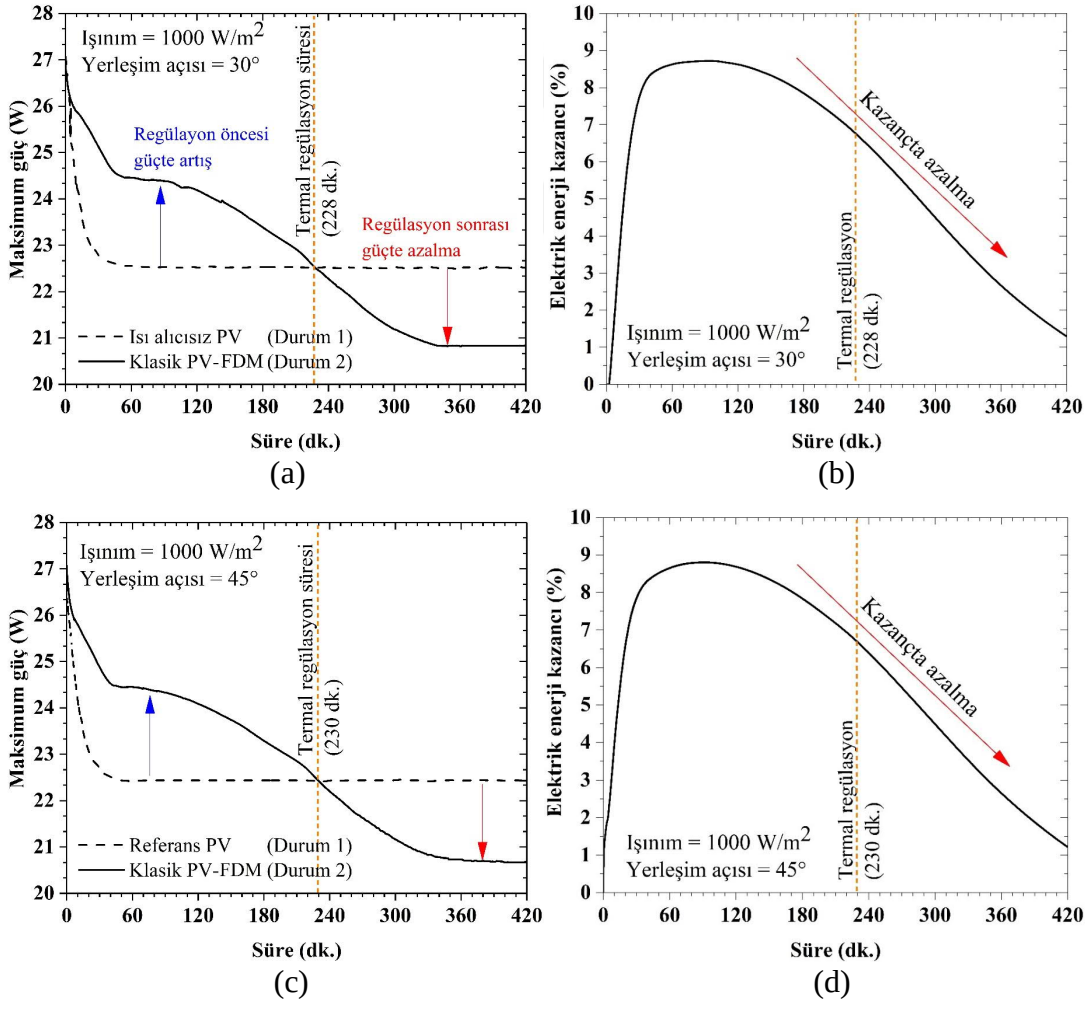
Bu durum, FDM destekli ısı alıcının yalnızca sınırlı bir süre boyunca etkili bir soğutma sağladığını ve bu etkinin, FDM'nin sınırlı gizli ısı kapasitesi nedeniyle zamanla ortadan kalktığını göstermektedir. Bu süre, termal regülasyon süresi olarak tanımlanmış olup ilgili şekillerde turuncu renkli düşey kesikli çizgiyle vurgulanmıştır. Konvansiyonel PV-FDM sistemi (Durum 2) üzerinden elde edilen en dikkat çekici sonuçlardan biriyse, termal regülasyon süresi sona erdikten sonra gözlemlenen aşırı sıcaklık artışıdır. Termal regülasyon sonrası PV sıcaklık değişimlerine bakıldığında, sıcaklığın ısı alıcısız durumun üstüne çıkarak, 1000 W/m^2 ve 750 W/m^2 ışınım altında sırasıyla 78 °C ve 63 °C'ye kadar yükseldiği görülmektedir. Bu artış, erimiş ve giderek ısınan FDM'nin panel arkasında neden olduğu yüksek termal dirençten kaynaklanmaktadır. Isı alıcısız durumla kıyaslandığında ortaya çıkan bu yüksek sıcaklık değerleri, PV panelin veriminin ve elektriksel güç kazanımının korunması açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu olumsuz etkinin güç çıktısı üzerindeki yansımaları, ilgili kısımda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.2.2. Durum 2 İçin Güç Çıktılarının Analizi

Şekil 41 ve 42'de Durum 2'ye ait anlık güç eğrileri ve ısı alıcısız duruma kıyasla anlık güç kazanım yüzdeleri sunulmuştur. Değerler incelendiğinde FDM ile sağlanan pasif soğutmanın güç çıktısı üzerindeki etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. Durum 2'ye ait güç değerleri, termal regülasyon süresi boyunca ısı alıcısız duruma kıyasla daha yüksek seviyede tutulmuştur. Örneğin 30° yerleşim açısı ve 1000 W/m^2 ışınım şiddeti için değerler incelendiğinde, referans PV için güç değerinin ilk 30 dakikanın ardından 27 W'tan 22,5 W'a düştüğü, FDM destekli ısı alıcının panel üzerinde sağladığı pasif soğutma sayesinde bu değerin 120 dakika boyunca 24,5 W değerinde kaldığı görülebilmektedir. Fakat sürecin ilerlemesiyle PV sıcaklığındaki artışa paralel olarak güç çıktısında azalma meydana gelmiş ve termal regülasyonun sona ermesiyle güç çıktısı referans değere kadar düşmüştür. Güç çıktılarının ortaya koyduğu en önemli sonuçlardan biri ise termal regülasyon sonrası gözlemlenen aşırı güç düşüşüdür. Bu düşüş, termal regülasyon sonrası panel sıcaklığında oluşan aşırı sıcaklık artışıyla meydana gelmektedir. Termal regülasyonun süresi boyunca referans duruma kıyasla elde edilen elektrik enerji kazancı termal regülasyonun süresinin ardından azalmaya devam etmektedir. Örneğin Şekil 41'den görüldüğü üzere FDM ile sağlanan termal regülasyon sayesinde %8,5'e varan enerji kazancı, regülasyon sonunda %6,5'e, deney sürenin sonunda ise ardından yaklaşık %1,5'e kadar gerilemiştir. 750 W/m^2

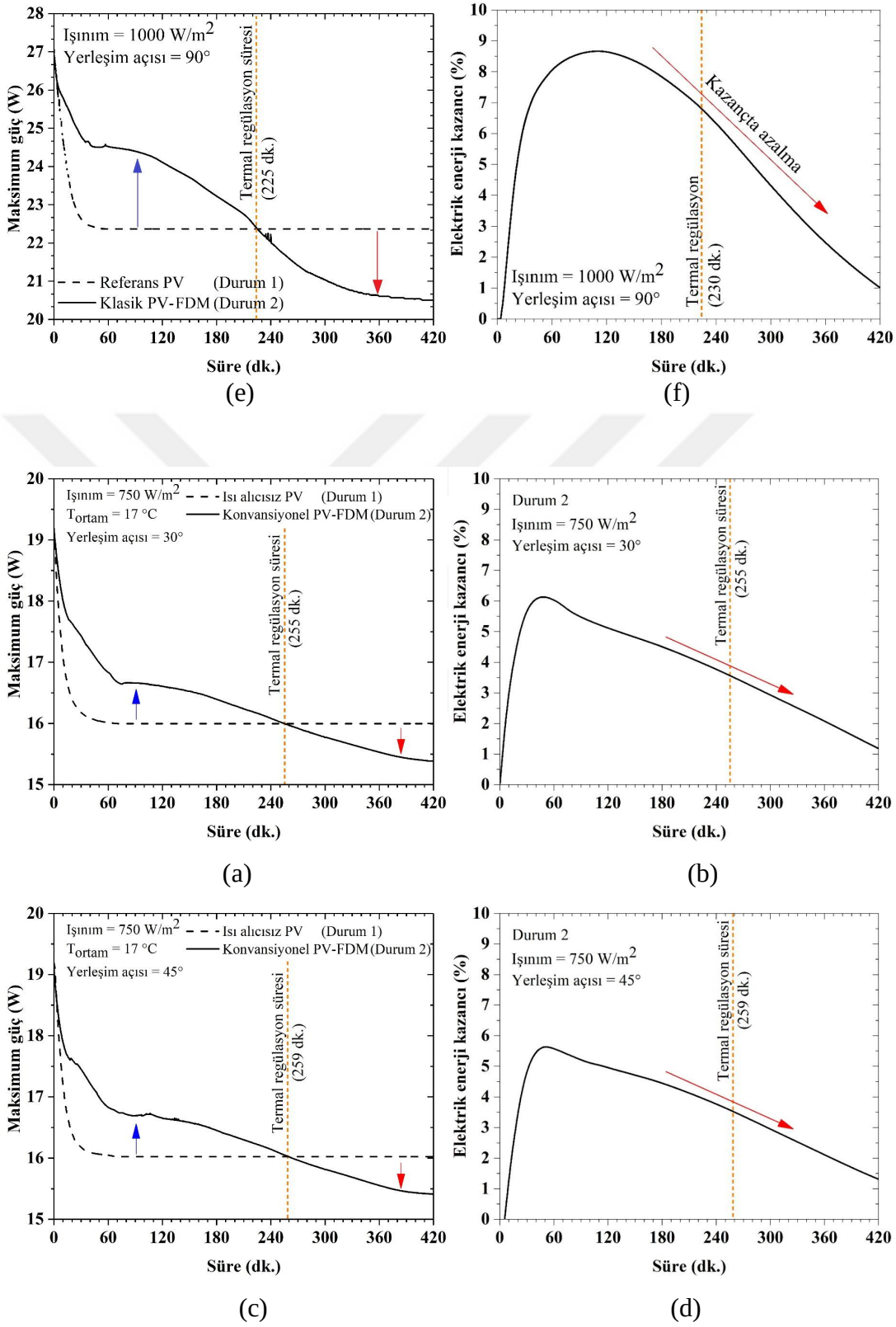
ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı altında ise bu değerler (bkz. Şekil 42), regülasyon süresi içerisinde PV sıcaklığında daha az miktarda azalma sağlandığı için maksimum %6'ya ulaşmış ve deney süresinin sonunda %1,35'e gerilemiştir. Bu durum, konvansiyonel FDM destekli ısı alıcı entegreli PV-FDM sistemleri için önemli bir sorunu ortaya koymaktadır. Bu sorun, ısı alıcının gizli ısı kapasitesinin toplam ışınım miktarına karşı yeterli gelmediği durumlarda sistemin güç çıktısını olumsuz etkilemeye başlayabileceğini göstermektedir.

Konvansiyonel PV-FDM sisteminde gözlemlenen ani sıcaklık ve güç değişimlerinin temelinde ısıl yük altındaki FDM'nin geçirdiği faz dönüşüm süreci bulunmaktadır. Bu davranışın gerisindeki fiziksel mekanizmaları tam olarak açıklayabilmek adına, FDM katmanı içerisindeki faz dönüşümünü ayrıntılı şekilde incelemek gerekmektedir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında gerekli analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar bir sonraki başlıkta sunulmuştur.



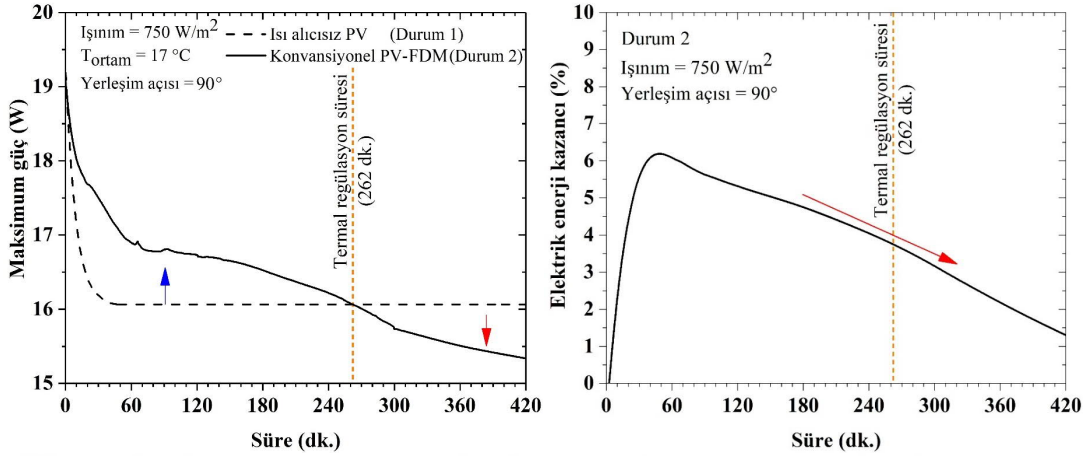
Şekil 41. Durum 2 için farklı yerleşim açıları altında anlık maksimum güç çıktıları ve elektrik enerji kazancının değişimi (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C)

Şekil 41'in devamı



Şekil 42. Durum 2 için farklı yerleşim açıları altında anlık maksimum güç çıktıları ve elektrik enerji kazancının değişimi (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)

Şekil 42'nin devamı



(e) (f)

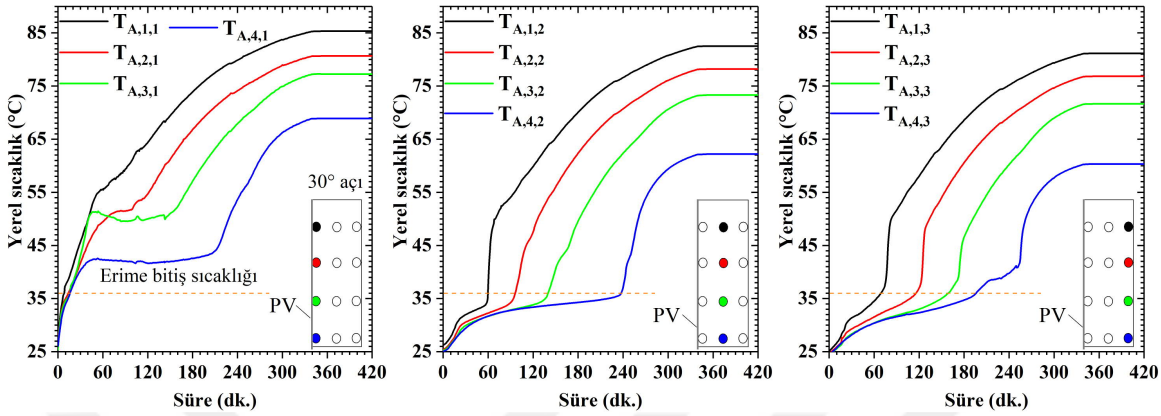
3.2.3. Durum 2 İçin Yerel Sıcaklık Dağılımının ve Erime Davranışının Analizi

a. FDM katmanı içerisindeki yerel sıcaklıkların değerlendirilmesi

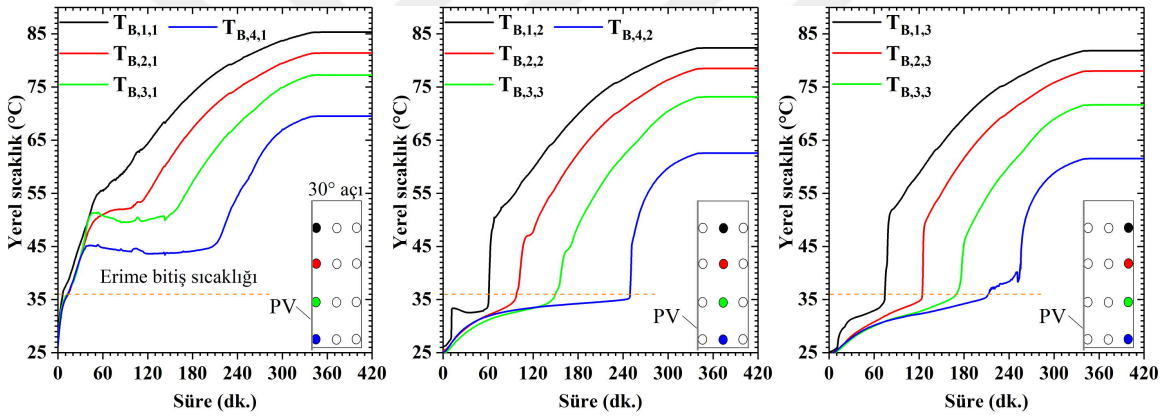
FDM içerisindeki sıcaklık dağılımını ve faz dönüşümünü ayrıntılı biçimde ortaya koymak amacıyla, katman içinde belirlenmiş noktalarda termoelemanlarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları, Şekil 43 ve 46 arasında farklı yerleşim açıları ve ortam şartları için sunulmuştur. Üç eksen üzerinde toplam 36 farklı noktada yapılan bu ölçümler, FDM tabakası içerisindeki faz değişim sürecinin konumsal ve zamansal gelişimine dair önemli veriler sunmaktadır. İlgili grafiklerde her bir ölçüm noktası farklı renklerle kodlanmış ve erimenin tamamlandığı 36 °C sıcaklık değeri yatay kesikli çizgi ile belirtilmiştir.

Yerel sıcaklık eğrileri incelendiğinde, genel olarak tüm noktalardaki sıcaklıkların, ilgili nokta erime sıcaklığına ulaşana dek yaklaşık lineer bir şekilde arttığı, erime boyunca sıcaklık artışının durağanlaştığı ve erime tamamlandığında ise tekrar yükselişe geçtiği görülmektedir. Ancak, erimenin başlama ve bitiş süreleri ile erime sonrasında erişilen maksimum sıcaklık değerleri belirgin yerel farklılıklar göstermektedir. Örneğin Şekil 43'te 1000 W/m^2 ışınım için aynı düşey eksen üzerindeki $T_{A,1,2}$ ve $T_{A,4,2}$ noktalarından görüldüğü üzere, $T_{A,1,2}$'de erime 20-60. dakikalar arasında gerçekleşip maksimum sıcaklık 83 °C'ye ulaşırken, $T_{A,4,2}$'de erime 50-250. dakikalara yayılmış ve sıcaklık erime sonrası 62 °C'ye çıkmıştır. Benzer şekilde, yatay eksende farklı konumlanan $T_{A,2,2}$ ve $T_{A,2,3}$ noktalarında da

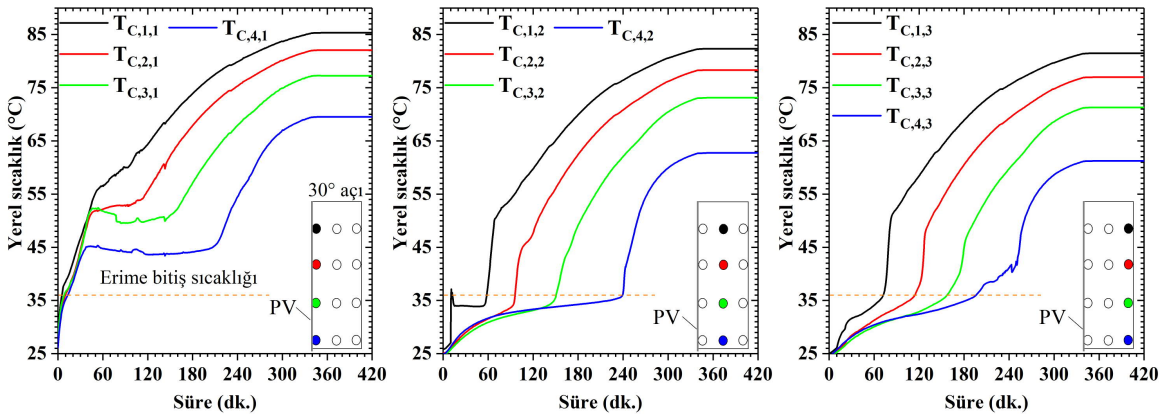
erime başlangıç-bitiş zamanlarında ve maksimum sıcaklık değerlerinde yaklaşık 30 dakikalık ve 3 °C'lik farklar gözlenmiştir.



(A Kesiti)

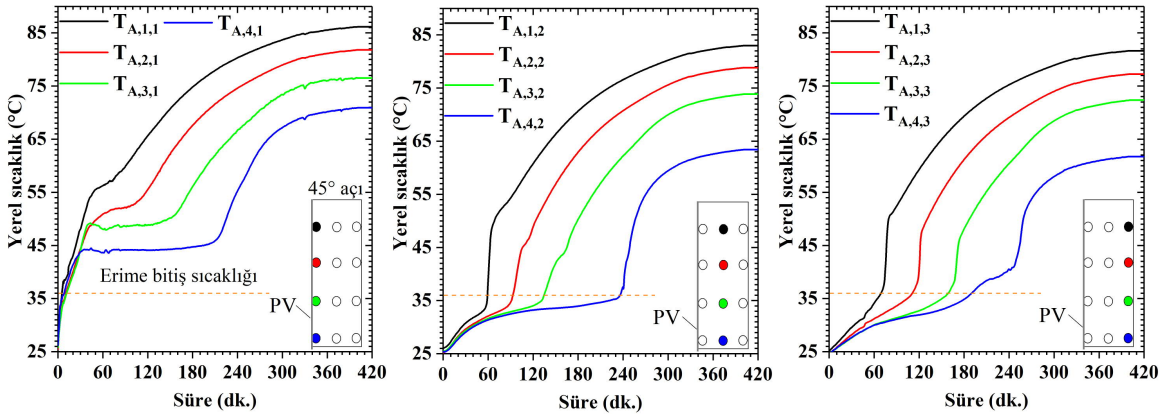


(B Kesiti)

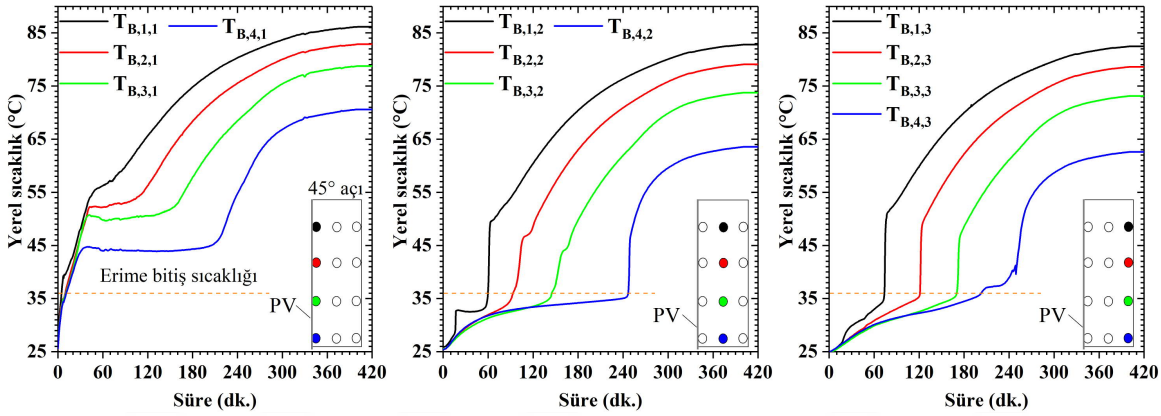


(C Kesiti)

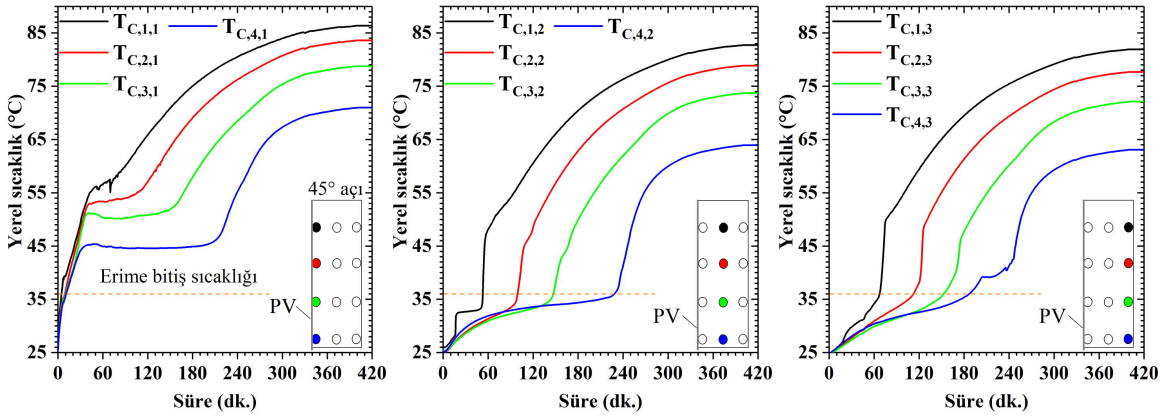
Şekil 43. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 30°)



(A Kesiti)

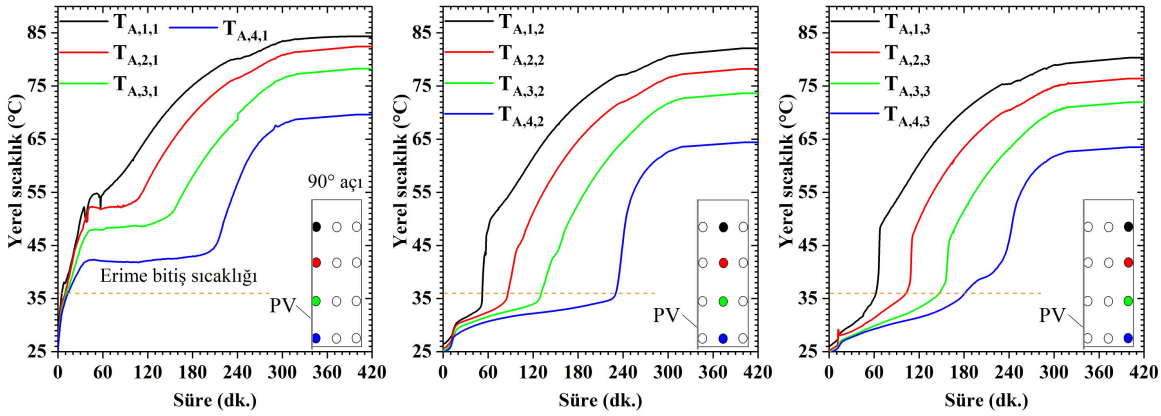


(B Kesiti)

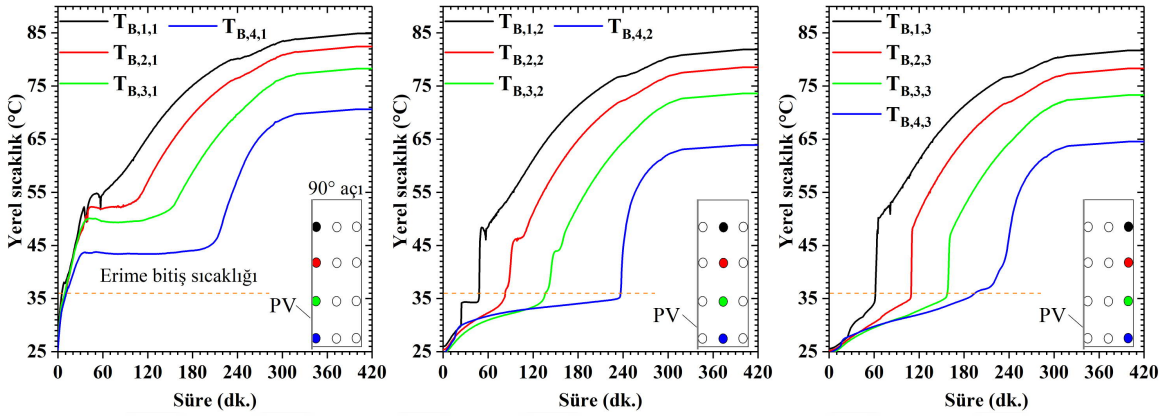


(C Kesiti)

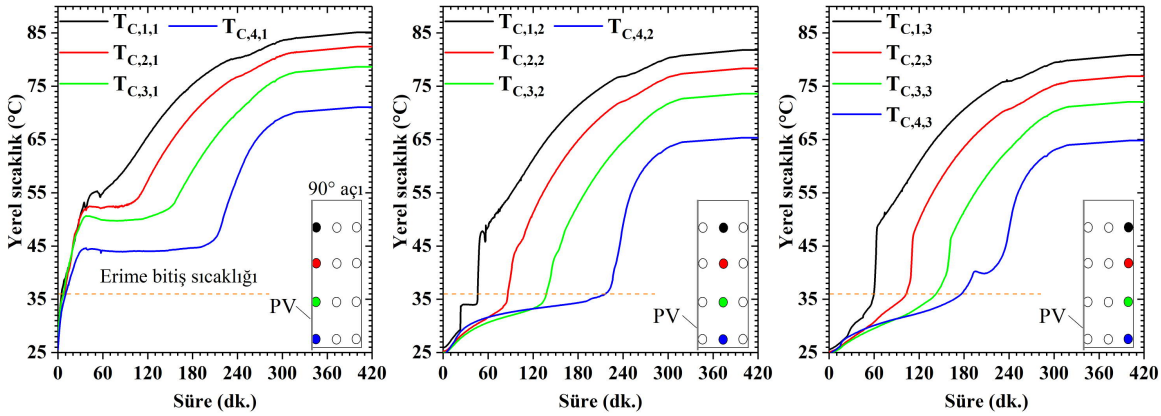
Şekil 44. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 45°)



(A Kesiti)



(B Kesiti)

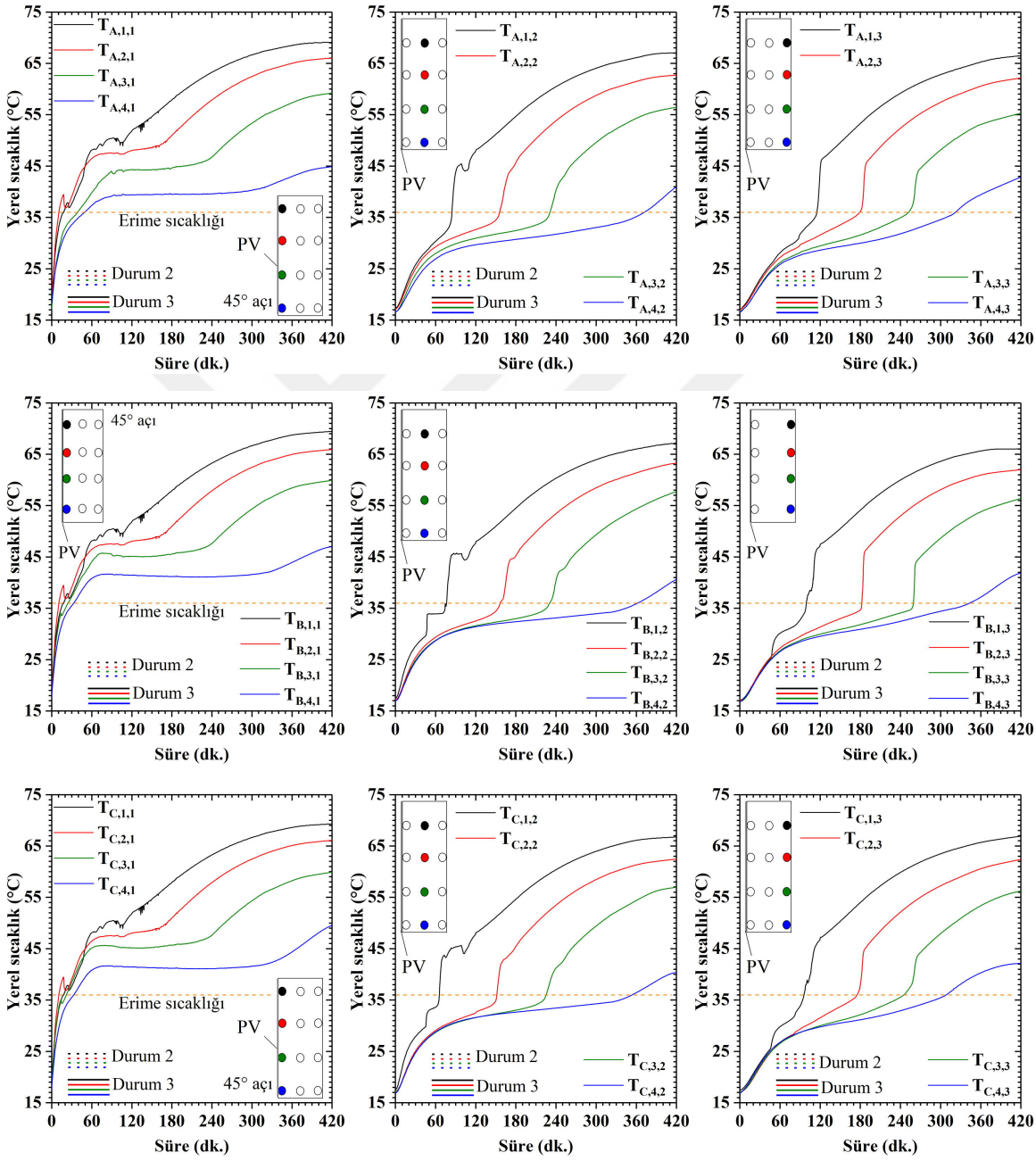


(C Kesiti)

Şekil 45. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C, açı = 90°)

Şekil 46'da 750 W/m^2 ışınım için değerler incelendiğinde ise tüm yerel noktalarda erimenin daha geç tamamlandığı, diğer bir ifadeyle erime hızının yavaşladığı görülmektedir.

Bu durum, ışınım şiddetinin ve ortam sıcaklığının azalmasına bağlı olarak birim zamanda FDM tarafından depolanan enerjinin azalmasıyla açıklanabilir. $T_{A,1,2}$ ve $T_{A,4,2}$ noktaları için değerler, erimenin ilgili noktalarda sırasıyla 25 ve 120 dakika daha geç tamamlandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 46. Durum 2 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımları (Işınım=750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C, açı = 45°)

Yerel sıcaklıkların konum bazlı analizi, faz dönüşümünün panele daha yakın ve üst konumlarda daha hızlı tamamlandığını göstermektedir. Benzer biçimde, üst ve alt kesimler arasındaki maksimum sıcaklık değerleri de önemli farklılıklar sunmaktadır. Bu durum, panelden FDM ortamına transfer olan ısının büyük oranda yukarı doğru taşınmasıyla ilişkilidir ve FDM katmanı içerisindeki doğal taşınım hareketinin erime davranışını belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu etkinin net bir şekilde ortaya konması amacıyla bir sonraki başlık altında eş sıcaklık eğrileri üzerinden bir incelemeye gidilmiştir.

b. Eş sıcaklık eğrileri üzerinden inceleme

Erime davranışının ortaya konması doğrultusunda yalnızca yerel sıcaklık dağılımlarının sunulması, erimenin katman içindeki gerçek ilerleyişinin tam olarak yansıtılması doğrultusunda yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, ilgili noktasal sıcaklık verileri kullanılarak eş sıcaklık eğrileri (kontur) hazırlanmış ve Şekil 47'de sunulmuştur. Bu şekiller, "Origin 2017b" yazılımı kullanılarak farklı zaman adımları ve yerleşim açıları için hazırlanmış olup ilgili şekillerde 36 °C sıcaklık hattı kesikli çizgiyle işaretlenerek faz değişiminin mekânsal ilerleyişi vurgulanmıştır. Erime süreci ve PV sıcaklık değişimi ilişkisinin daha etkili irdelenmesi adına eş sıcaklık eğrileri, PV sıcaklık eğrisi üzerinde tespit edilen önemli zaman aralıkları için ayrı ayrı ele alınmıştır.

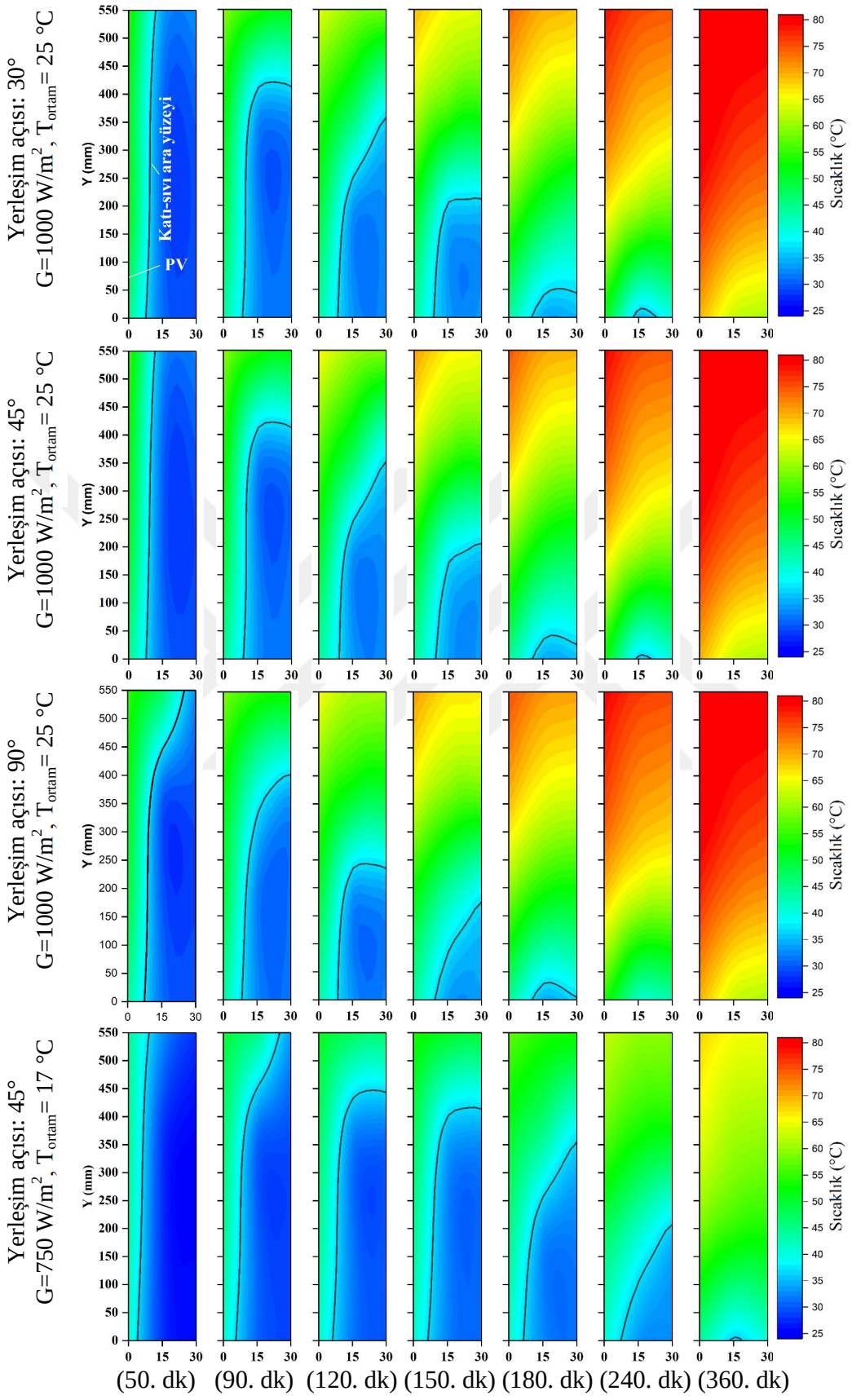
0-50 dakika arası erime davranışı: 50. dakikaya ait sunulan eş sıcaklık eğrileri, sıcaklık dağılımının +y doğrultusu boyunca eş bir dağılım gösterdiğini ve katı-sıvı ara yüzünün panel yüzeyine yaklaşık paralel olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, ilgili zaman adımına kadar baskın ısı transfer mekanizmasının iletim olduğuna işaret etmektedir. Bu süre zarfında, iletim ile panelden FDM'ye transfer olan ısı, FDM katmanı içerisinde eş bir şekilde ilerlemekte ve buna bağlı olarak üniform bir erime davranışı ortaya çıkmaktadır. Erimiş FDM hacminin azlığı ve panel-FDM arası sıcaklık farkının henüz büyük olmadığı bu süreçte, doğal taşınım hareketi yeterince gelişmemiştir. Bu zaman aralığında PV sıcaklığında sağlanan azalma FDM'nin düşük ısıl iletkenliği sonucu sınırlı düzeyde gerçekleşmektedir.

50-120 dakika arası erime davranışı: 1000 W/m^2 ışınım için 50. dakikadan sonraki eş sıcaklık eğrileri, katı-sıvı ara yüzünün özellikle +y yönünde hızla genişlediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, panel ve FDM arasındaki ısı transferinde doğal taşınımın baskın hâle geldiğini göstermektedir. Panelden FDM ortamına taşınan ısı üst kısımlara iletilerek ilgili bölgelerdeki katı FDM hızlıca faz dönüşümüne girmekte ve bu sayede panel sıcaklığı 70 dakika boyunca yalnızca 2 °C artarak 50 °C'den 52 °C'ye yükselmektedir. 750 W/m^2 ışınım altındaysa katı-sıvı ara yüzünün yukarı yönlü gelişmesi t > 90 dk.'dan sonra eş

sıcaklık eğrilerine yansımaktadır. İlgili zaman adımında oluşan bu farklılık, ışınım şiddetinin azalmasına bağlı olarak erime sürecinin daha yavaş ilerlemesiyle ilişkilidir. Buna ek olarak eş sıcaklık eğrilerinden, etkin bir doğal taşınım için bir miktar daha fazla sıvı FDM hacmine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu durum ise PV yüzeyi ve FDM arası sıcaklık farkındaki azalmaya bağlı olarak azalan kaldırma kuvvetiyle açıklanabilir. Bu azalma, sıvı FDM içerisinde viskoz kuvvetlerinin etkisini artırarak benzer bir doğal taşınım hareketi için daha geniş bir sıvı FDM hacmine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

120-240 dakika arası erime davranışı: 1000 W/m^2 ışınım için eş sıcaklık eğrilerinde, erimenin bu zaman adımında yaklaşık %65 oranında tamamlandığı görülmektedir. Erime sürecinin ilerlemesi ve katı FDM hacminin azalmasıyla birlikte sıvı ve katı fazlar arasındaki temas yüzeyi daralmakta, yüksek sıcaklık bölgesi panelin daha büyük bir kısmını etkilemektedir. Ayrıca, sıvı FDM'nin panelden uzaklaşan "ölü bölgelerinde" doğal taşınımın sınırlanması, üst kısımda hızla ısınan FDM hacimlerinin soğumasını engellemektedir. Bu durum, ısı transferini olumsuz etkileyerek PV sıcaklık artışını hızlandırmaktadır. İlgili durum, PV panel sıcaklığında 120. dakikadan sonra ani bir artış olarak eğrilere yansımaktadır. 750 W/m^2 ışınım altında ise erimenin daha yavaş ilerlemesi sonucu ölü bölge oluşumu henüz gerçekleşmemiş ve PV sıcaklığı artış bu zaman aralığında daha yavaş bir artış göstermektedir. Prizmatik hacimler içerisinde doğal taşınım kaynaklı benzer erime davranışları literatürdeki diğer çalışmalarda da raporlanmıştır (Avci & Yazici, 2018; Barthwal & Rakshit, 2022; Yazici vd., 2019) . Katı-sıvı ara yüzünün zaman bağımlı ilerleyişine ait fotoğraflara ilgili çalışmalardan ulaşılabilir.

240 dakika sonrası erime davranışı: 1000 W/m^2 ışınım altında 240. dakikada FDM'nin büyük bölümünün eridiği eş sıcaklık eğrilerinden görülmektedir. Isı alıcı içerisinde gizli ısı depolama kapasitesinin büyük ölçüde tükenmesiyle birlikte yaklaşık 230. dakikada PV sıcaklığı referans değere (ısı alıcısız panel sıcaklığı) ulaşmış ve termal regülasyon sona ermiştir. 750 W/m^2 ışınım altında ise bu süre yaklaşık 30 dakika daha uzun kaydedilmiştir (bkz. Tablo 9). Erime sürecinin ardından panel sıcaklığında gözlenen aşırı sıcaklık artışı ise artık yalnızca duyulur ısı depolama kapasitesi devrede olan FDM'nin düşük ısıl iletkenliğinden kaynaklanan yüksek termal direncin bir sonucu olduğu ifade edilmelidir. Şekillerde görüldüğü üzere toplam erime sonrası sıcaklık artışı devam etmiş ve 1000 W/m^2 ışınım altında sıcaklık FDM genelinde 80 °C'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 47. Durum 2 için eş sıcaklık eğrileri ve katı-sıvı (erime) ara yüzünün ilerleyişi

c. Yerleşim açısının erime davranışına etkisi

Yukarıda açıklanan süreçler, daha önce de ifade edildiği üzere genel olarak 30° yerleşim açısına odaklı olarak yapılmıştır. Diğer yerleşim açıları için sonuçlar karşılaştırıldığında benzer erime davranışlarının gözlendiği, ancak daha dik açılarda ilk 120 dakika içinde erimenin bir miktar daha hızlı ilerlediği görülmektedir. Bunun nedeni, panel dikleştikçe doğal taşınım hareketinin kuvvetlenmesi ve ısıl taşınım katsayısının artmasıdır. Nitekim 90° yerleşim açısında 40. dakikadan itibaren panel sıcaklığı 1,5 °C daha düşük seyretmiştir. Ancak bu hızlanma, kritik erime eşiğine daha erken ulaşılmasına yol açarak 120. dakikada gözlenen ani sıcaklık artışını 100. dakikaya çekmiştir. Farklı açılara yönelik ilk zaman dilimlerinde gözlenen sıcaklık ve erime hızındaki farklılıklar, süreç ilerledikçe kısmen azalmakta ve erimeyi tamamlamak için gereken toplam süreler birbirine yaklaşmaktadır. Bu durumu açıklamak için birkaç etken öne sürülebilir:

- Panelin eğim açısı azaldıkça FDM üzerinden ısı transferi kısmen zayıflasa da, panel ön yüzeyinden dış ortama yayılan ısının devamlılığı bir denge sağlamaktadır.
- FDM'nin katılaşması sırasında oluşabilecek hava boşlukları, malzeme bütünlüğünü bozarak ısıl iletkenliği olumsuz etkileyebilmektedir. Eğim açısına göre bu boşlukların boyut ve konumlarının değişmesi, açıya bağlı beklenen farklılığın tam olarak yansımamasına neden olabilir.
- Deney düzeneğinde, FDM katmanını çevreleyen arka plakanın alüminyum malzeme olması sayesinde ısının tek bir doğrultu yerine birçok yönden transfer edilmesi de açı kaynaklı etkiyi kısmen zayıflatabilmektedir.

3.2.4. Durum 2 İçin FDM'nin Katılaşma (Deşarj) Sürecinin İncelenmesi

Deşarj periyodu, ışınım altında yürütülen 420 dakikalık deney sürecinin tamamlanmasının ardından ışık kaynaklarının kapatılmasıyla başlatılmıştır. FDM sıcaklıklarındaki düşüş, tüm noktalardaki sıcaklık değerleri çevre sıcaklığına (25 °C veya 17°C) ulaşıncaya kadar izlenmiştir.

a. Yerel sıcaklık dağılımı üzerinden değerlendirme

Durum 2'ye ait yerel soğuma eğrileri, Şekil 48 ve 59 arasında farklı düşey eksenler ve yerleşim açıları için verilmiştir. İlgili şekillerde, ölçüm noktalarının indis kodlamaları ve yatay-düşey konumları, inceleme kolaylığı sağlamak adına şekil içerisinde şematik olarak sunulmuştur. Ayrıca katılaşma aralığının alt değeri (33,5 °C) yatay turuncu renk kesikli

çizgiyle, son katılaşan nokta üzerinden toplam katılaşma süresi ise dikey turuncu renk kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

Tüm noktalara ait sıcaklık değişimi incelendiğinde, ısıl yükün ortadan kaldırılmasıyla sıcaklık değerlerinin katılaşmanın başladığı değer olan 35 °C'ye lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu zaman adımına kadar FDM, erime sonrası depoladığı duyulur ısıyı dış ortama atmakta ve katılaşmanın başladığı sıcaklığa ulaşmaktadır. 25 °C ortam sıcaklığı altında bu süre, 30°, 45° ve 90° yerleşim açıları için sırasıyla 220, 180 ve 140 dakika olarak tespit edilmiştir. Yerleşim açısının artmasıyla ilgili süredeki azalma sistemin ön ve arka yüzeylerde ısı taşınım katsayısının artmasıyla ilişkilidir. 17 °C ortam sıcaklığı altında yerel sıcaklık değerleri (Şekil 57-59) incelendiğinde ise depolanan duyulur ısının atıldığı bu ilk soğuma evresinin önemli ölçüde kısaldığı ve yerel noktaların yaklaşık 80 dakika sonra 35 °C'ye ulaştığı görülmektedir. Bu duruma, ortam sıcaklığındaki azalmanın yanı sıra, 750 W/m^2 ve 17 °C ortam sıcaklığı altında yapılan deneyler sonunda erişilen FDM sıcaklığının daha düşük olmasının da etkili olduğu ifade edilmelidir.

Yerel sıcaklıkların 35 °C'ye ulaşmasının ardından sıcaklık düşüşünde belirli bir süre boyunca önemli bir duraksama göze çarpmaktadır. Bu durum, ilgili yerel nokta komşuluğunda FDM'nin katılaşması ve bu katılaşmanın FDM'nin termofiziksel özelliklerine bağlı olarak dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesiyle ilişkilidir. FDM bu süre içerisinde, şarj süreci boyunca depoladığı gizli ısıyı dış ortama artarak katılaşmaktadır. Katılaşmanın tamamlanmasıyla birlikte ise yerel noktalarda tekrar bir sıcaklık düşüşü göze çarpmakta ve ilgili noktaların sıcaklık değerleri ilerleyen süreçle birlikte çevre ortam sıcaklığına ulaşmaktadır.

Tüm noktalardaki sıcaklıklar, katılaşma sıcaklık çizgisi dikkate alınarak incelendiğinde, katılaşma sürelerinin bölgesel olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Eğriler incelendiğinde, genel olarak dış yüzeye yakın noktaların iç noktalara kıyasla daha erken katılaşma sürecini tamamladığı görülebilmektedir. Örneğin 25 °C ortam sıcaklığı ve 30° yerleşim açısı için C ekseni üzerinde yer alan $T_{C,3,2}$ ve $T_{C,3,3}$ noktaları karşılaştırıldığında (Şekil 50), daha iç kesimde yer alan $T_{C,3,2}$ noktasının katılaşma sürecini yaklaşık 210 dakika daha geç tamamladığı görülmektedir. Bu farklılık, özellikle alt ve orta noktalar arasında daha belirgin hale gelmektedir. Bu duruma bir örnek olarak C kesiti üzerinde yer alan $T_{C,4,2}$ ve $T_{C,3,2}$ noktaları karşılaştırıldığında, daha iç kesimde yer alan $T_{C,3,2}$ noktasının diğer noktaya kıyasla yaklaşık 400 dakika daha geç katılaştığı görülmektedir. 17 °C ortam sıcaklığı altında

ise (Şekil 57 - 59), uygulanan ortam sıcaklığındaki azalmayla birlikte katılaşma davranışı değişmemekte, benzer şekilde dış yüzeye yakın noktaların daha erken katılaşmaktadır.

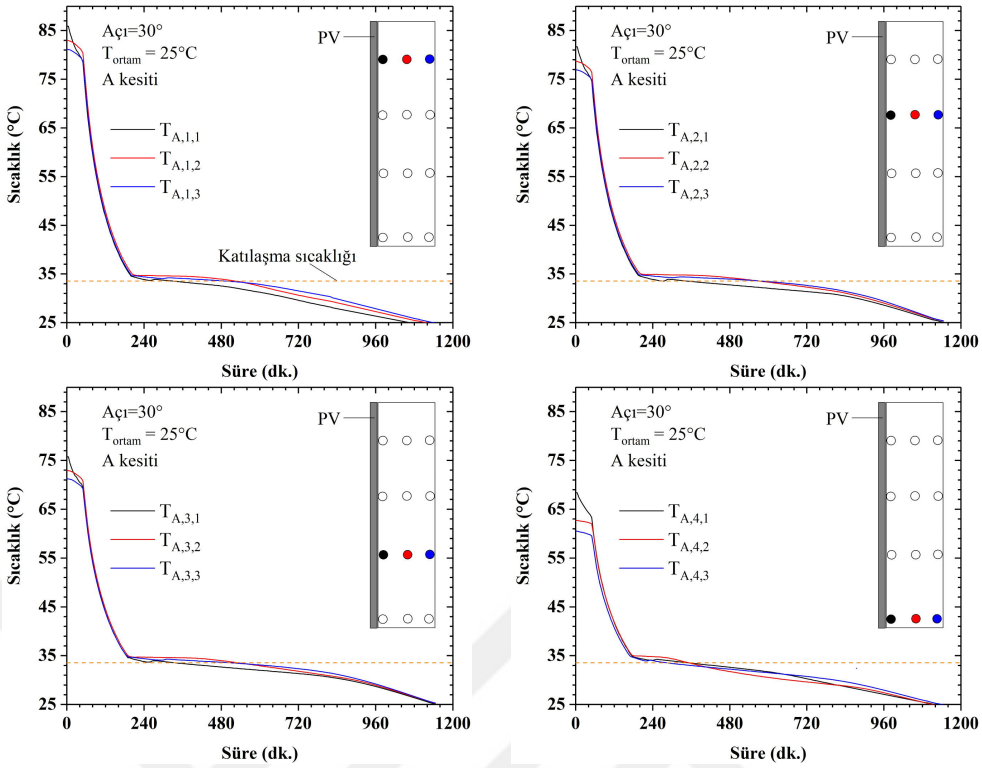
Sıcaklık değerleri, A, B ve C kesitleri arası farklılık yönünden karşılaştırıldığında ise, B ve C kesiti üzerinde sıcaklık dağılımlarının benzerlik gösterdiği, A kesiti üzerinde ise katılaşmanın daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, A kesiti üzerindeki tüm noktaların dış yüzeye yakın olmasıyla ilişkilidir (bkz. Şekil 27).

b. Eş sıcaklık eğrileri üzerinden değerlendirme

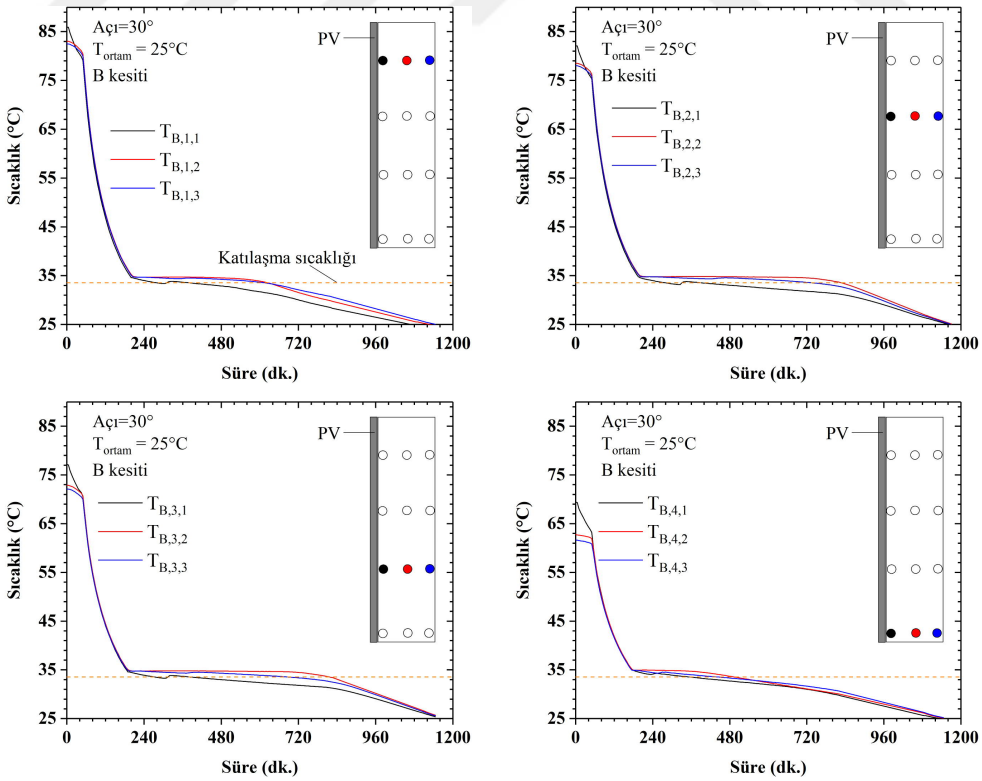
FDM katmanı içerisinde katılaşmanın daha net gözlemlenebilmesi adına, C ekseni üzerindeki yerel sıcaklık dağılımları üzerinden eş sıcaklık eğrileri oluşturulmuş ve Şekil 60'ta sunulmuştur. Farklı zaman adımları ve yerleşim açıları için derlenen eğrilerde yer alan kesikli çizgiler, katı-sıvı ara yüzeyini göstermektedir. 25 °C ortam sıcaklığı için eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, t=0 anında sıvı FDM sıcaklığının, özellikle depo üst bölgelerinde 80 °C dolaylarında olduğu görülmektedir. 220. dakika itibariyle ise bu sıcaklığın depo geneli 35 °C'ye düştüğü fakat FDM katmanı içerisinde herhangi bir bölgede katılaşma göze çarpmamaktadır. Fakat t=420 dk'ya ait eğriler incelendiğinde, katılaşmanın depo alt yüzeyinden ve panele yakın yüzeyden ilerlemiş olduğu görülmektedir. 17 °C ortam sıcaklığı için eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde ise katılaşmanın FDM katmanı içerisinde daha erken zaman adımında başladığı görülmekte ve t = 220 dakika için depo alt yüzeyine ve panele yakın kısımlarda katılaşmış bölgeler göze çarpmaktadır. İlerlemenin alt kesimlerde daha erken başlaması ise, sürecin başında FDM içerisinde etkili olan doğal taşınım hareketinin bir sonucudur. Depo içerisinde, yer çekimi doğrultusunda oluşan bir kaç derecelik sıcaklık gradyanı, katılaşmanın ilgili bölgelerde daha erken başlaması için yeterli olmaktadır. PV tarafında gözlemlenen daha erken katılaşma ise, PV panel ön yüzeyinin emissivite katsayısının (ε_{PV} = 0,9), depo arka yüzeyine ($\varepsilon_{Alüminyum\ plaka}$ = 0,09) kıyasla daha yüksek olmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca PV ön yüzeyinin çevreyle olan radyasyon görüş alanı arka yüzeye göre daha geniştir. Bu durum PV tarafından ışınımla daha fazla ısı atılmasını ve dolayısıyla katılaşmanın PV tarafından daha erken başlamasını sağlamaktadır. Ayrıca FDM katılaşma sıcaklık aralığına erişmesiyle FDM'nin viskozitesinin önemli ölçüde arttığı ve katılaşmayla birlikte ise akışkanlığın ortadan kalktığı bilinmektedir. Bu durum, sıvı FDM içinde meydana gelen doğal taşınım hareketlerini büyük ölçüde sınırlamaktadır. Bu durum katılaşma sürecinde FDM içerisinde ısının iletimle transfer olmasıyla sonuçlanmaktadır. Ayrıca katılaşma süreci içerisinde katı fazın yüzeylerde birikmesi ve genişlemesi, FDM'nin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle ısı transferini olumsuz etkilemektedir. Bu faktörler, katılaşma

sürecinin genel hızını ve şeklini belirlemektedir. Eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, bu faktörlerin etkisi sonucu katılaşmanın dış yüzeylerden orta bölgelere doğru ilerleme gösterdiği ve en son iç bölgelerin katılaştığı görülmektedir. Bu davranışa bağlı olarak 25 °C ortam sıcaklığı için katılaşma süresi 850 dakika, 17 °C ortam sıcaklığı için ise 490 dakika olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, ortam sıcaklığındaki azalmayla birlikte katılaşmanın önemli ölçüde hızlandığını göstermektedir. Bu hızlanmadaki ana etkenin FDM'nin katılaşma sıcaklığı ve çevre ortam arası sıcaklık farkı olduğu ifade edilmelidir. Yukarıda belirtildiği edildiği üzere, katılaşma süreci boyunca FDM sıcaklığı 33-35°C arasında kalma eğilimi göstermektedir. Ortam sıcaklığının 25 °C'den 17 °C'ye düşmesi durumunda ise, katılaşan bölge ve çevre ortam arası sıcaklık farkının artması ısı transferini olumlu etkilemekte ve katılaşma sürecini hızlandırmaktadır. Bu duruma ek olarak, katılaşma sürecinde ısının temel olarak iletimle transfer olması, Şekil 60'ta görüldüğü üzere farklı yerleşim açıları için benzer katılaşma profillerinin oluşmasını sağlamış ve aynı ortam sıcaklığı altında toplam katılaşma sürelerinin benzerlik göstermesine neden olmuştur.

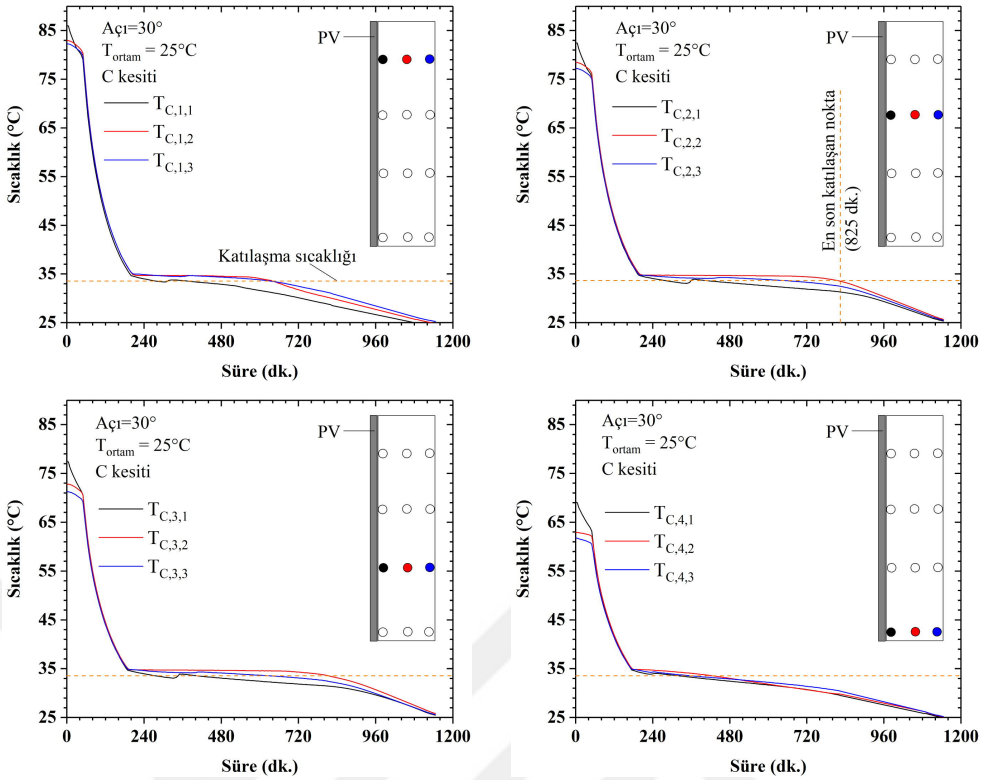
Durum 2'ye ait deşarj süreci için elde edilen sonuçlar içerisinden, 25 °C ortam sıcaklığı için dikkat edilmesi gereken önemli husus, FDM katmanının yalnızca 30 mm kalınlıkta olmasına ve ortam sıcaklığının faz dönüşüm sıcaklığının 10 °C altında olmasına karşın katılaşma süresinin yaklaşık 13,5 saat sürmüş olmasıdır. Tipik bir 12-12 saatlik bir gece-gündüz döngüsü göz önüne alındığında tespit edilen katılaşma sürenin tamamen katılaşma için yetersiz gelebileceği ifade edilmelidir. Böyle bir durum oluşması dahilinde, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin bir sonraki gün daha düşük olacağı ve FDM destekli ısı alıcının sunduğu termal regülasyon süresinin kısalacağı açıktır. Bu duruma ek olarak, konuyla ilgili çalışmalarda, termal regülasyon sürelerinin uzatılması ve PV-FDM performansının artırılması amacıyla araştırmacıların kullanılan FDM miktarının artırılması yönünde tercih yaptıkları ve 30 mm FDM kalınlığının üzerine çıktıkları görülmektedir. Bu durumun deşarj süresini olumsuz etkileyeceği ve gece periyodunda tüm FDM'nin katılaşamayacağı açıktır. Ayrıca ilgili çalışmalarda katılaşma sürecinin çalışma kapsamına alınmayarak ilgili sürecin sıklıkla ihmal edildiği de ifade edilmelidir. Bu sebeple ısı alıcı tasarımlarında deşarj süresini kısaltıcı önlemler alınması ve katılaşmanın temin edilmesi en az termal regülasyon süresinin uzatılması kadar önemli olduğu ifade edilmelidir.



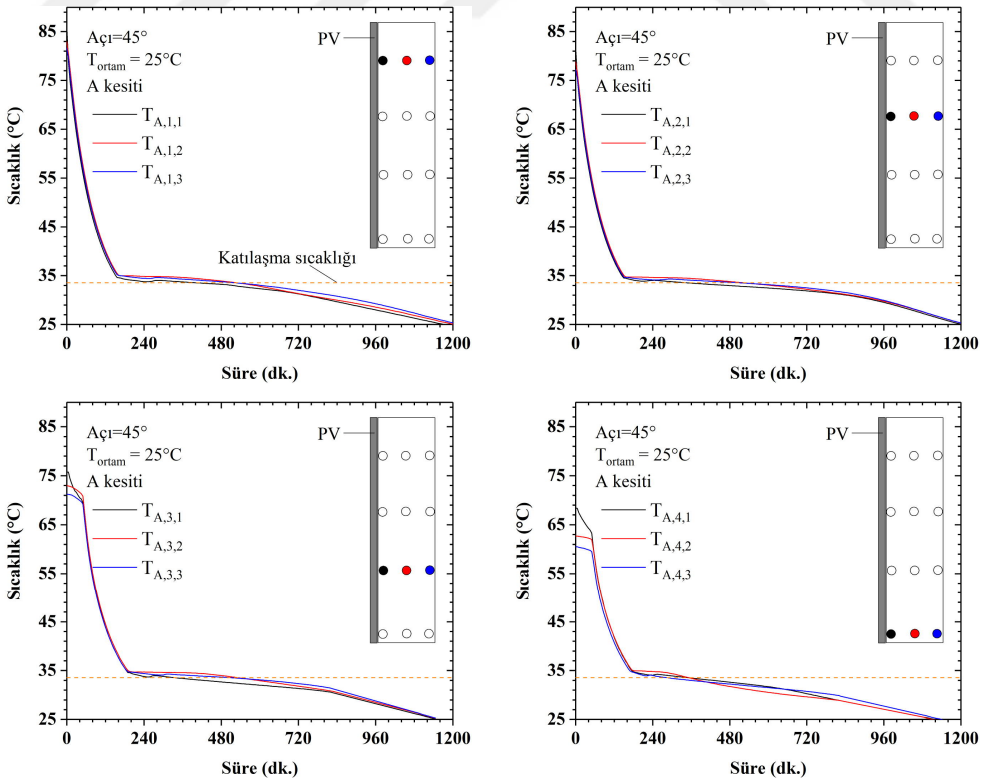
Şekil 48. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



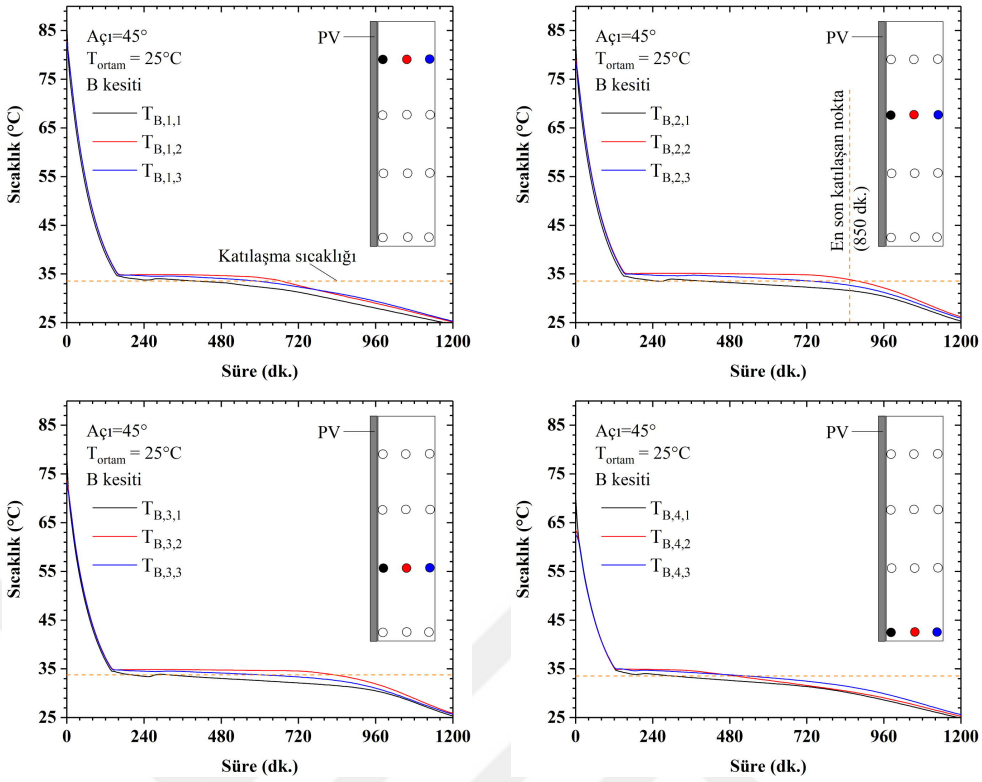
Şekil 49. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



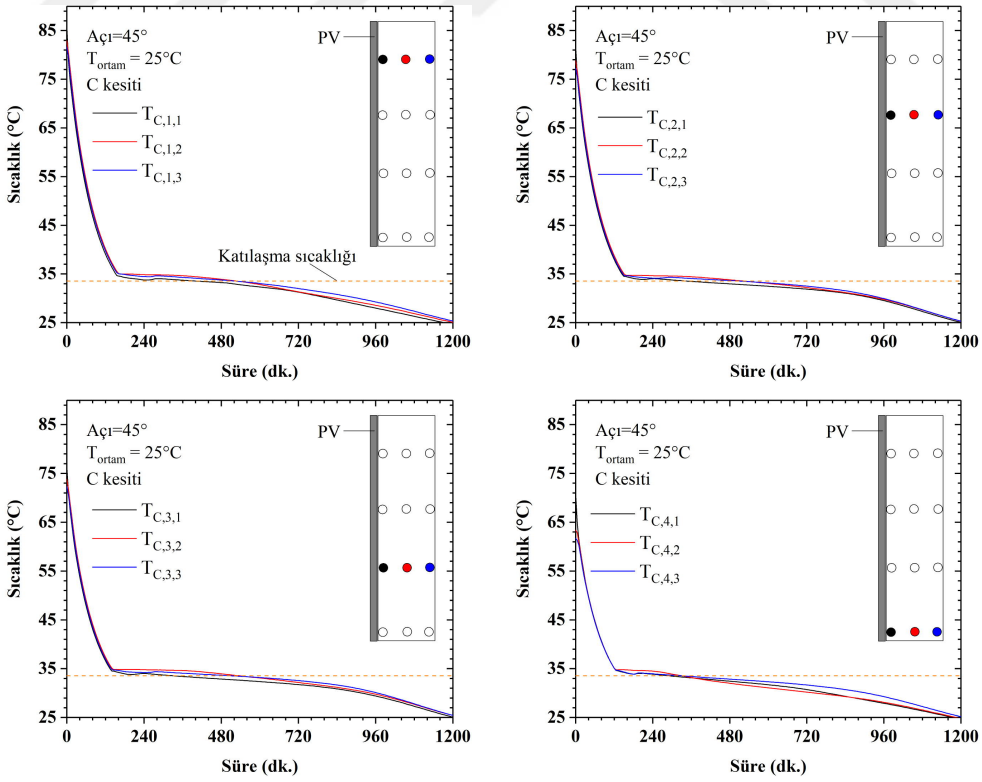
Şekil 50. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 30° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



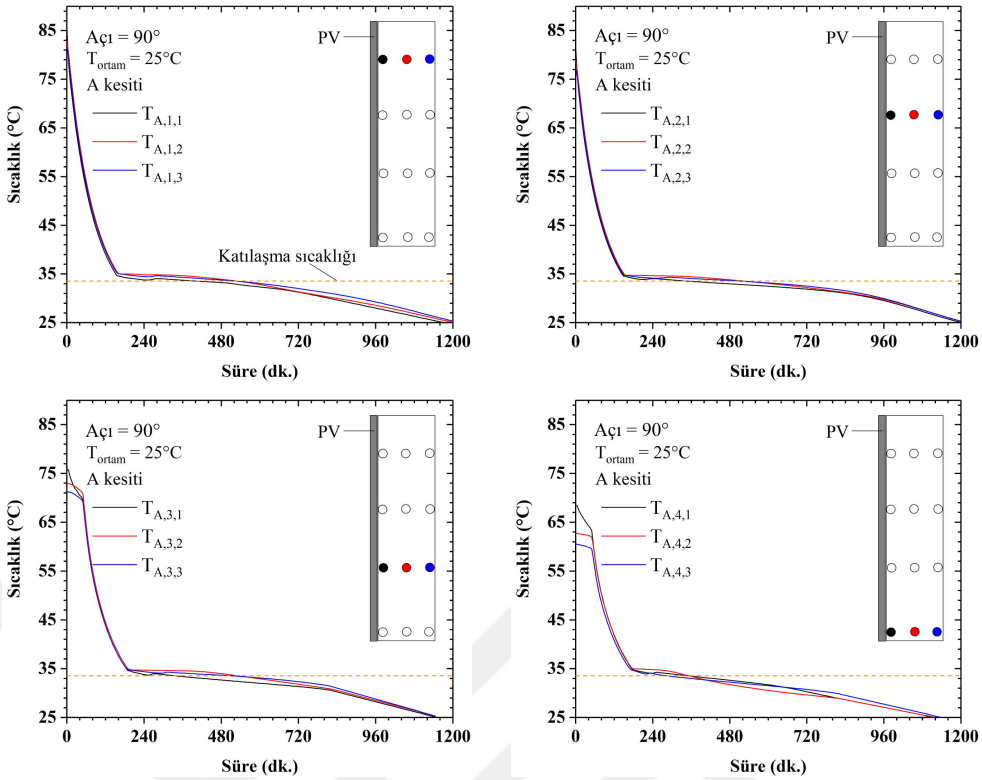
Şekil 51. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



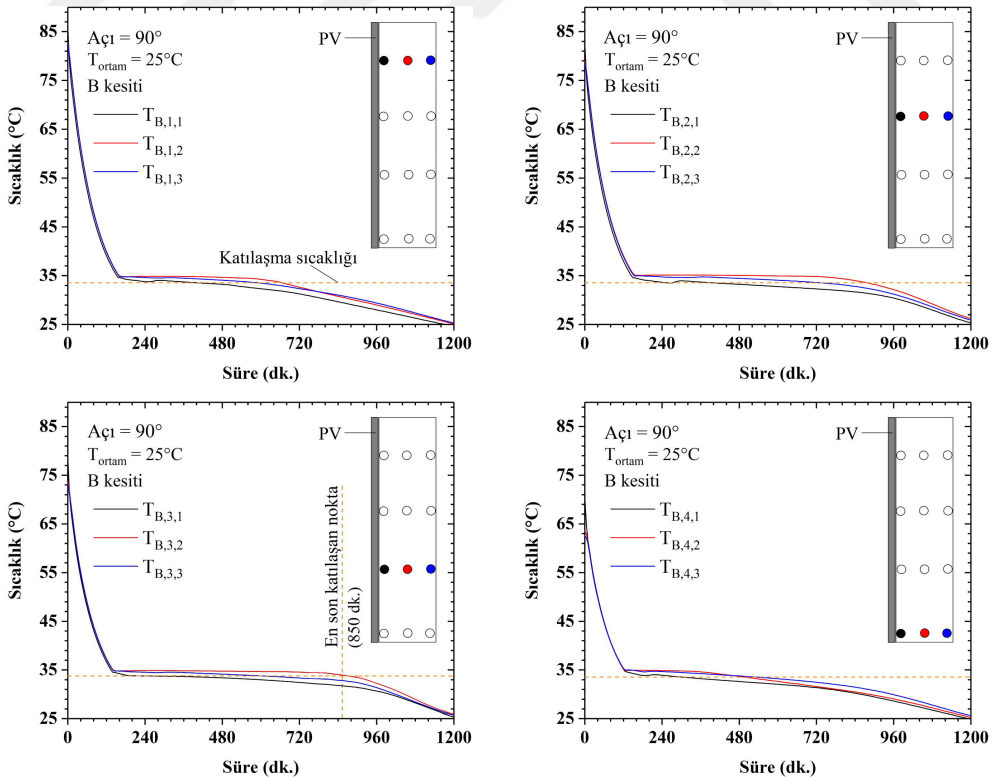
Şekil 52. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



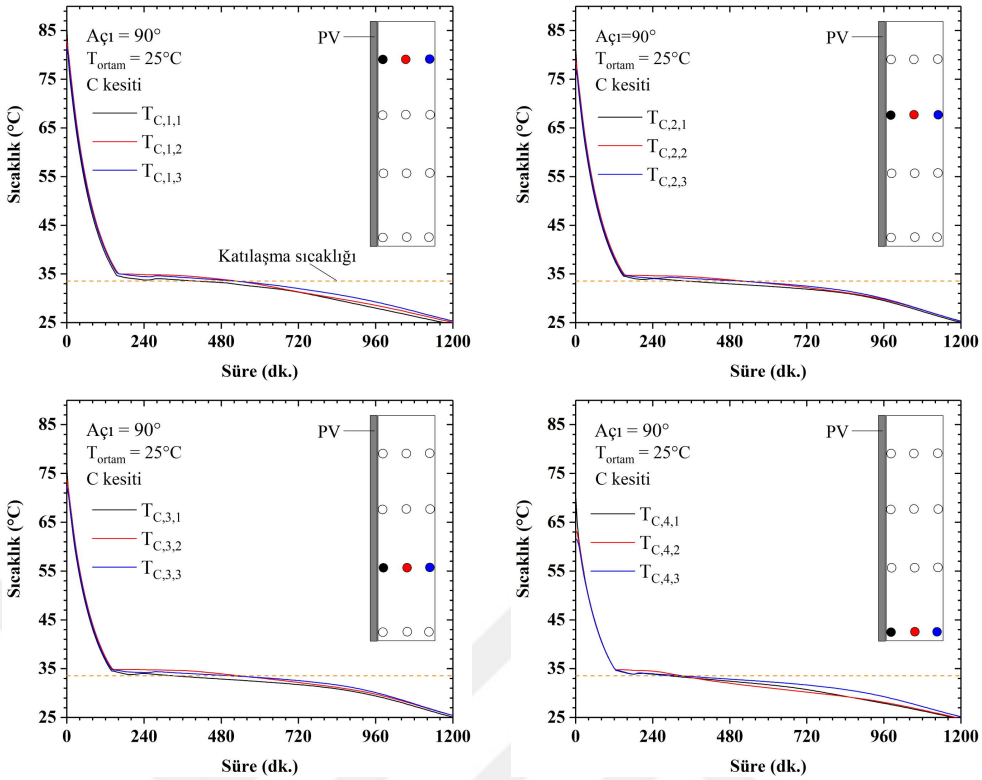
Şekil 53. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



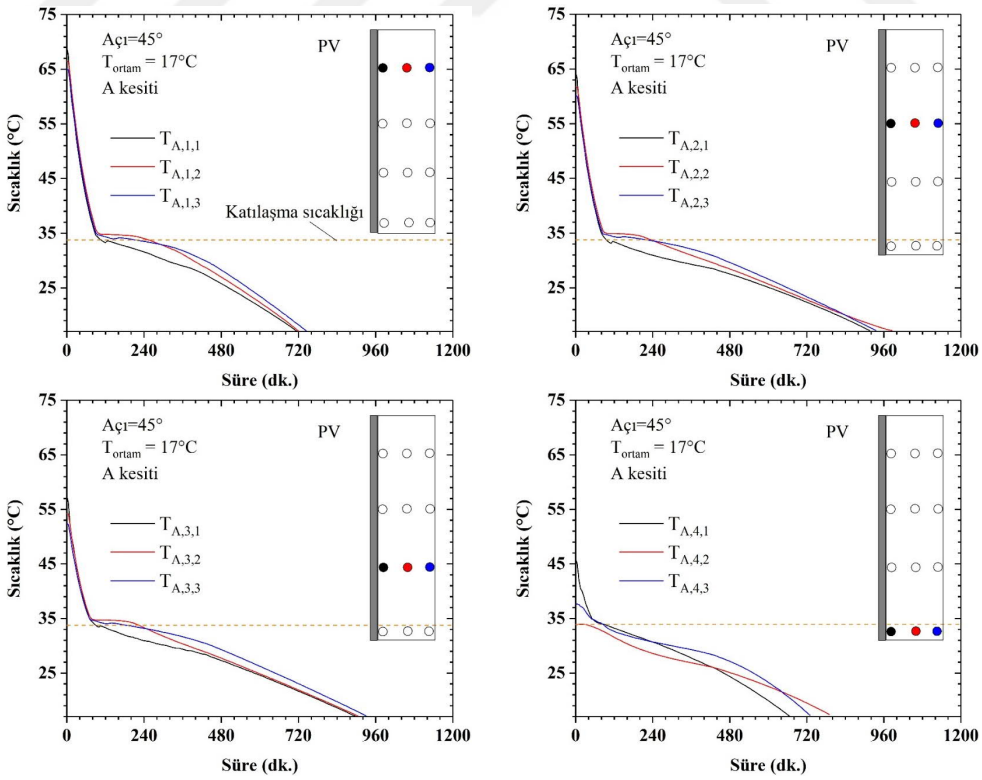
Şekil 54. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



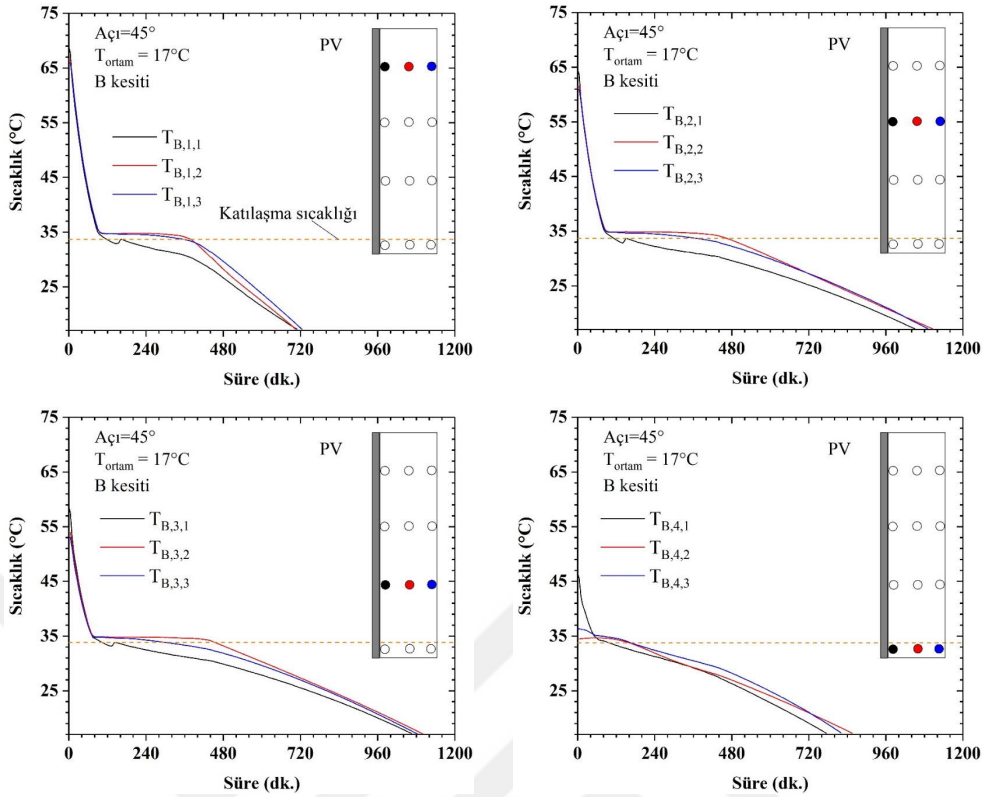
Şekil 55. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



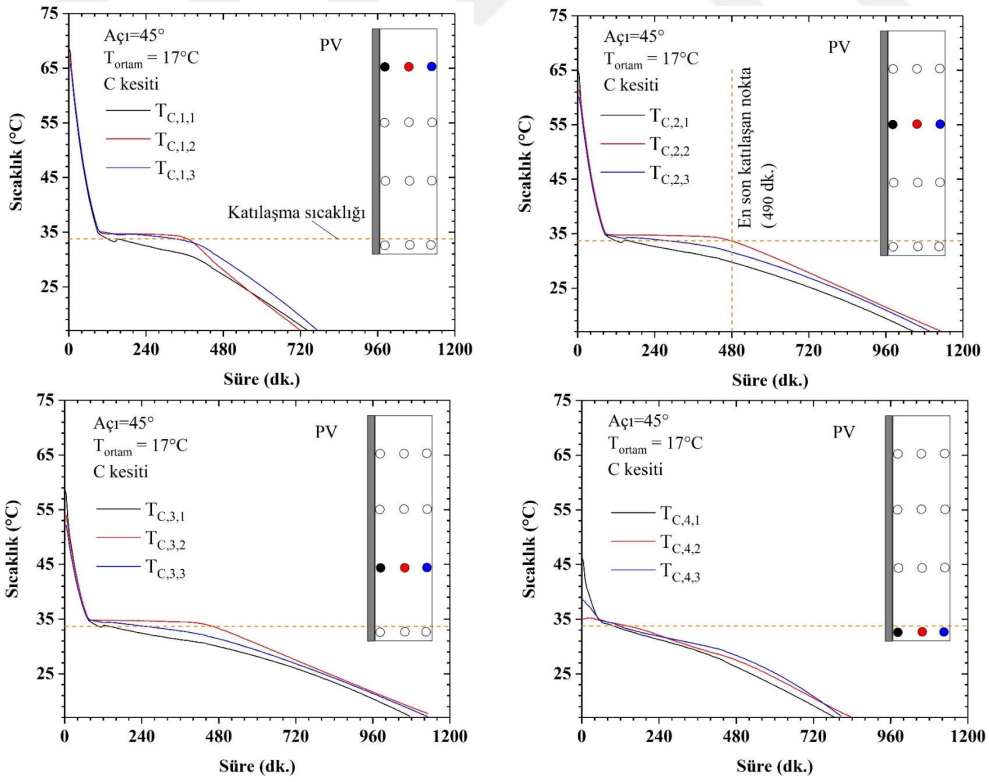
Şekil 56. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 90° yerleşim açısı, T_{ortam}= 25 °C)



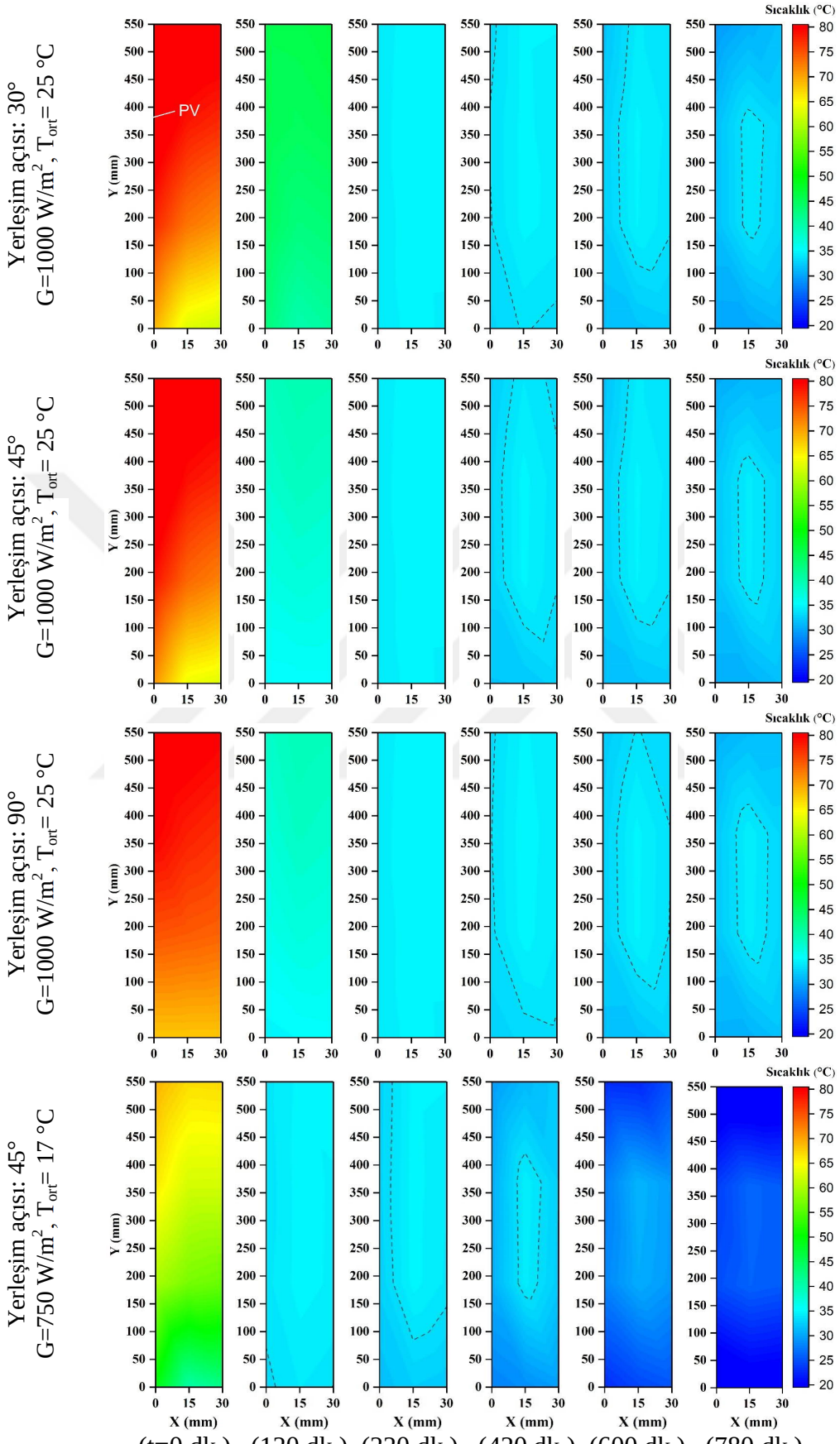
Şekil 57. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, A kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C)



Şekil 58. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, B kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C)



Şekil 59. Deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (Durum 2, C kesiti üzeri, 45° yerleşim açısı, T_{ortam}= 17 °C)



Şekil 60. Durum 2'ye ait deşarj boyunca farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri

3.3. FDM ve Hava Destekli Isı Alıcılarıyla Entegre edilmiş PV-FDM Sistemlerinin Isıl ve Elektriksel Davranışı

Bu kısımda, tez çalışması kapsamında önerilen FDM ve hava destekli ısı alıcılı sistemlerin (Durum 3, 4 ve 5) ısıl ve elektriksel davranışına ilişkin elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bir önceki başlık altında, konvansiyonel PV-FDM sistemine ait erime davranışı, PV sıcaklığı ve elektriksel güç ilişkilerinin detaylı irdelenmesi nedeniyle, bu kısımda konvansiyonel yapıya (yalnızca FDM ile soğutulan, Durum 2) kıyasla oluşan farklılıklar ve sebepleri üzerine odaklanılmıştır.

3.3.1. Isıl yük altında, FDM ve Hava Destekli Sistemlerin PV Sıcaklık Analizi

FDM ve hava destekli ısı alıcılı (özgün) PV-FDM sistemlerinden (Durum 3, 4, 5) elde edilen ortalama PV sıcaklık değerleri, konvansiyonel FDM destekli sisteme ait (Durum 2) verilerle birlikte Şekil 61 ve 62'de farklı yerleşim açıları ve ortam koşulları için sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, Durum 3, 4 ve 5 için elde edilen PV sıcaklık artış karakteristiğinin Durum 2 ile benzerlik gösterdiği göze çarpmaktadır. Bu benzerlik, hem özgün hem de konvansiyonel ısı alıcılı sistemlerde FDM kullanılmasının ve özgün sistemlerdeki hava destekli ilave doğal taşınımın mekanizmasının bir sonucudur. Bu nedenle, PV sıcaklık artışında Durum 2 için yaklaşık 35 °C - 55 °C arası gözlemlenen ve FDM'nin faz değişim süreciyle ilişkilendirilen karakteristik değişimler, Durum 3-5 için de benzer şekilde ortaya çıkmıştır.

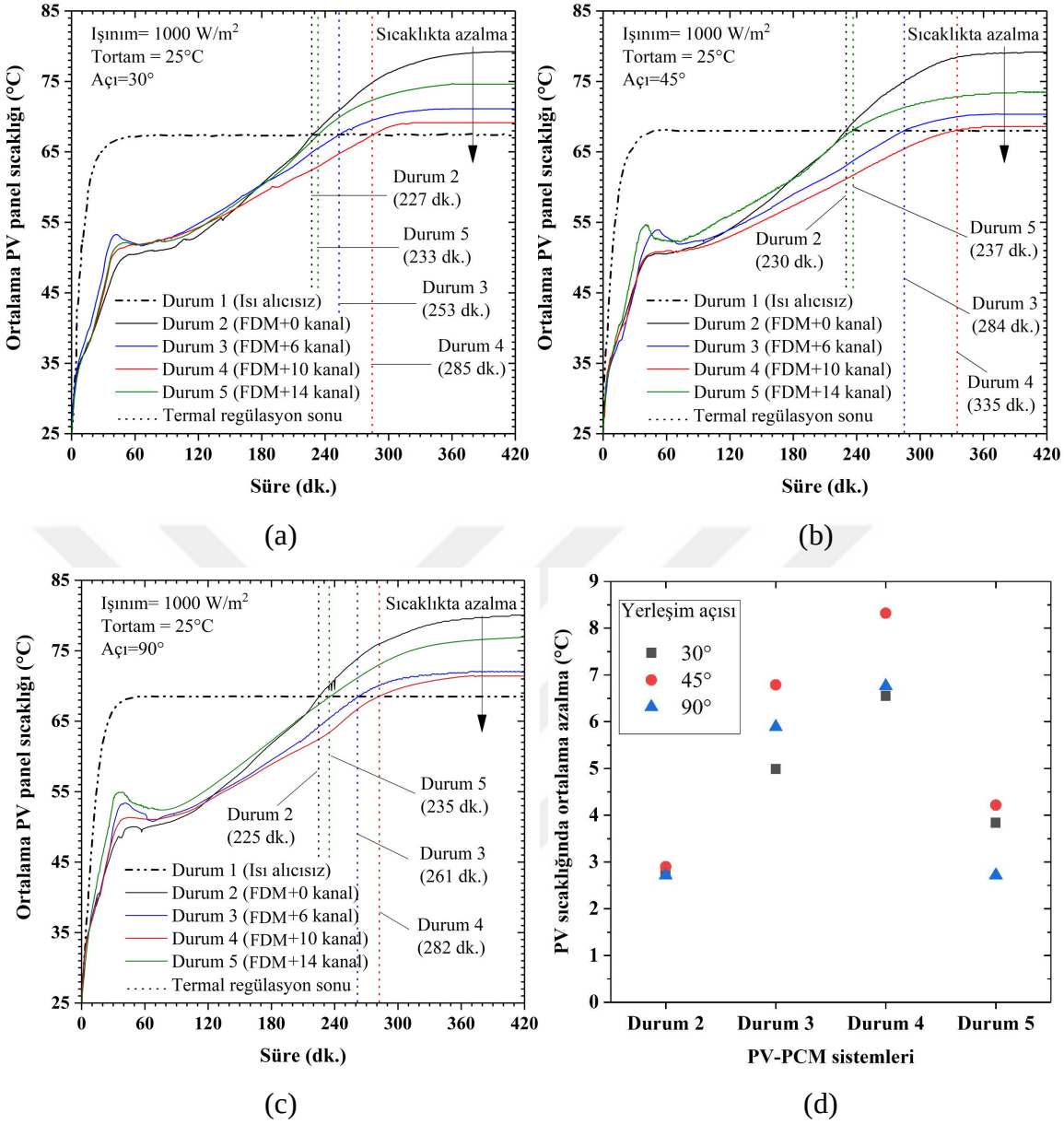
Benzer karakteristiğe karşın PV sıcaklık eğrileri zaman bağımlı karşılaştırıldığında, Durum 2'ye kıyasla dikkatle üzerinde durulması gereken önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Sıcaklık değerleri incelendiğinde, Durum 3-5'e ait PV sıcaklıklarının öncelikle belirli bir zaman aralığı boyunca Durum 2'ye kıyasla bir miktar yüksek seyrettiği, ancak ilerleyen süreçte bu durumun ortadan kalkarak hedeflenen şekilde çok daha düşük PV sıcaklıklarının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında sağlanan azalmaya bağlı olarak termal regülasyon süresinin uzadığı ve özellikle regülasyon sonrasında gözlemlenen aşırı sıcaklık artışının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin, 1000 W/m^2 ışınım şiddeti ve 30^o yerleşim açısı altında Durum 4 (FDM + 10 kanallı ısı alıcı) için veriler incelendiğinde (Şekil 61a), PV sıcaklık değerlerinin Durum 2'ye kıyasla 60 - 180 dakikalar arası yaklaşık 1 °C daha yüksek olduğu görülmektedir. İlgili sürenin ardından ise PV sıcaklıklarının daha düşük değerlere gerileyerek maksimum PV sıcaklığının

80 °C'den 69 °C'ye düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, Durum 2 için 227 dakika olarak tespit edilen termal regülasyon süresinin bu ısı alıcı ile %23,4 uzayarak 285 dakikaya ulaştığı eğrilere yansımaktadır. Ayrıca yerleşim açısının 45^o ve 90^o yükselmesiyle birlikte PV sıcaklığında sağlanan azalmanın daha erken meydana gelerek yaklaşık 110-120 dakikalar ardından daha düşük PV sıcaklıklarının elde edildiği görülmektedir.

FDM ve hava destekli ısı alıcılarının, ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığının azalması durumunda da PV sıcaklığı üzerinde olumlu sonuçlar verdiği ifade edilmelidir. Şekil 62 incelendiğinde 750 W/m^2 ışınım ve 17 ^{o} C ortam sıcaklığı altında Durum 3 ve 4 ile 170 dakikanın ardından 7 ^{o} C'ye kadar daha düşük PV sıcaklıklarının elde edildiği ve termal regülasyon süresinin 178 dakikaya kadar uzadığı tespit edilmiştir. Diğer özgün ısı alıcıları ile de PV sıcaklıklarında ve termal regülasyon sürelerinde olumlu sonuçlar elde edilmiş olup ilgili değerler Tablo 10 ve 11'de derlenmiştir.

Hem tabloların hem de PV sıcaklık eğrilerinin ortaya koyduğu üzere özgün ısı alıcılarla PV sıcaklığında sağlanan azalma ve termal regülasyon süresinde sağlanan uzama, sistemin yerleşim açısına, ısı alıcı geometrisine (Durum 3, 4, 5) ve ortam koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Sonuçlar bu açıdan incelendiğinde, PV-FDM sistemler içerisinden tüm yerleşim açıları altında en düşük ortalama PV sıcaklığı ve en uzun termal regülasyon süresinin, daha genel bir ifadeyle en iyi soğutma performansının Durum 4 (FDM + 10 kanallı ısı alıcı) ile elde edildiği görülmektedir. Durum 4, özellikle 1000 W/m^2 ışınım ve 45° yerleşim açısı altında üstün bir performans ortaya koymuş, Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında deney süresi boyunca ortalama 8,5 °C ve regülasyon sonrası maksimum sıcaklıkta ise 11 °C azalma elde edilmiştir. Bu değerler 750 W/m^2 ışınım değeri için sırasıyla 4,6 °C ve 7,2 °C olarak kaydedilmiştir. Regülasyon süresinde ise iki ortam koşulu altında da yaklaşık %46'lık bir uzama sağlanmıştır. Performans çıktılarında en düşük iyileşme oranları ise Durum 5 ile (FDM + 14 kanallı) ile kaydedilmiştir. Farklı yerleşim açılarının soğutma performansına etkisi incelendiğinde ise, Durum 3 ve 4 için en iyi soğutma performansının 45°, en düşük performansının ise 30° yerleşim açısı altında elde edildiği sonuçlardan görülmektedir (bkz. Şekil 61d).

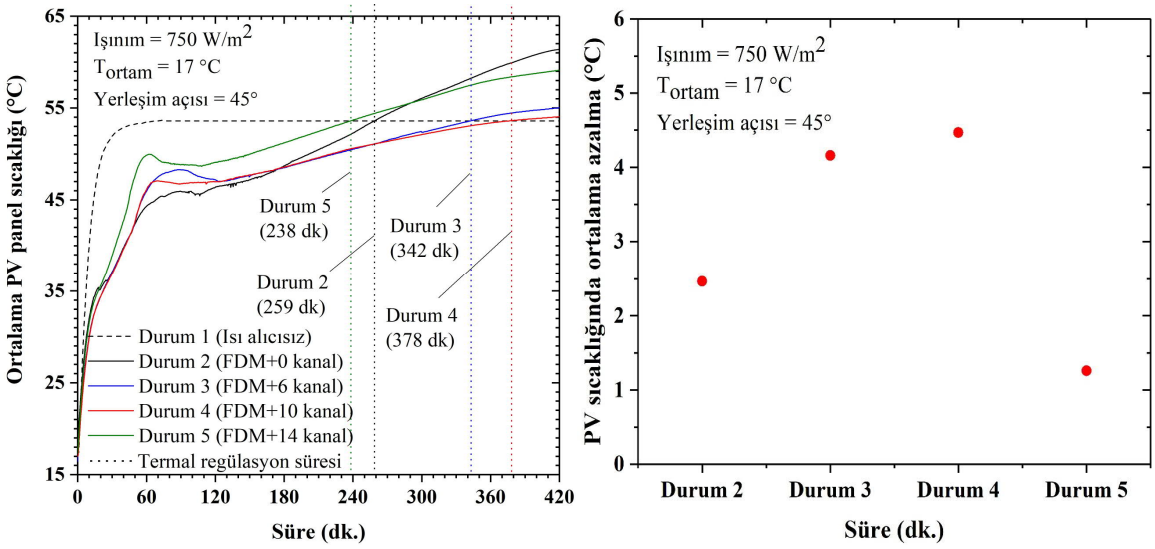
Durum 3-5 ait PV sıcaklığında raporlanan iyileşmeler, FDM içerisine eklenen hava kanallarının ısı depolama ve erime davranışı üzerindeki değiştirici etkisinden kaynaklanmaktadır. İlgili değişimler ve değişimlerin arkasındaki fiziki mekanizmalar, tüm araştırma parametreleri için yerel PCM sıcaklıkları üzerinden bir sonraki başlık altında kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 61. Konvansiyonel ve özgün ısı alıcılı PV-FDM sistemlerine ait zaman bağımlı ortalama PV sıcaklıkları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)

Tablo 10. Farklı ısı alıcılarıyla, Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında sağlanan maksimum azalma ve termal regülasyon süreleri (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam}= 25 °C)

	Durum 2			**Durum 3**			**Durum 4**			**Durum 5**		
Yerleşim Açısı	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**
PV sıcaklığında maksimum azalma (°C)	--	--	--	8	9	8	9,3	11	10	4,5	5,6	5
Termal regülasyon (dk.)	227	230	225	253	284	261	285	335	282	233	237	235
Regülasyonda uzama (%)	--	--	--	11,4	23,4	16	25,5	45,6	25,3	2,6	3	4,4



(a) (b)

Şekil 62. Konvansiyonel ve özgün ısı alıcılı PV-FDM sistemlerine ait zaman bağımlı ortalama PV sıcaklıkları (Işınım = 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)

Tablo 11. Farklı ısı alıcılarıyla, Durum 2'ye kıyasla PV sıcaklığında sağlanan maksimum azalma ve termal regülasyon süreleri (Işınım = 750 W/m^2, T_{ortam}= 17 °C)

	Durum 2			Durum 3	Durum 4	Durum 5
Yerleşim açısı	**30°**	**45°**	**90°**	**45°**	**45°**	**45°**
PV sıcaklığı maksimum azalma (°C)	--	--	--	6,1	7,2	2,2
Termal regülasyon (dk.)	255	259	262	342	378	238
Regülasyonda uzama (%)	--	--	--	32	45,9	-8

3.3.2. FDM ve Hava Destekli Sistemlere Ait Yerel Sıcaklıkların ve Erime Davranışının İncelenmesi

Durum 3, 4 ve 5'e ait yerel PCM sıcaklıkları 1000 W/m^2 ve 750 W/m^2 ışınım için sırasıyla Şekil 63-71 ve Şekil 72-74 arasında sunulmuştur. Şekiller, farklı yerleşim açıları ve PCM katmanı içerisindeki farklı düzlemsel kesitler için veriler içermektedir. Ayrıca ilgili şekillerde, karşılaştırma amacıyla konvansiyonel FDM destekli ısı alıcılı sisteme ilişkin verilere de yer verilmiştir.

Durum 3-5'e ait yerel sıcaklık artışları incelendiğinde, öncelikle tüm ölçüm noktalarında sıcaklık değerlerinin erime noktasına kadar düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Ardından ilgili noktalarda faz dönüşümünün başlamasıyla sıcaklık artış hızının erime süreci tamamlana kadar minimum seviyeye gerilediği, erime tamamlandıktan sonra ise sıcaklığın tekrar artmaya başladığı eğrilere yansımaktadır. Sıcaklıktaki bu

karakteristik değişim, daha önce Durum 2 için de ifade edildiği üzere, erime öncesinde, erime esnasında ve sonrasında FDM'nin sırasıyla duyulur, gizli ve duyulur formda ısı depolamasıyla ilişkilidir. Özgün ısı alıcılarında, konvansiyonel yapıdaki gibi FDM'nin ısı depolayıcı olarak görev yapması ve sıcaklık ölçüm noktalarının FDM ile doğrudan temas etmesi nedeniyle bu karakteristik değişim tüm noktalarda gözlemlenmiştir. Erime sonrası sıcaklık artışlarına odaklanıldığında ise, zamanla Durum 2'ye kıyasla bir yavaşlama olduğu ve buna bağlı olarak zamanla sıcaklık değerlerinin Durum 2'nin altında kaldığı görülmektedir. Bu olumlu gelişme, temel olarak özgün ısı alıcılarına entegre edilen bakır hava kanallarından dış ortama atılan ısıyla açıklanabilir. Özgün ısı alıcılı sistemlerde, konvansiyonel yapıdan farklı olarak FDM içerisinde hava kanallarının bulunması, FDM ile çevre ortam arasındaki sıcaklık farkı yeterli seviyeye ulaşması durumunda doğal taşınım yoluyla FDM içerisinden bir miktar ısının dış ortama atılmasını sağlamaktadır. Atılan ısı sayesinde tüm yerel noktalarda giderek daha düşük FDM sıcaklıkları elde edilmekte ve bu durum Şekil 61 ve 62'de görüldüğü üzere PV sıcaklığı üzerinde zamanla olumlu etki yaratmaktadır. Bununla birlikte, FDM ve buna bağlı PV sıcaklığında meydana gelen söz konusu azalma, araştırma parametrelerine bağlı olarak önemli değişiklikler göstermiş olup bu değişimler ve nedenleri aşağıda sırayla açıklanmıştır:

a. Yerel sıcaklık artışındaki zamansal ve konumsal değişimlerin incelenmesi

Daha önce belirtildiği üzere, FDM içerisine özgün kapsamda entegre edilen hava kanalları, doğal taşınım ile dış ortama ısı atabilmesi için FDM içerisine iki ucu açık şekilde entegre edilmiştir. Kanallar üzerinden doğal taşınım ile soğumayı hedef alan bu tasarım, etkin bir doğal taşınım için kanal yüzeyi-ortam sıcaklığı farkını ve bu farkı belirleyen FDM'nin erime davranışını ısı transfer sürecinde önemli faktörler haline getirmektedir. Yerel sıcaklık eğrileri bu kapsamda incelendiğinde, tüm sistem durumları ve yerleşim açıları için sıcaklık artışında sağlanan azalmanın öncelikle FDM'nin üst, daha sonra ise alt kısımlarında yer alan noktalarda gözlemlendiği görülmektedir. Buna ek olarak, söz konusu sıcaklık farkının oluşabilmesi için üst kısımlarda daha yüksek sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyulurken, alt kısımlarda bu durum daha düşük sıcaklık seviyelerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Örneğin, Şekil 63g'de Durum 3 (30°) için orta düşey eksendeki sıcaklık değerleri ($T_{C,1\text{-}4,2}$), sıcaklık artışındaki yavaşlamanın en üst noktada 55 °C ve t > 90 dk.'dan itibaren meydana geldiğini, en alt noktada ise bu durumun 45 °C ve t > 240'dan dakikadan sonra gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer durumun FDM katmanının PV panele yakın ve uzak kısımları için de geçerli olduğu ifade edilmelidir. Örneğin Şekil 63g'de $T_{C,2,1}$ ve $T_{C,2,2}$

noktaları karşılaştırıldığında, PV panel arkasında bulunan $T_{C,2,1}$ noktasında sıcaklık farkının 67 °C itibariyle oluşmaya başladığı, daha iç kısımda bulunan $T_{C,2,2}$ noktasında ise bu durumun 55 °C seviyesinde meydana geldiği görülmektedir.

Sıcaklık değişiminde bölgesel olarak oluşan bu farklılıklar, FDM'nin erime davranışının hava kanallarından dış ortama ısı atma süreci üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda, FDM ve hava destekli ısı alıcılar içerisindeki erime davranışının daha etkili bir şekilde incelenebilmesi amacıyla tekrar eş sıcaklık eğrilerine başvurulmuştur. Bu eğriler, FDM katmanında simetri ekseni üzerinde (C ekseni) oluşturulmuş ve tüm yerleşim açıları ve sistem durumları (Durum 2-5) için Şekil 75 ve Şekil 78 arasında sunulmuştur. Ayrıca, eş sıcaklık eğrilerinde hava kanallarının konumları kesikli çizgilerle, katı-sıvı ara yüzeyi ise düz çizgilerle gösterilmiştir. Eş sıcaklık eğrileri, öncelikle katı-sıvı ara yüzünün ilerleyişi yönünden incelendiğinde, özgün ısı alıcılar içerisindeki erime davranışının Durum 2 ile benzediği ve FDM içerisine dâhil edilen hava desteğinin erime davranışını önemli ölçüde değiştirmediği göze çarpmaktadır. Şekillerde görüldüğü üzere Durum 3, 4 ve 5 için katı-sıvı faz çizgisi, Durum 2'ye benzer şekilde PV panelin arka yüzeyinden yukarı yönde genişleyerek ilerlemektedir. Bu erime davranışı, daha önce Durum 2 için detaylıca açıklandığı üzere şarj sürecinin genelinde FDM içerisindeki baskın ısı transfer mekanizmasının doğal taşınım olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak, FDM katmanı içerisinde erimenin ilerleme şekli (erime davranışı), FDM içerisindeki bölgesel sıcaklık dağılımını etkilemesinden dolayı dış ortama ısı atma sürecinde erime davranışını etken kuvvet haline gelmektedir. İlgili sürecin daha detaylı açıklanması adına, erime davranışı ve dış ortama ısı atma mekanizması arasındaki ilişki, eş sıcaklık eğrileri ve yerel sıcaklıklar üzerinden farklı zaman adımları için aşağıda açıklanmıştır.

0-60 dakika: t=60 dakika için eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, erimenin FDM katmanı içerisinde henüz sınırlı bir ilerleme gösterdiği görülmektedir. Hava kanallarının konumu dikkate alındığında (düşey kesikli çizgiler) bu zaman adımında, erime sonrası sıcaklığı yükselmiş bölge (yeşil renkli bölge) ile kanal temas yüzeyinin boru yüzey alanına kıyasla oldukça az olduğu görülmektedir. Yerel sıcaklıklar incelendiğinde, bu zaman adımına kadar en üstte yer alan $T_{A\text{-}C,1,1}$ ve $T_{A\text{-}C,1,2}$ noktaları hariç FDM içerisinde Durum 2'ye kıyasla belirgin bir farklılık oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuç, ilgili zaman adımına kadar hava kanalları üzerinden dış ortama ısı atılımı için gerekli şartların henüz oluşmadığını ortaya koymaktadır. $T_{A\text{-}C,1,1}$, $T_{A\text{-}C,1,2}$ noktaları için kaydedilen ani sıcaklık dalgalanması ise, ilgili noktaların katılaşma esnasında hacimsel daralmaya bağlı oluşan boşluklarda yer

almasından kaynaklanmaktadır. Erimenin başlamasıyla birlikte hacimsel olarak genleşen FDM, öncelikle bu noktaların bulunduğu boşluklara akmakta ve ilgili noktalarda geçici bir sıcaklık artışına yol açmaktadır.

90-240 dakika: t=90 dakika için eş sıcaklık eğrileri 1000 W/m^2 ışınım için incelendiğinde, geçen zaman zarfında erimenin üst tarafa doğru genişlediği ve buna bağlı olarak FDM'nin üst kısmında sıcaklığı yükselmiş bir sıvı bölgesi oluştuğunu göstermektedir. Bu durum neticesinde, bir önceki zaman adımına kıyasla sıcak bölge ve kanal yüzey teması artmıştır. Yerel sıcaklıklar t > 90 dakika için incelendiğinde, üst bölgelerde Durum 2'ye kıyasla söz konusu sıcaklık farkının oluşmaya başladığı görülebilmektedir. Bu durum, kanal yüzeyi ve sıcak bölge temasının artmasına bağlı olarak hava kanalları içerisinde doğal taşınım hareketinin başlamış olduğunu göstermektedir. 750 W/m^2 ışınım altında ise bu dakika itibariyle ilgili yüksek sıcaklık bölgesi, erime sürecinin daha yavaş ilerlemesine bağlı olarak oluşma aşamasındadır. Bu nedenle yerel sıcaklık eğrilerinde sıcaklıkta belirgin bir azalma bu zaman adımında gözlemlenmemektedir. Sürecin ilerlemesiyle (90 < t < 240) erimenin giderek alt bölgelere ilerlediği ve sıcak bölge-hava kanalı temasının arttığı görülmektedir. Bu nedenle, dış ortama ısı atılımına bağlı yerel sıcaklık artışındaki yavaşlamalar, erime davranışına uygun olarak önce üst, daha sonra ise alt kısımlarda gözlemlenmektedir. Ayrıca, bu zaman aralığında erime hızlarında da kayda değer farklılıklar görülmektedir. 1000 W/m^2 ışınım altında yapılan deneylerde 30° yerleşim açısı için eş sıcaklık eğrileri, ilgili yerleşim açısında tüm ısı alıcıları içerisindeki erime hızının Durum 2'ye yakın olduğunu göstermektedir. Bu durum, düşük yerleşim açısına bağlı olarak hava kanallarından ısı atılımının daha zayıf gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Fakat 45° ve 90° yerleşim açıları altında Durum 3 ve 4 için verilen eş sıcaklık eğrileri, ısı atılımına bağlı erime hızında meydana gelen yavaşlamayı ortaya koymaktadır. Şekiller incelendiğinde, özellikle 120. dakikadan sonra katı FDM hacminin Durum 2'ye kıyasla daha büyük olduğu ve toplam erimenin gerçekleştiği zaman adımının bu Durumlar için daha uzun elde edildiği görülmektedir. Bu durum özellikle Durum 4'te daha belirgin gözlemlenmiştir. Özgün ısı alıcılarla PV panel üzerinde sağlanan termal regülasyon süresinin daha uzun olmasının temel nedeni, FDM'den dış ortama atılan ısıya bağlı erime süresinin uzaması olduğu ifade edilmelidir. Atılan ısı sayesinde erime kritik noktaya daha geç ulaşmakta ve bu sayede PV sıcaklıkları daha uzun süre regüle edilebilmektedir.

240-360 dakika: t=240 dakika eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde, 1000 W/m^2 ışınım için FDM'nin neredeyse faz dönüşümünü tamamladığı, 750 W/m^2 ışınım altında ise bu

oranın %90'a yaklaştığı görülmektedir. Buna bağlı olarak sıcak bölge ve kanal yüzey teması ilgili dakika itibariyle maksimuma yaklaşmıştır. Hava kanallarıyla uzaklaştırılan ısı, bu dakikadan sonra, hem FDM içerisinde hem de PV panel yüzeyinde aşırı sıcaklık artışını efektif bir şekilde azaltmakta ve yerel sıcaklık eğrilerinden görüldüğü üzere tüm yerel noktalarda sıcaklıklar Durum 2'ye kıyasla giderek daha düşük seyretmektedir. Bu sıcaklık farkı t=360 dakika için eş sıcaklık eğrilerine açıkça yansımaktadır.

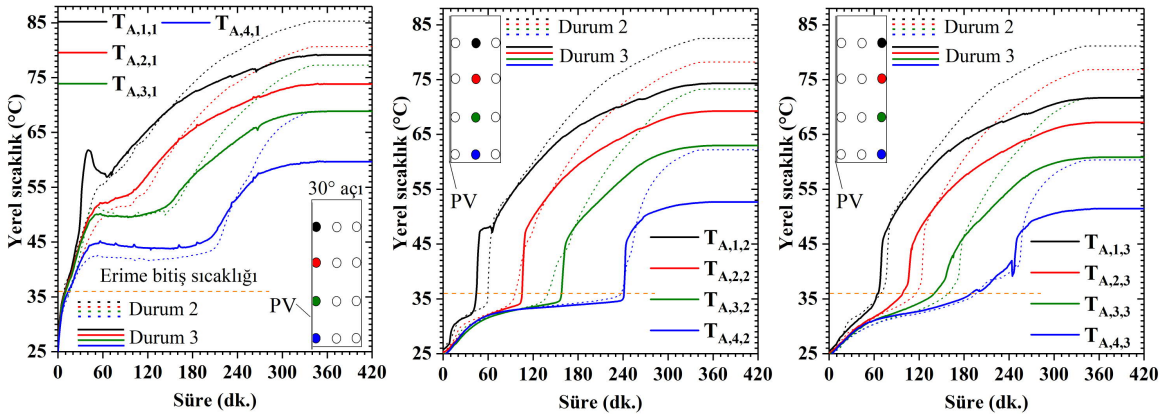
b. Yerel sıcaklıklarda ısı alıcılı geometrisine bağlı değişimlerin açıklanması

Farklı ısı alıcı düzenlemeleri için yerel sıcaklıkta oluşan azalmalar incelendiğinde, Durum 2'ye kıyasla en fazla sıcaklık düşüşünün Durum 4, en az ise Durum 5 ile elde edildiği görülmektedir. Örneğin Durum 4 için yerel sıcaklıklar incelendiğinde, sıcaklık farkının deney süresinin sonunda 1000 W/m^2 ve 750 W/m^2 ışınım şiddetleri için sırasıyla yaklaşık 14 °C ve 9 °C ulaştığı, Durum 5 için ise bu değerlerin sırasıyla 8 °C ve 6 °C seviyesinde kaldığı tespit edilmiştir. Isı alıcılar arası bu sıcaklık farklılıkları, temel olarak hava kanallarının geometrik özelliklerindeki (çap ve adet) değişimlerin FDM içerisindeki doğal taşınım hareketi ve dış ortama ısı atılım performansı üzerindeki etkilerinden kaynaklanmaktadır. Önerilen ısı alıcıların geometrik özellikleri değerlendirildiğinde, Durum 5'in en fazla boru sayısına (14) ve en küçük boru çapına (22 mm) sahip olduğu görülmektedir. Bu konfigürasyon, borular arası mesafenin en dar olduğu düzenlemeyi sunmaktadır. Öte yandan, Durum 3 en az boru sayısına (6) ve en büyük boru çapına (33,6 mm) sahip olup, borular arası mesafenin en geniş olduğu sistemdir. Diğer bir sistem olan Durum 4 ise 26 mm çapında 10 borudan oluşmakta olup, kanal çapı ve sayısı bakımından Durum 3 ile Durum 5 arasında konumlanmaktadır. Isı alıcılar arasındaki bu geometrik farklılıkların ısı transfer süreci üzerinde etkileri aşağıda açıklanmıştır:

FDM ve hava destekli ısı alıcılara entegre edilen dikey hava kanalları (borular), PCM katmanı içerisinde katı engeller gibi davranarak doğal taşınım hareketini belirli bir ölçüde kısıtlamaktadır. Bu durum Şekil 61 ve 62'de yer alan PV sıcaklık eğrilerinden görüldüğü üzere 60-150 dakikalar arası PV sıcaklığında meydana gelen yaklaşık 1,5 °C'lik ek bir sıcaklık artışı ile kendini göstermektedir. Isı alıcılar bu açıdan değerlendirildiğinde, Durum 5'in hava kanalları arası en düşük mesafeye sahip olması nedeniyle FDM içerisindeki taşınım hareketi Durum 3 ve 4'e kıyasla daha zayıf hale gelmekte ve sürecin başında PV sıcaklığında meydana gelen ek sıcaklık artışı bu ısı alıcı için daha belirgin olmaktadır.

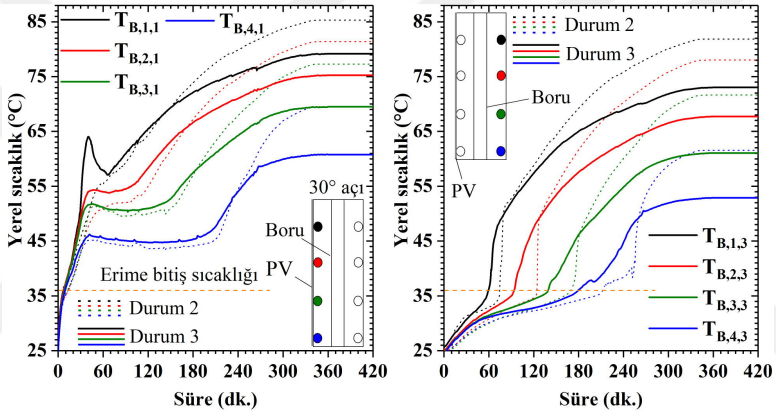
FDM ve hava destekli ısı alıcılar, hava kanallarından atılan ısı miktarı açısından değerlendirildiğinde, Durum 5'in 14 hava kanalına sahip olmasına rağmen boru çaplarının

diğer sistemlere kıyasla daha küçük olması kanal içerisindeki doğal taşınım mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Bu durum, hava kanalları içerisindeki sınır tabaka gelişimi ve sürtünme mekanizmasıyla açıklanabilir. Kanal çapının küçülmesi durumunda sınır tabakalar daha hızlı bir şekilde gelişmekte ve boru kesitinin daha büyük bir kısmını kaplamaktadır. Bu durum, serbest akış bölgesinin daraltarak viskoz kuvvetlerin (sürtünme kuvvetlerinin) etkisini daha belirgin hale getirmektedir. Akış direncindeki bu artış ise, doğal taşınım için daha yüksek sıcaklık farkının oluşmasına neden olmaktadır. İlgili durum, 90° yerleşim açısı için yerel sıcaklıkların verildiği Şekil 65f, Şekil 68f ve Şekil 71f'den takip edilebilir. İlgili şekiller incelendiğinde, FDM üst katmanında atılan ısı kaynaklı sıcaklık farkının Durum 3 için 58 °C'de başladığı ve bu değerin sırasıyla daha küçük kanal çaplarına sahip Durum 4 ve Durum 5 için 63 °C ve 70 °C'ye yükseldiği görülmektedir. Bu mekanizmaların bir sonucu olarak FDM içerisinden en az ısı Durum 5 ile atılmış ve PV panel sıcaklıkları açısından Durum 3 ve 4'e kıyasla daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. Durum 3 için ilgili mekanizmalar değerlendirildiğinde ise, Durum 5 için tanımlanan koşulların tersinin geçerli olduğu ifade edilebilir. Bu sistemde 6 adet hava kanalı bulunması ve kanallar arasındaki mesafenin daha geniş olması nedeniyle, FDM içerisindeki doğal taşınım mekanizması hava kanallarından daha az etkilenmektedir. Ayrıca, boru çaplarının daha büyük olması sayesinde, hava kanallarıyla atılan ısı miktarı için gerekli yüzey ve ortam sıcaklık farkı daha düşük seviyelerde oluşmaktadır. Ancak, kanal sayısının az olması, FDM katmanı içerisinden dış ortama ısının daha sınırlı sayıda bölgeden atılmasına yol açmaktadır. Durum 4 ise, 10 adet kanal içermesi ve 26 mm çapında borulara sahip olması sebebiyle, yukarıda açıklanan dezavantajları dengeleyici bir yapıya sahiptir. Bu sistem, Durum 5'e kıyasla borular arasında daha geniş boşluklara sahip olduğu için FDM katmanındaki doğal konvektif akımları daha az kısıtlamaktadır. Aynı zamanda, Durum 3'e kıyasla daha fazla ısı atma bölgesiyle (10 hava kanalı), dış ortama daha etkili bir ısı atılımı sağlamaktadır. Bu iki avantajın birleşimi sonucunda Durum 4 ile, Tablo 10'da özetlendiği üzere daha uzun termal regülasyon süresi ve daha düşük PV sıcaklıkları sağlanarak diğer tüm ısı alıcılarından daha iyi bir soğutma performansı elde edilmiştir.



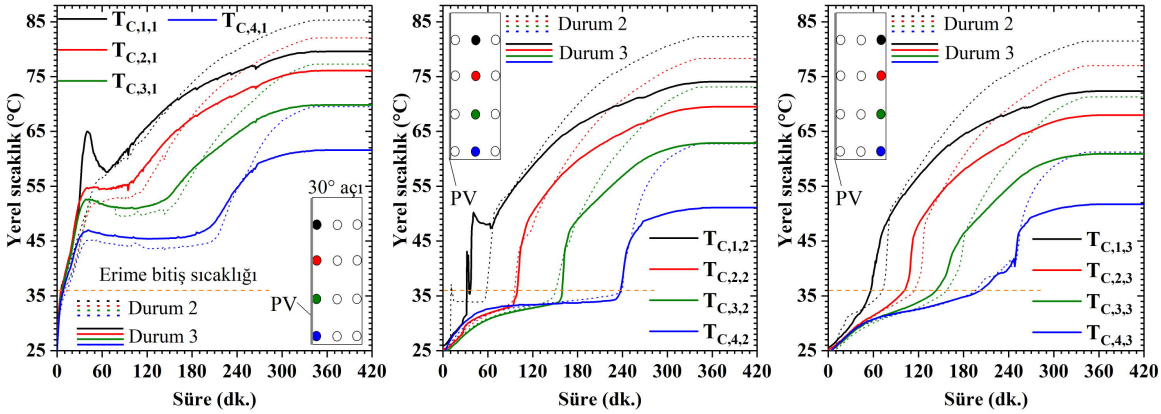
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

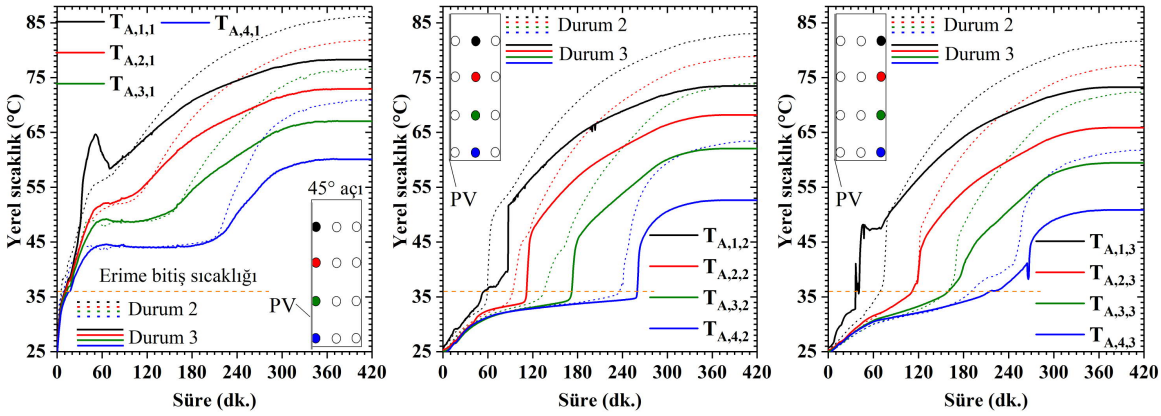
(B kesiti)



(f) (g) (h)

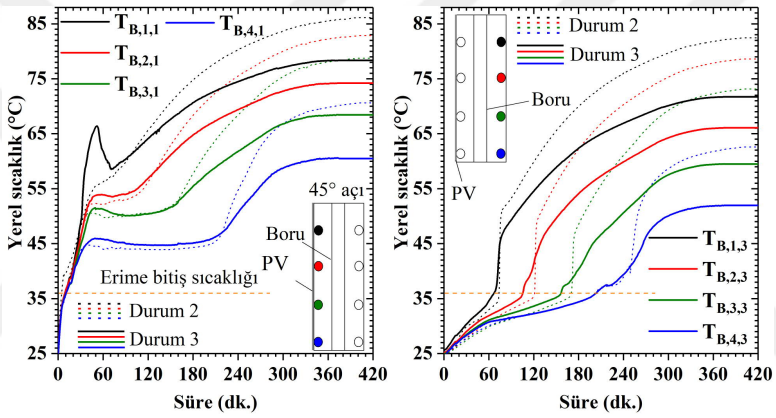
(C kesiti)

Şekil 63. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°)



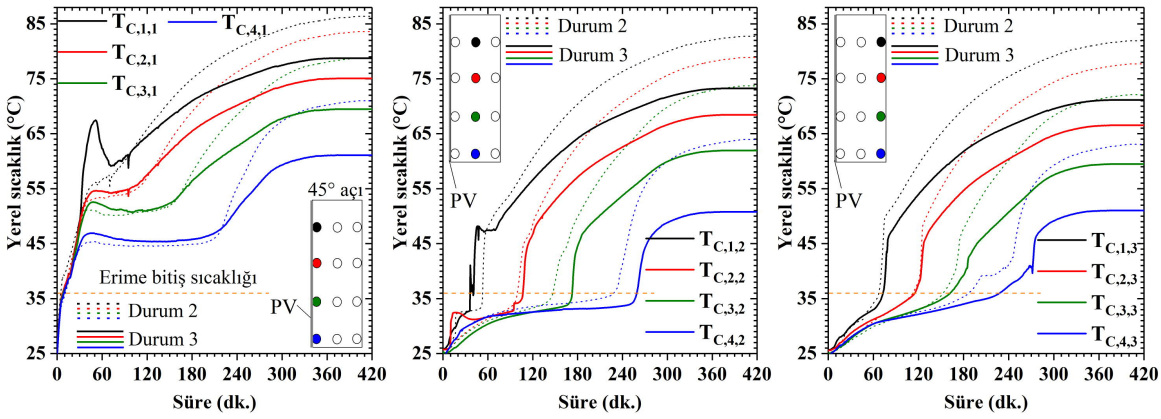
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

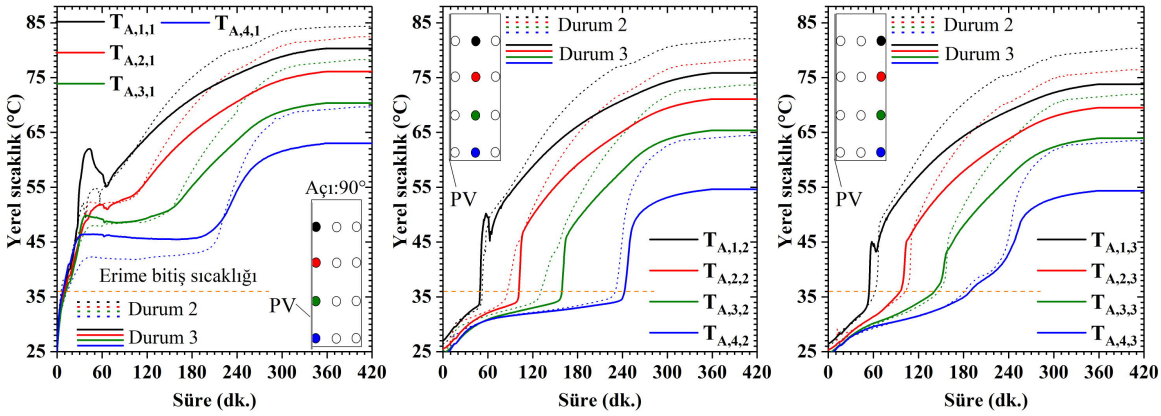
(B kesiti)



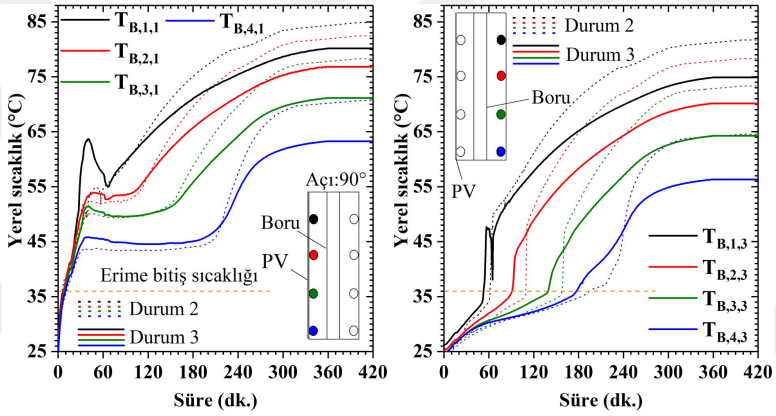
(f) (g) (h)

(C kesiti)

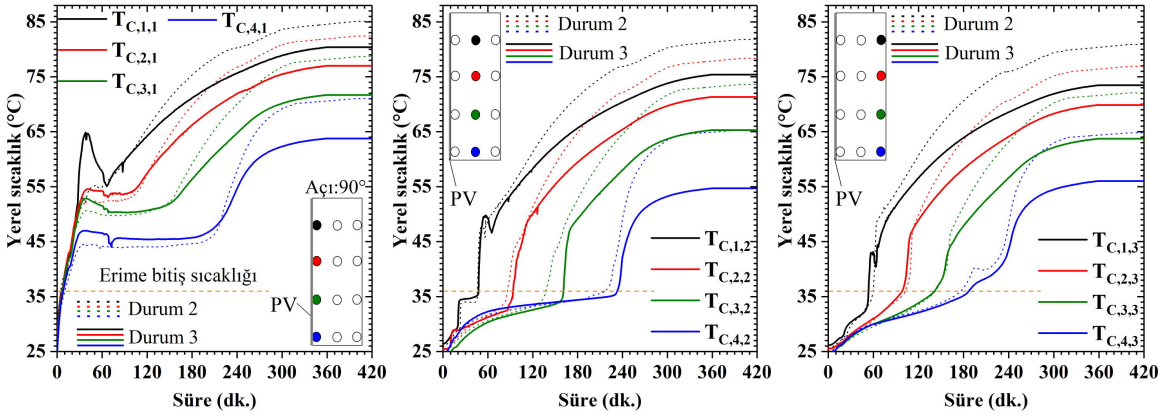
Şekil 64. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°)



(A kesiti)

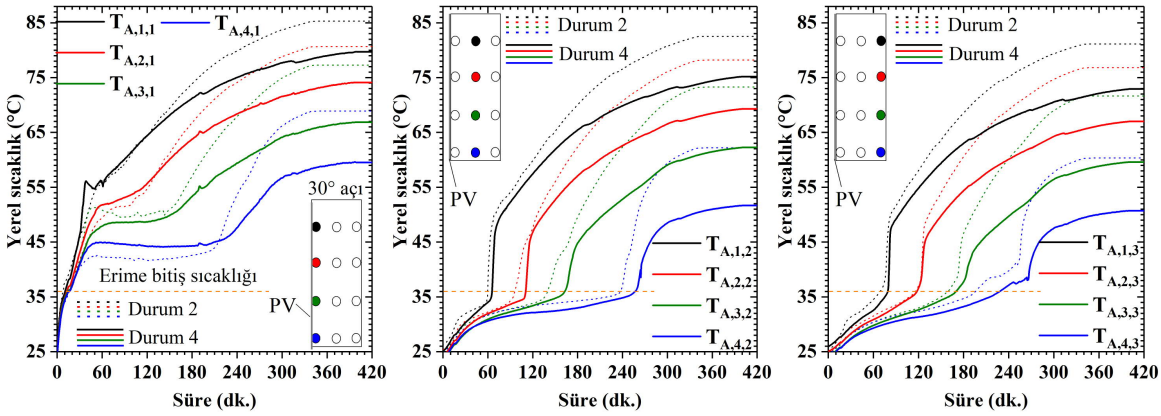


(B kesiti)



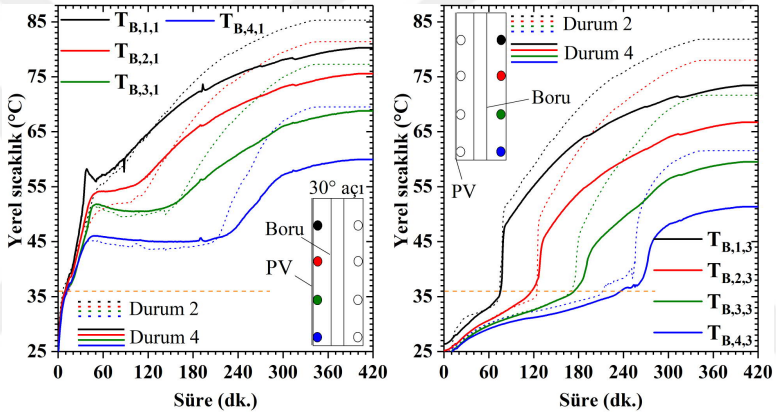
(C kesiti)

Şekil 65. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°)



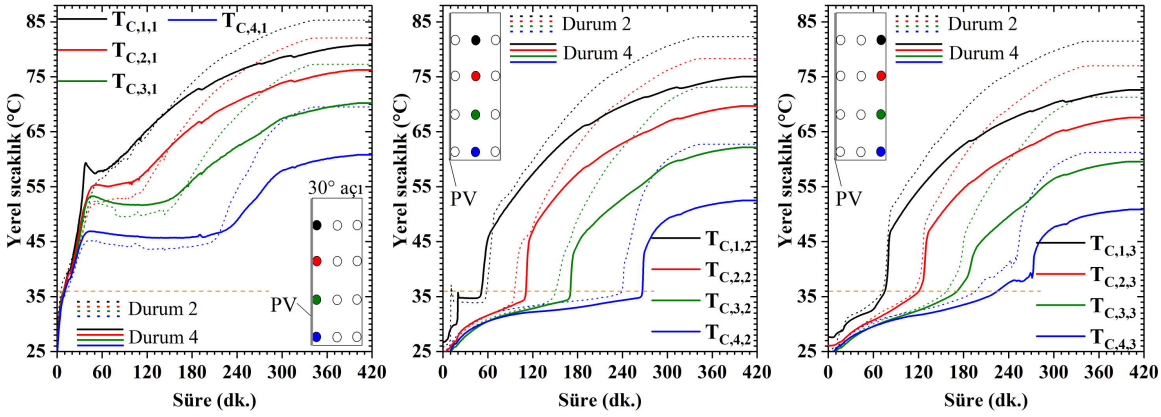
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

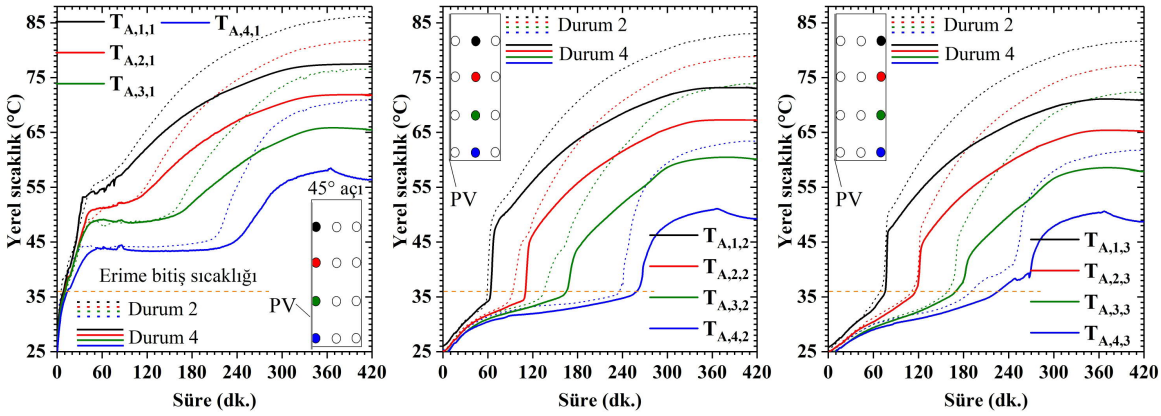
(B kesiti)



(f) (g) (h)

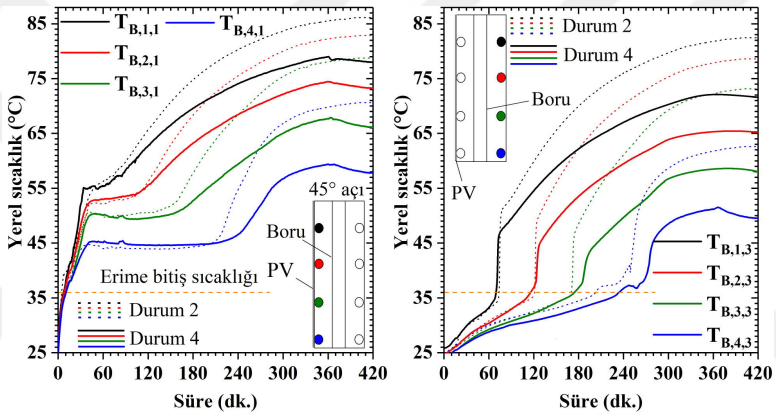
(C kesiti)

Şekil 66. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°)



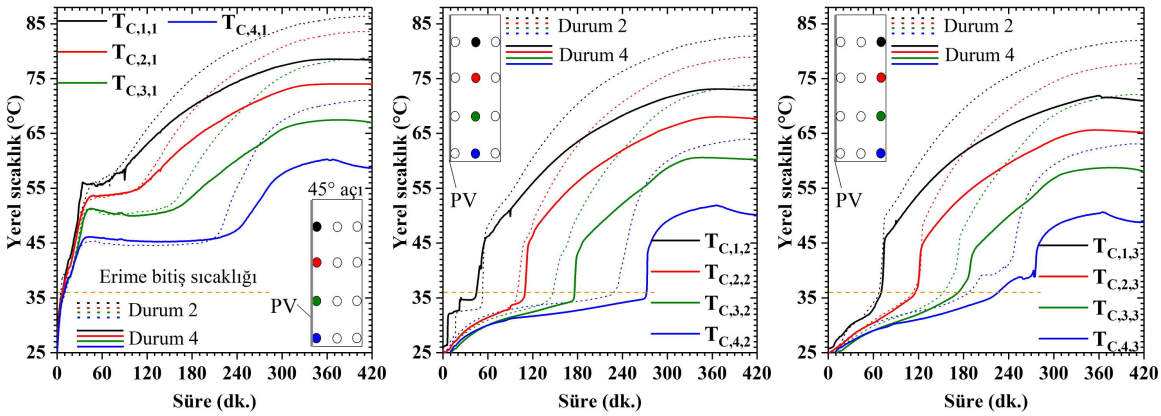
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

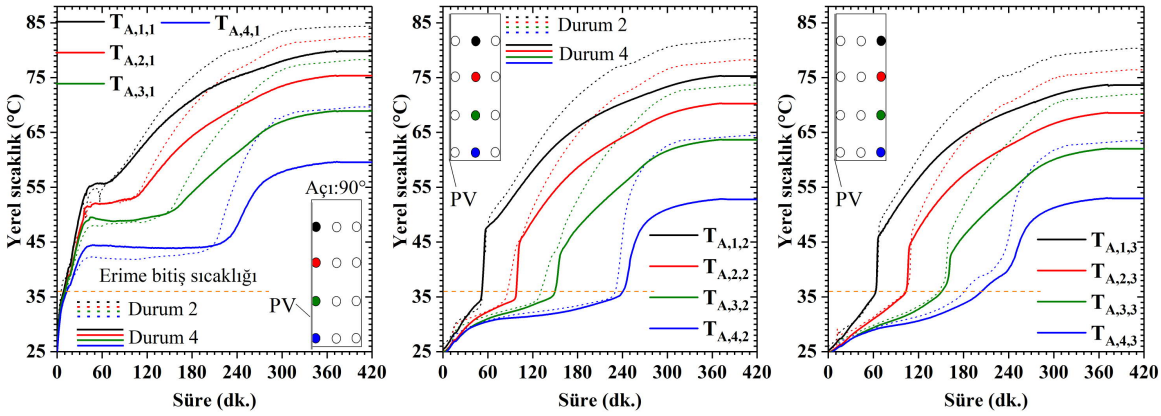
(B kesiti)



(f) (g) (h)

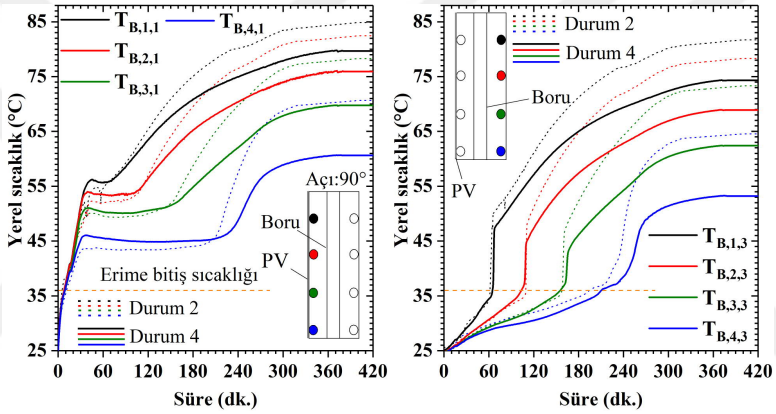
(C kesiti)

Şekil 67. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°)



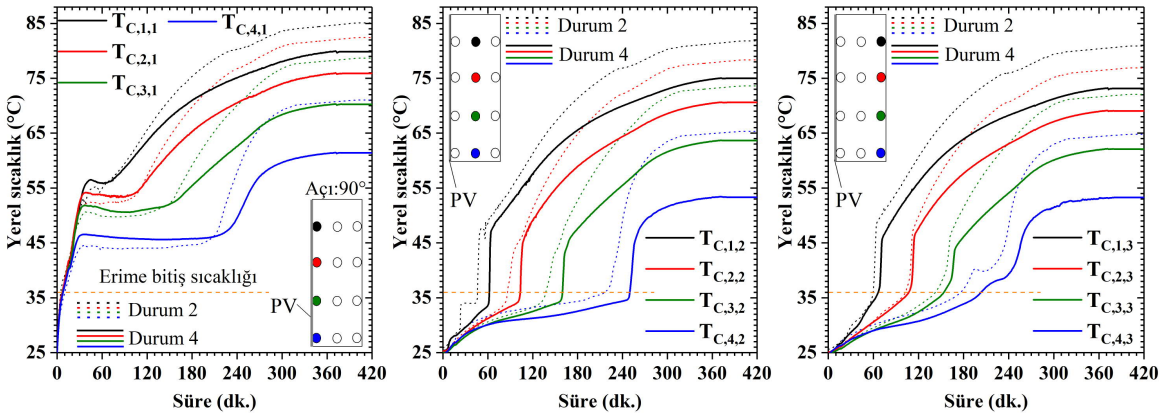
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

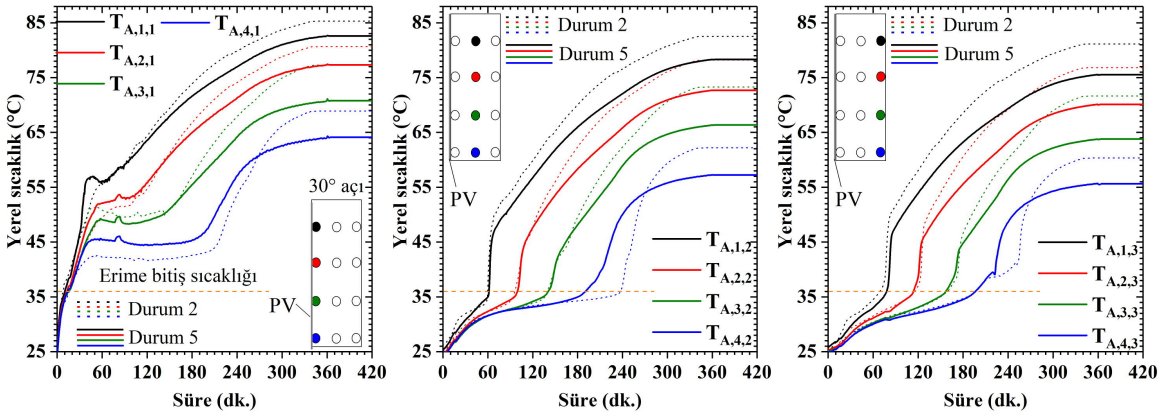
(B kesiti)



(f) (g) (h)

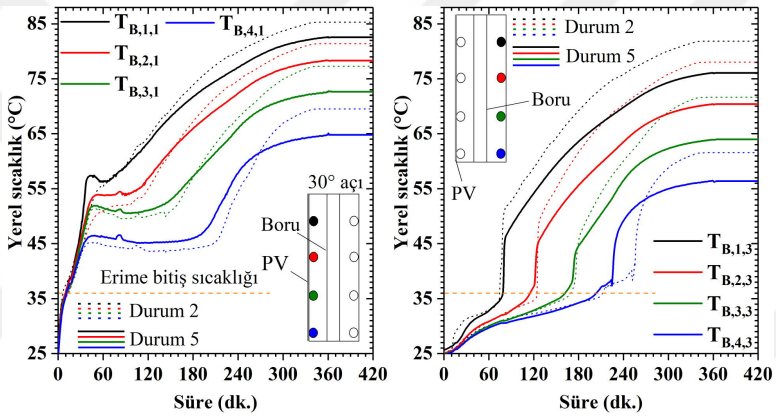
(C kesiti)

Şekil 68. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°)



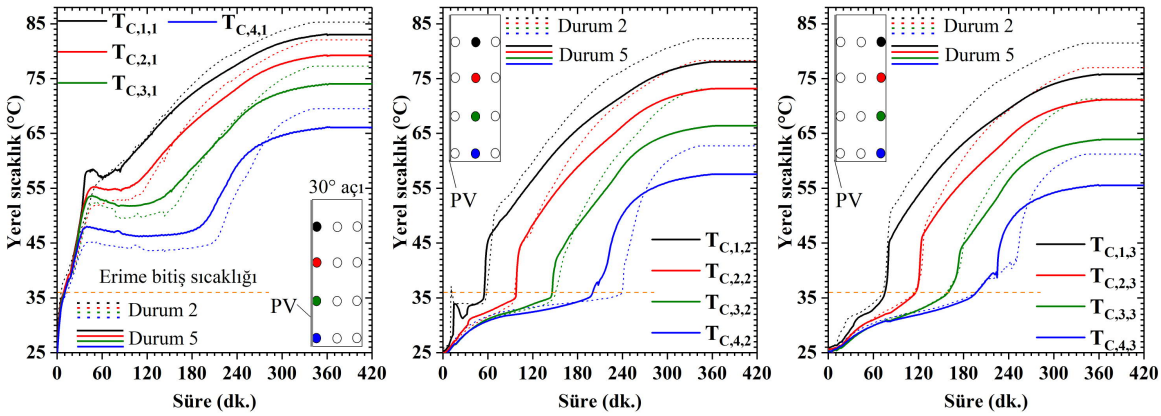
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

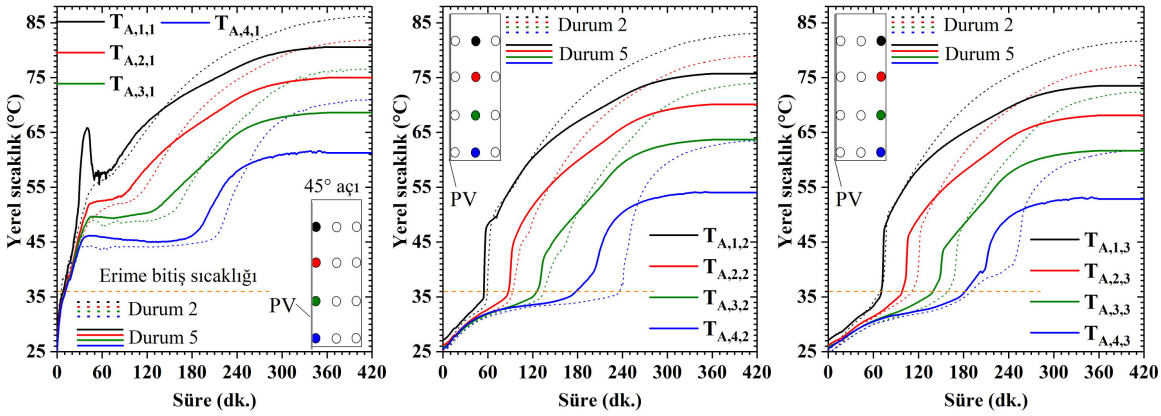
(B kesiti)



(f) (g) (h)

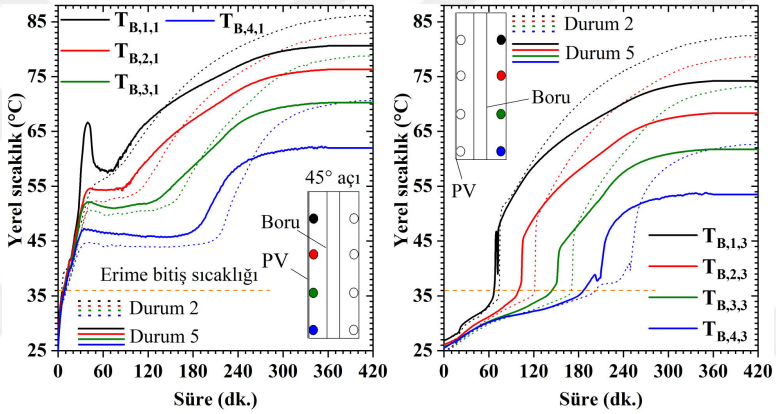
(C kesiti)

Şekil 69. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 30°)



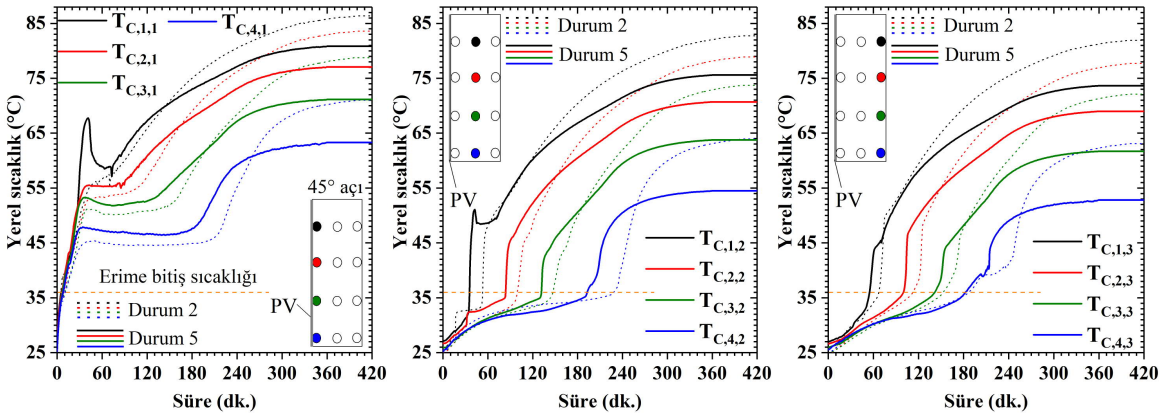
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

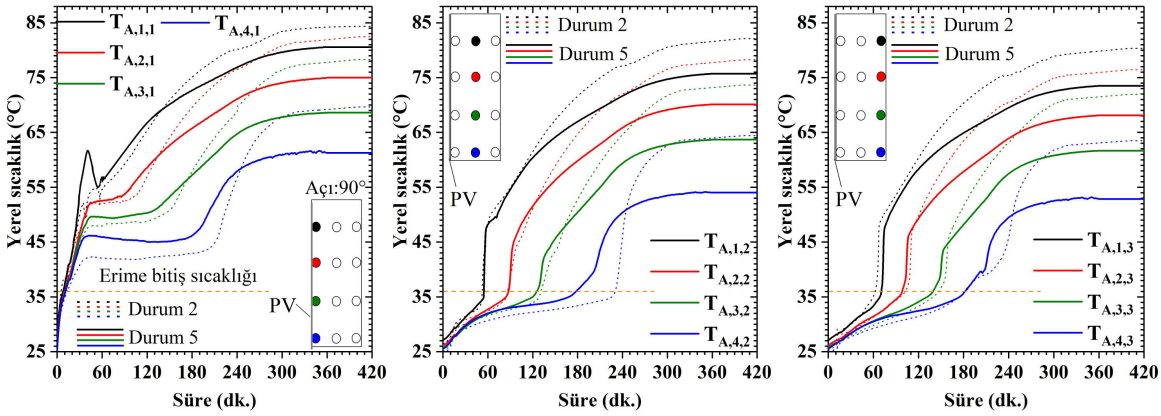
(B kesiti)



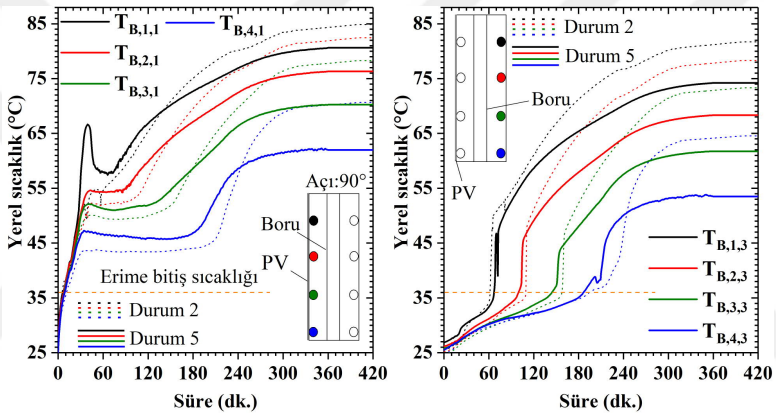
(f) (g) (h)

(C kesiti)

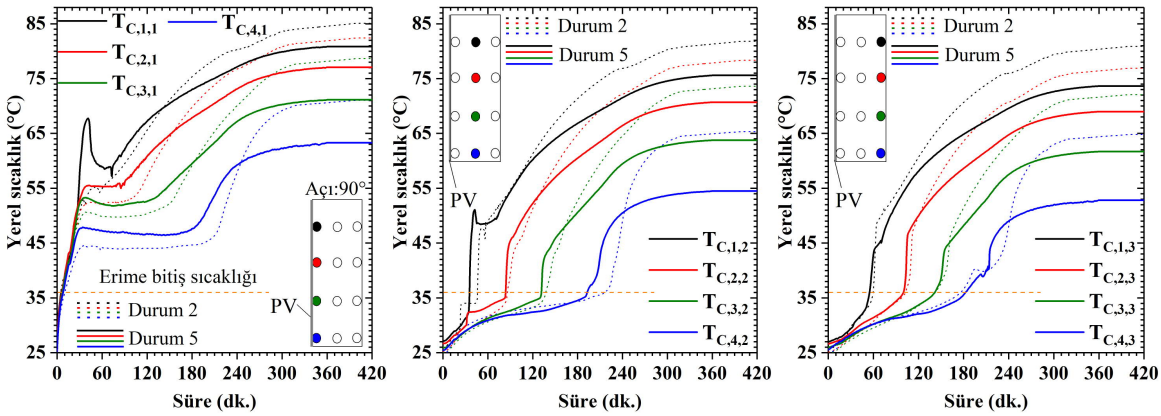
Şekil 70. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 45°)



(A kesiti)

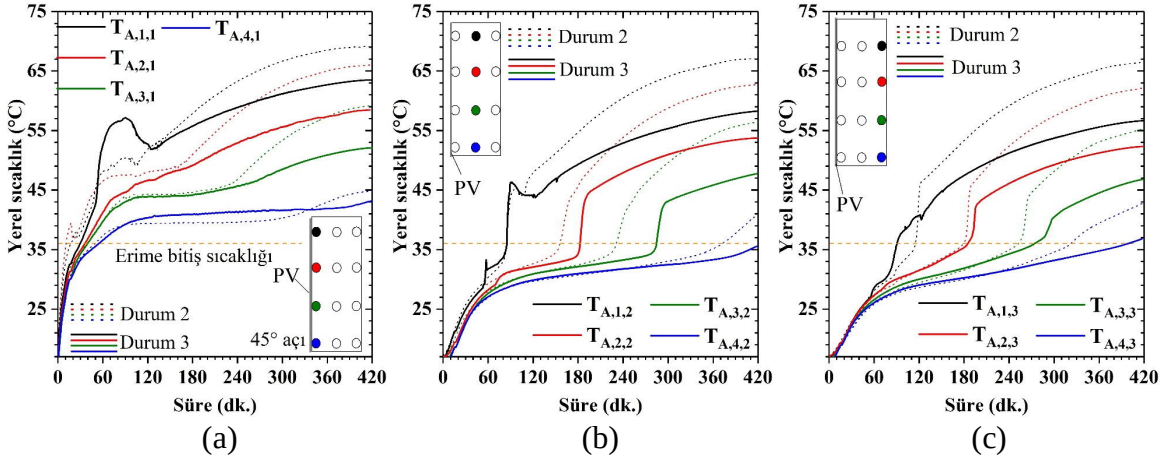


(B kesiti)



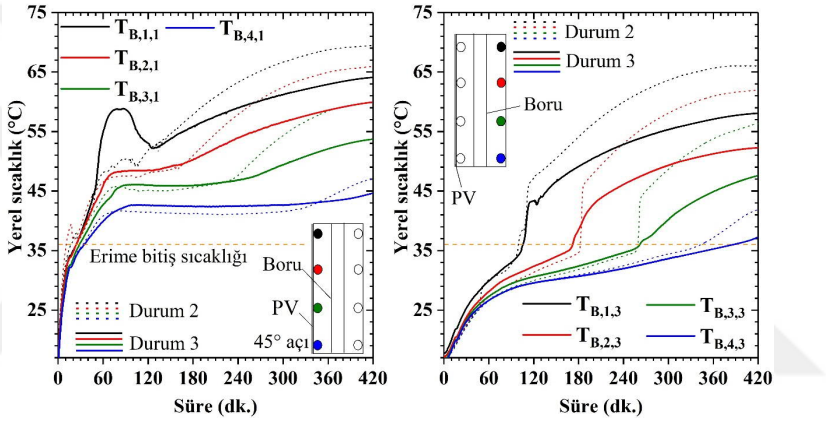
(C kesiti)

Şekil 71. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Işınım = 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C, Yerleşim açısı= 90°)



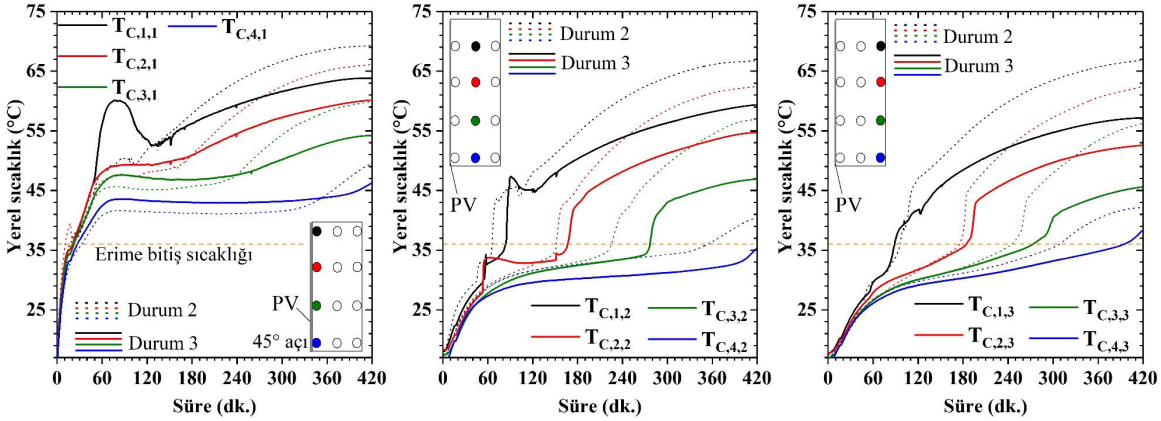
(a) (b) (c)

(A kesiti)



(d) (e)

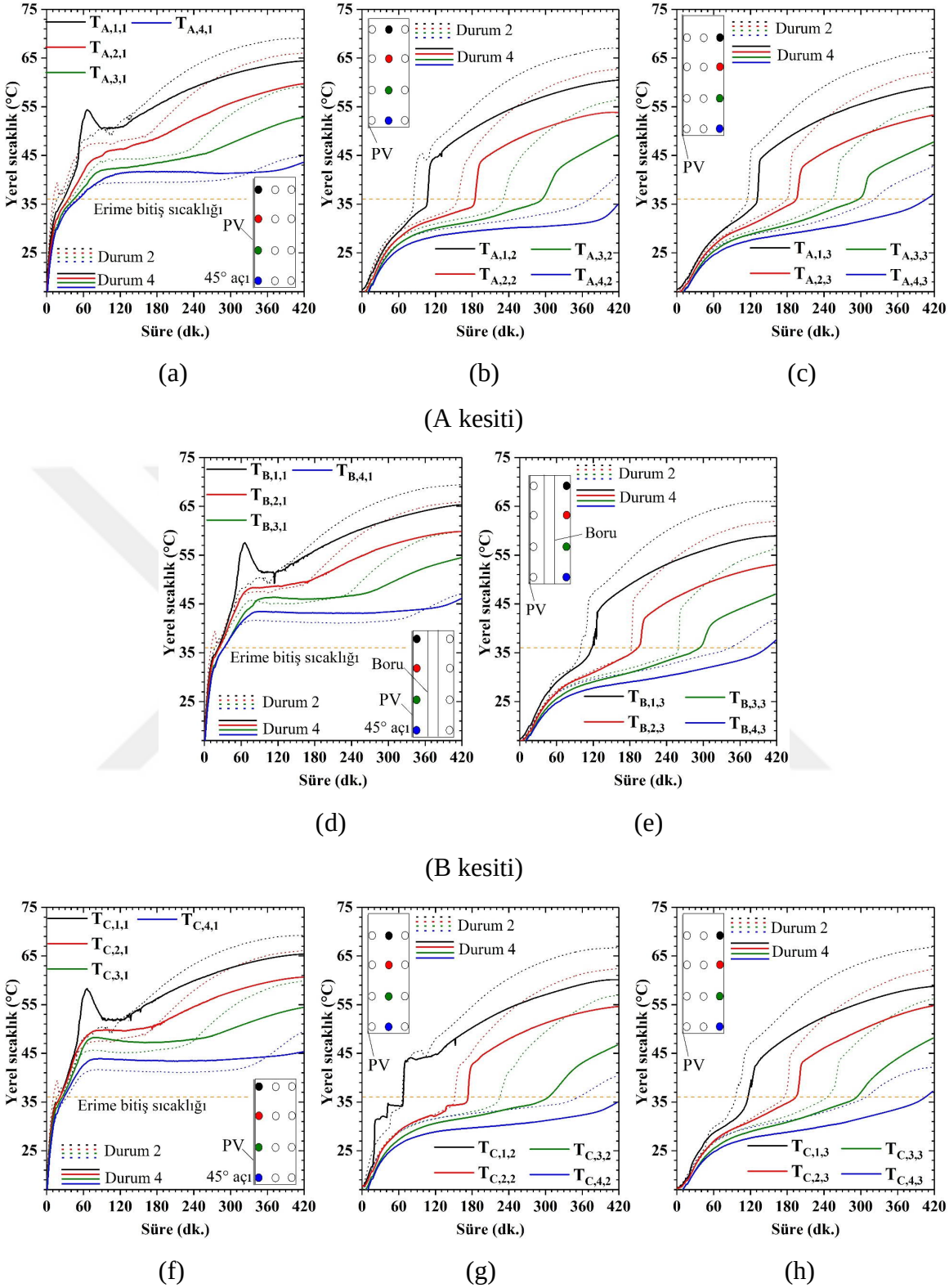
(B kesiti)



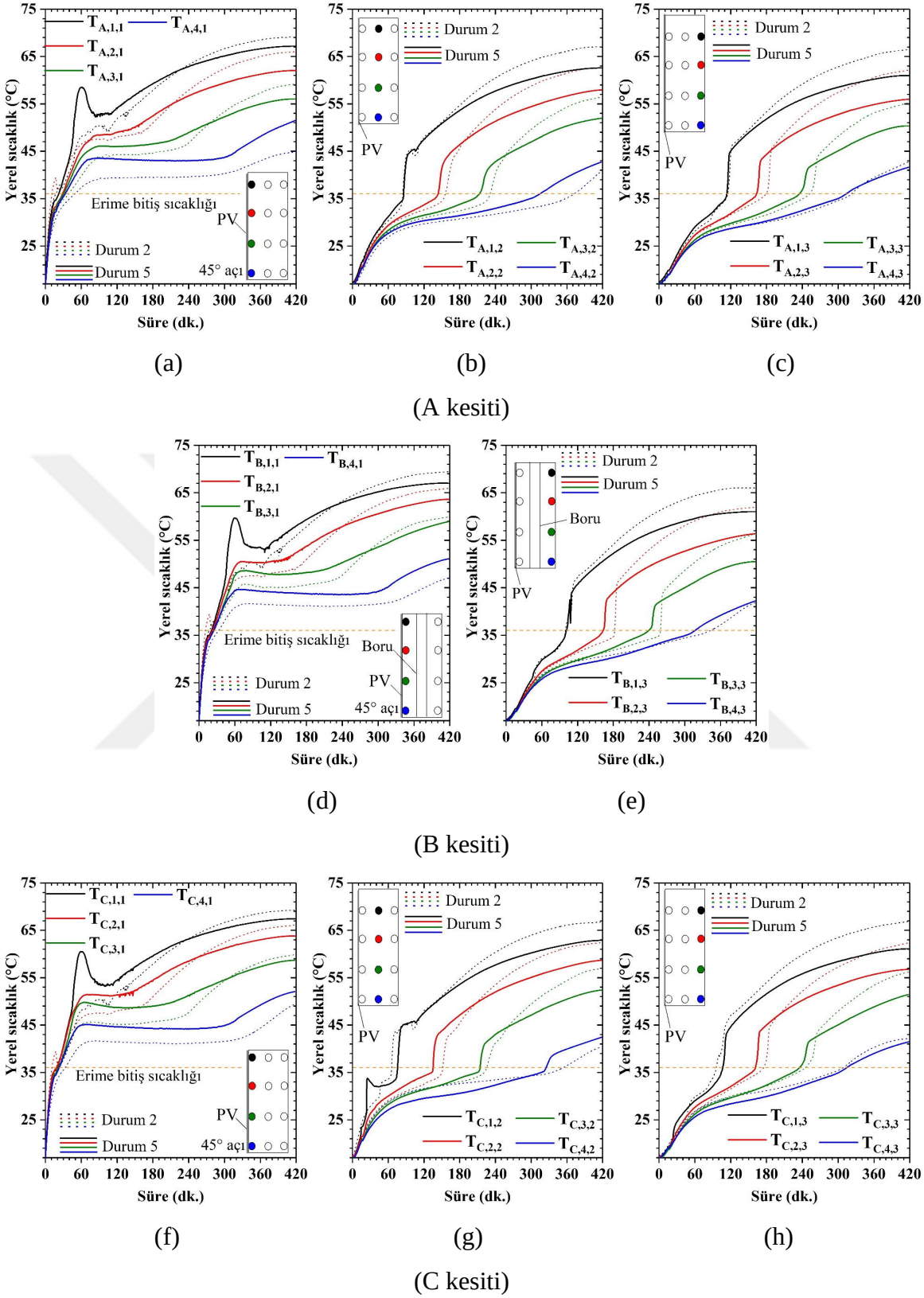
(f) (g) (h)

(C kesiti)

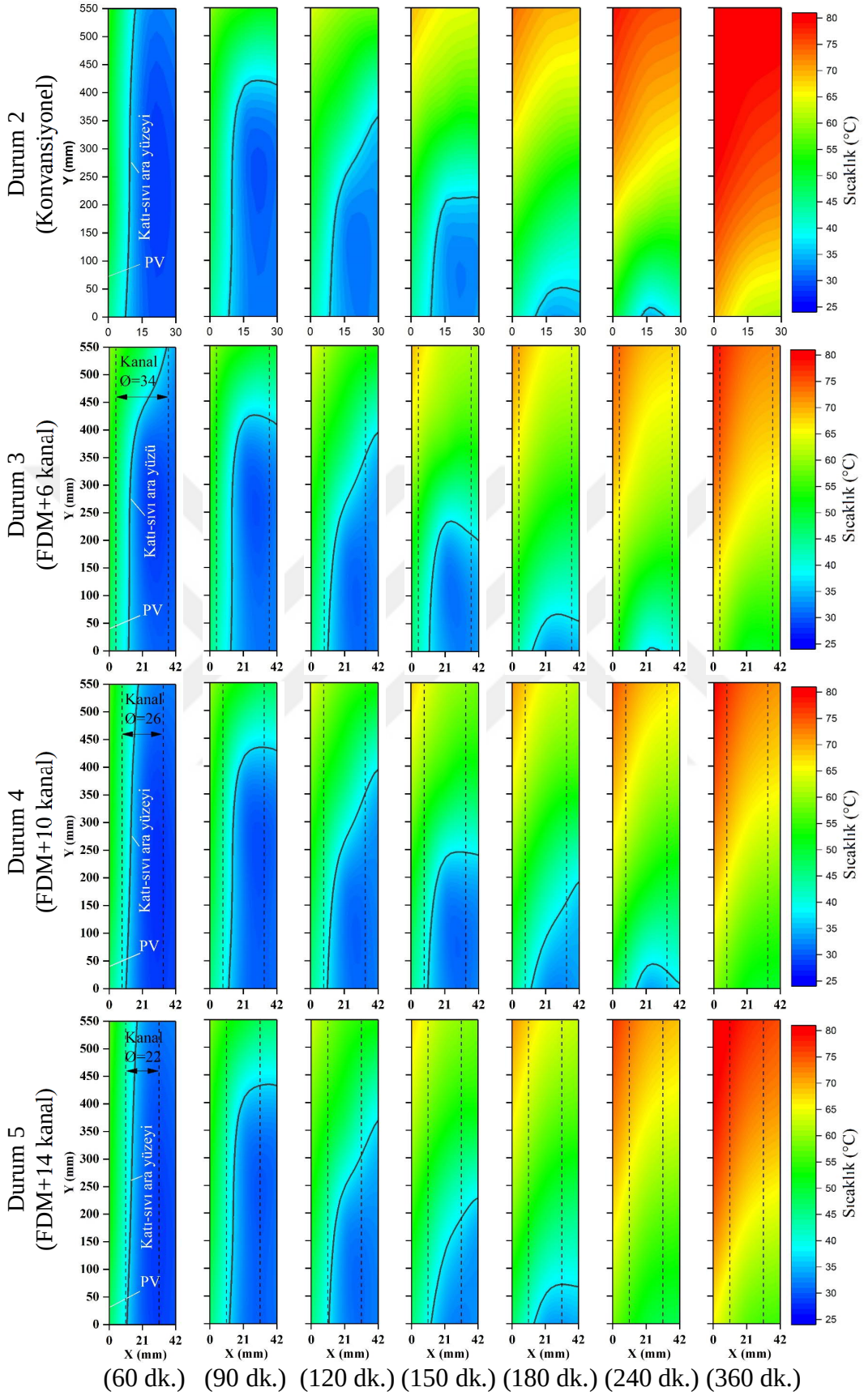
Şekil 72. Durum 3 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)



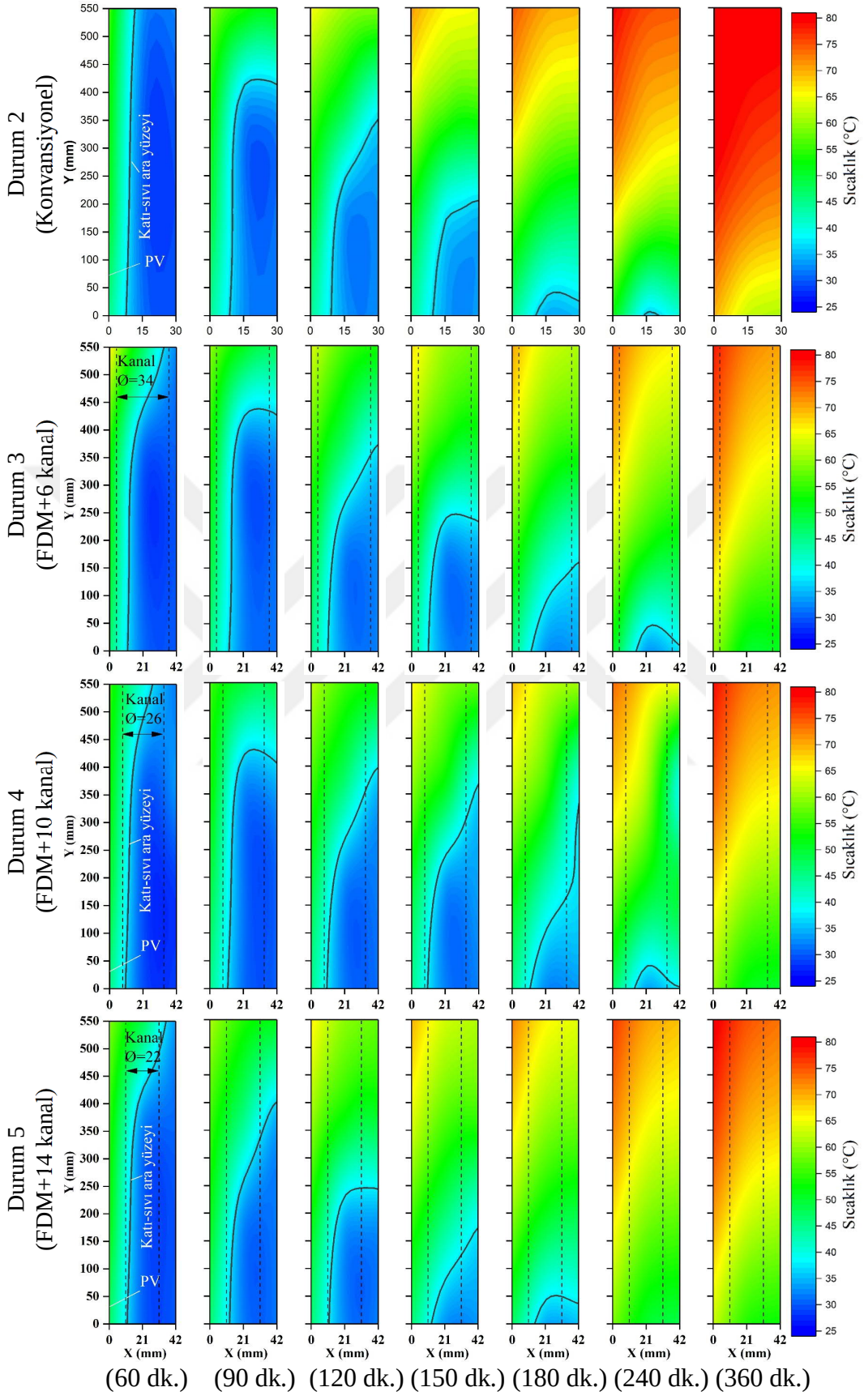
Şekil 73. Durum 4 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)



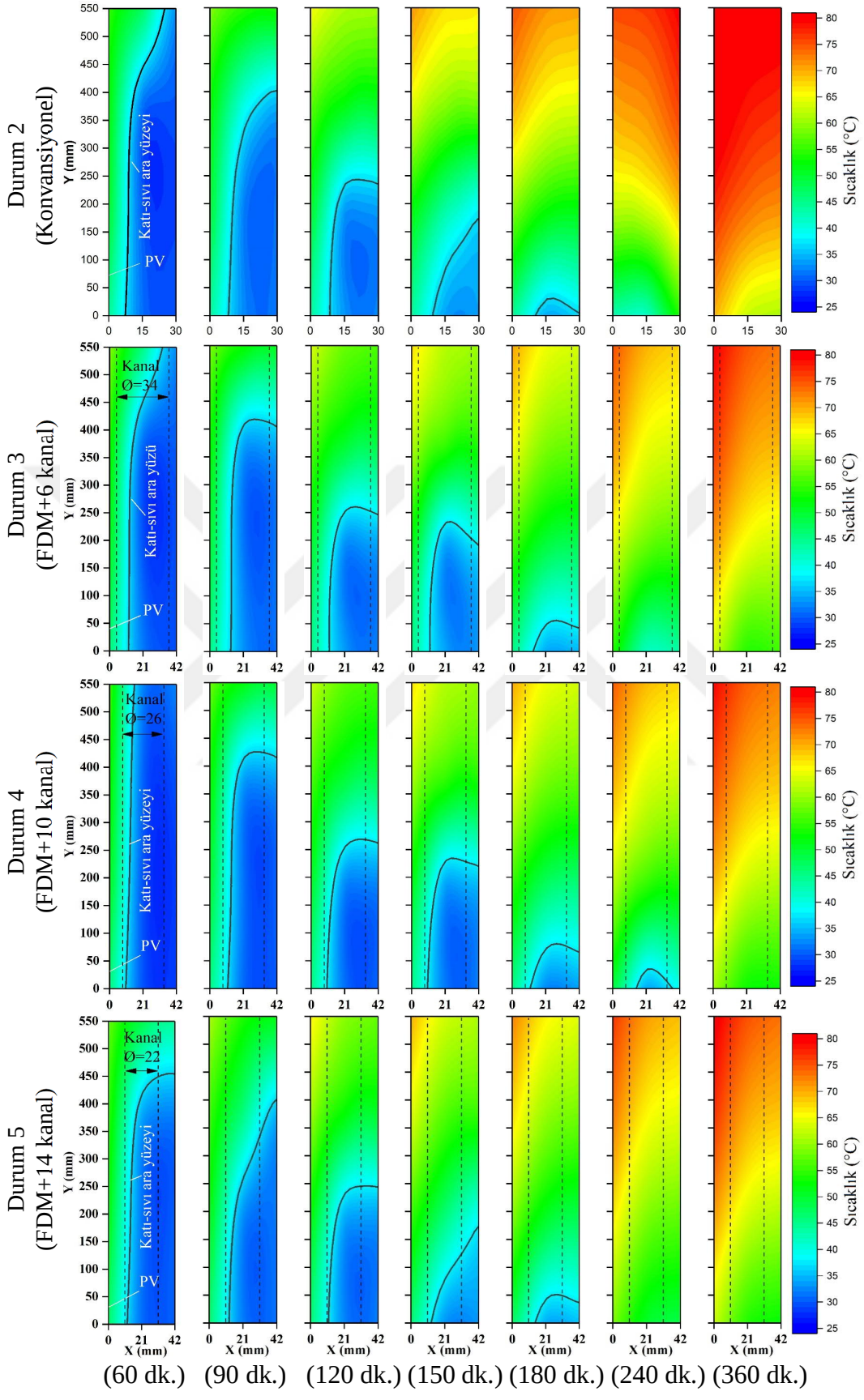
Şekil 74. Durum 5 için FDM katmanının A, B ve C kesiti üzerindeki sıcaklık dağılımları (Yerleşim açısı= 45°, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)



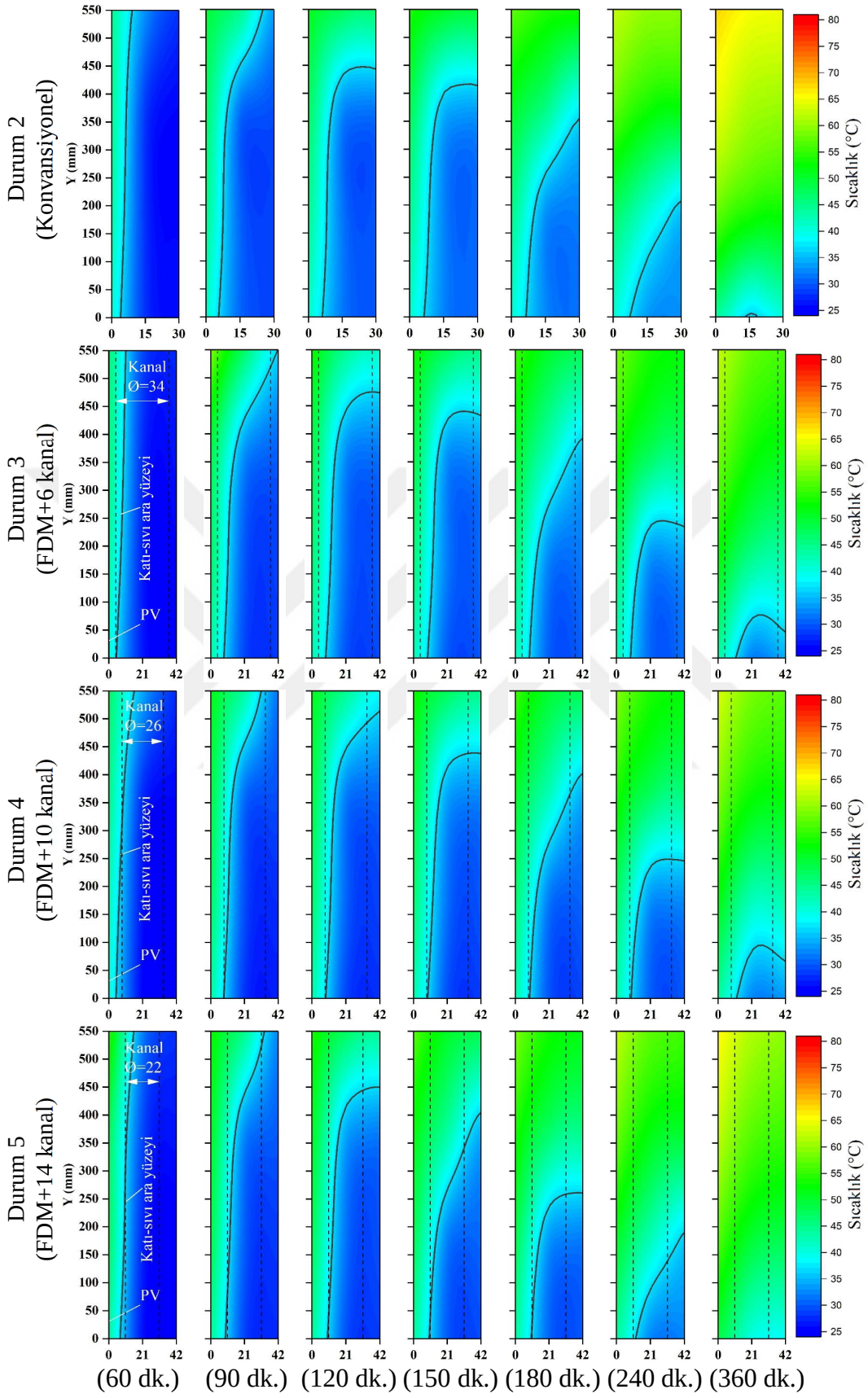
Şekil 75. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (30° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)



Şekil 76. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (45° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)



Şekil 77. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (90° yerleşim açışı, C ekseni, ışınım= 1000 W/m^2, T_{ortam} = 25 °C)



Şekil 78. İncelenen tüm PV- FDM sistemlerine ait farklı zaman adımları için eş sıcaklık eğrileri (45° yerleşim açışı, C ekseni, Işınım= 750 W/m^2, T_{ortam} = 17 °C)

3.3.3. FDM ve Hava Destekli PV Sistemlerin Elektriksel Güç Analizi

Özgün ısı alıcılar ile PV sıcaklığında sağlanan iyileştirmelerin temel amacı, PV-FDM sistemlerinin elektriksel güç düşüşünü azaltmak ve elektrik üretimini artırmaktır. Bu nedenle, PV sıcaklığında sağlanan değişimlerin güç çıktılarına etkisini belirlemek için tüm PV-FDM sistemlerinde maksimum güç takibi yapılmıştır. Bu takip sonucunda elde edilen anlık maksimum güç çıktılarının ve elektriksel enerji kazancının zamanla değişimleri Şekil 79'da sunulmuştur. Ayrıca, anlık maksimum güç değerleri üzerinden Denklem (10) ile hesaplanan toplam elektrik enerjisi miktarları ve bu değerlerdeki önemli artışlar saat bazında Tablo 12 ile 15 arasında derlenmiştir. Daha önce, ısı alıcısız (Durum 1) ve konvansiyonel FDM destekli ısı alıcılı durum (Durum 2) için güç üretimi üzerinde yapılan değerlendirme nedeniyle bu başlık altında FDM ve hava destekli ısı alıcıları (Durum 3-5) ve Durum 2'ye ait sonuçlar arasındaki farklılıklar üzerinde durulmuştur.

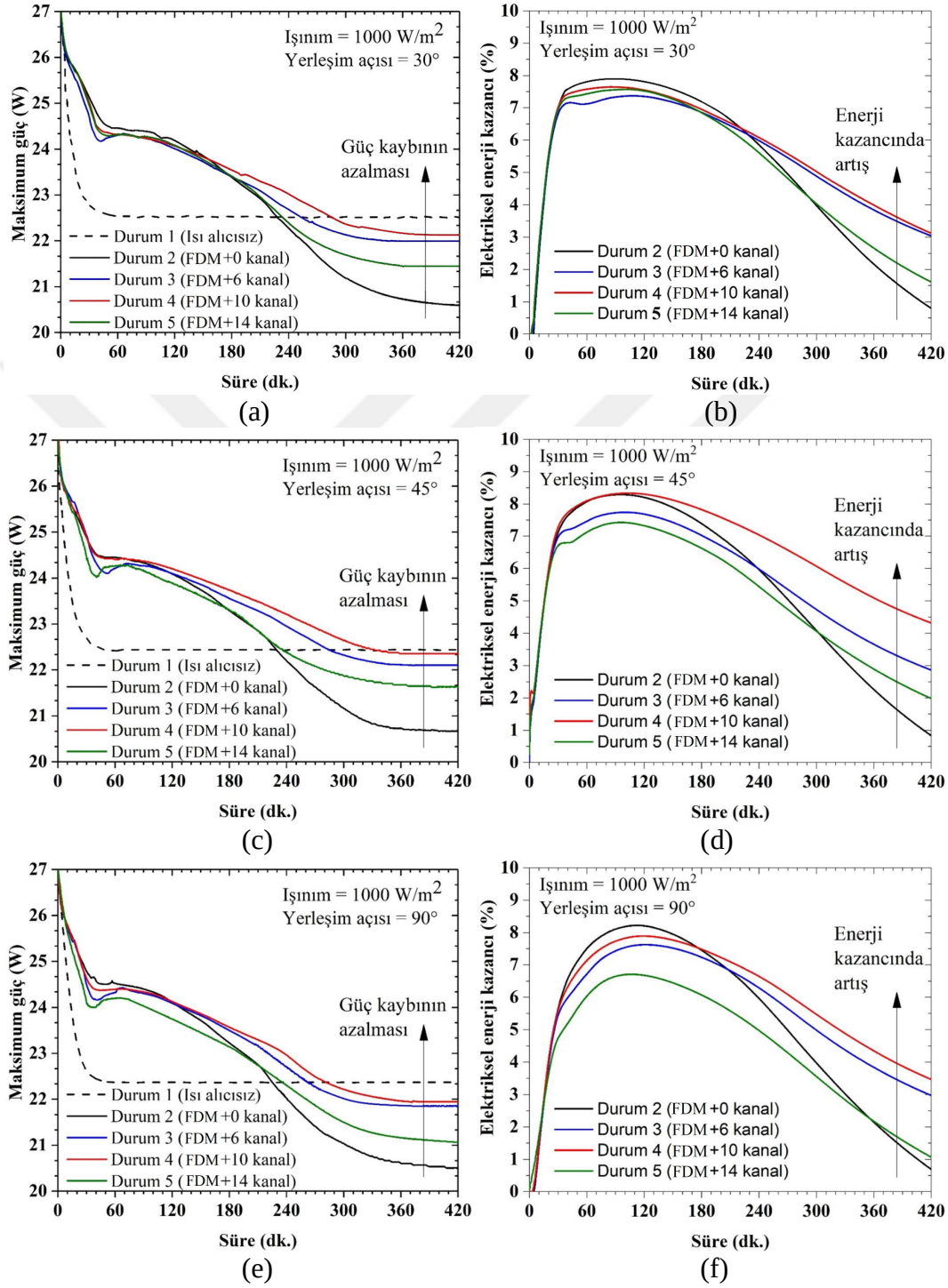
Şekil 79 incelendiğinde, Durum 3 ve 4'ün anlık güç çıktılarının uygulanan ışınım şiddeti ve yerleşim açısına bağlı olmakla birlikte ilk 150-180 dakikalık süre boyunca Durum 2'ye yakın seyrettiği görülmektedir. İlgili sürelerin ardından, FDM ve hava destekli ısı alıcılarının PV sıcaklığında sağladığı önemli yavaşlama sayesinde anlık güç değeri Durum 2'ye kıyasla daha yüksek değerlerde tutulmuştur. Durum 2'de, özellikle termal regülasyon periyodunun sonlarına doğru başlayan ve ilerleyen süreçte artan aşırı güç kaybı, FDM içerisine dahil edilen hava desteği sayesinde azaltılmıştır. Örneğin 1000 W/m^2 ışınım ve 45° yerleşim açısı için değerler incelendiğinde, başlangıçta 27 W olarak ölçülen gücün Durum 2 için deney süresinin sonunda 20,5 W'a gerilediği, Durum 3, 4 ve 5 içinse bu değerin sırasıyla 22 W, 22,3 W ve 21,6 W değerinde korunduğu görülmektedir. Diğer yerleşim açıları altında da benzer değişimler elde edilmiştir. Durum 3 ve 4, daha düşük ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı (750 W/m^2, 17 °C) altında da Durum 2'ye kıyasla güç çıktısını artırmış ve elektriksel güç, Şekil 79g'den görüldüğü üzere %5 oranında artışla 16 W değerine yükseltilmiştir. FDM ve hava destekli ısı alıcılar arasında bir karşılaştırma yapıldığında ise Durum 4 ile sağlanan yüksek soğutma performansı sayesinde deney süresinin genelinde diğer durumlara kıyasla güç çıktılarının daha yüksek seviyede tutulduğu görülmektedir. Durum 5'in ise uygulanan tüm yerleşim açıları ve ortam koşulları altında bu açıdan daha düşük güç çıktısına sahip olduğu ilgili eğrilere yansımaktadır.

Şekil 79'da verilen elektriksel enerji kazancındaki değişimler de termal regülasyon sürecinin etkilerine ait önemli veriler sunmaktadır. Durum 2 için yüksek ışınım altında (1000

W/m^2) elde edilen veriler incelendiğinde, FDM'nin PV sıcaklığında sağladığı kontrol sayesinde enerji kazancının ilk 150-180 dakika içinde %8'e kadar yükseldiği, ancak ilerleyen süreçte sıcaklık kontrolünün sağlanamaması nedeniyle deney süresinin sonunda %0,8'e kadar gerilediği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, Durum 2 (yalnızca FDM destekli durum) için termal regülasyon ile sağlanan enerji kazancı, regülasyon sonrasındaki aşırı sıcaklık artışları nedeniyle kaybolma eğilimi göstermiştir. Fakat güç kazanç eğrileri, Durum 3, 4 ve 5 için incelendiğinde, enerji kazancındaki bu kaybın özgün ısı alıcılarda bulunan hava desteği ile önemli ölçüde önlendiği görülmektedir. Özellikle Durum 4 için yapılan deneylerde, bu ısı alıcının sunduğu üstün soğutma performansı sayesinde deney süresinin büyük bir kısmında enerji kazancının diğer ısı alıcılarına kıyasla daha yüksek seviyelerde tutulduğu ve deney süresinin sonunda enerji kazancının %0,8'den %4,5'e kadar yükseldiği belirlenmiştir. 750 W/m^2 ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı altında ise bu değer yaklaşık %1'den Durum 4 ile %2,6'ya yükselmiştir.

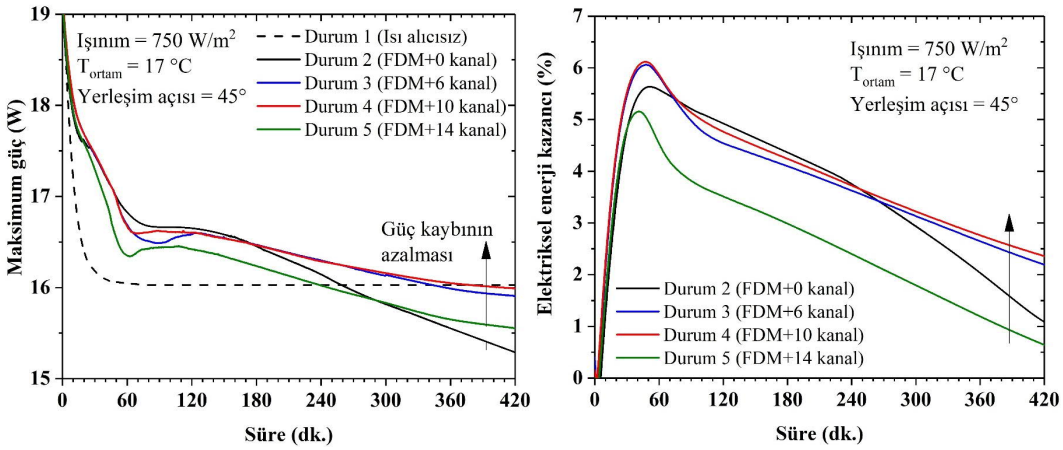
İncelenen PV-FDM sistemleriyle elde edilen güç çıktıları literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırıldığında, bazı çalışmaların PV sıcaklıklarında bu çalışma ile benzer düşüşler elde etmelerine rağmen güç çıktılarında daha yüksek oranlarda artışlar raporladığı görülmektedir (Ali, 2020). Bu durum, kullanılan PV panellerin sıcaklık katsayılarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan PV panel, yarı-kesim (half-cut) teknolojisiyle üretilmiş monokristalin bir paneldir. Bu tip paneller, polikristalin panellere kıyasla daha düşük sıcaklık katsayılarına sahip olup sıcaklık artışından daha az etkilenmektedir. Yapılan ön deneylerde, bu çalışmada kullanılan monokristalin panelin sıcaklık katsayısı yaklaşık β=0,4 olarak belirlenirken, literatürdeki polikristalin panellerin sıcaklık katsayılarının β=0,6'nın üzerinde olabildiği görülmektedir. Sıcaklık katsayısındaki bu farklılık, PV sıcaklığında benzer azalmalara rağmen çalışmalar arasında rapor edilen güç artışlarında farklılıklar oluşmasına neden olmaktadır. Monokristalin panellerin yaygınlaşan kullanımı göz önüne alındığında, bu çalışmada bu tip bir panelin tercih edilmiş olması, yapılan incelemenin güncelliği açısından önemli bir katkı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, burada önemli olan noktanın, referans olarak alınan sistem durumlarına (Durum 1 ve 2) kıyasla PV sıcaklığında ve güç çıktılarında hangi oranlarda iyileşmeler elde edilmesi olduğu ifade edilmelidir. Bu bağlamda, deney sonunda konvansiyonel PV-FDM sistemi için %0,8 olan güç kazancının, FDM ve hava destekli (Durum 4) ısı alıcı ile daha yüksek güç çıktılarının elde edildiği kritik ortam koşullarının ele alındığı deneylerde (1000 W/m^2 ışınım

ve 25 °C ortam) %4,5'e çıkması, oransal açıdan önemli bir iyileşme olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 79. İncelenen tüm PV-FDM sistemlere ait anlık maksimum güç ve elektriksel enerji kazancındaki değişim

Şekil 79'un devamı



(g) (h)

Tablo 12. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (30° yerleşim açısı)

Süre (dakika)		**60**	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**	**420**
Durum 1 (Isı alıcısız)	Elektrik üretimi (Wh)	23,48	46,08	68,93	91,53	114,11	136,11	158,47
Durum 2 (Yalnız FDM)	Elektrik üretimi (Wh)	25,22	49,57	73,39	96,27	117,97	139,13	159,75
	Durum 1'e göre artış (%)	7,41	7,57	6,47	5,18	3,38	2,22	0,81
Durum 3 (FDM +6 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	24,95	49,16	72,87	96,13	118,31	140,35	162,34
	Durum 1'e göre artış (%)	6,26	6,68	5,71	5,02	3,68	3,8	3,03
Durum 4 (FDM +10 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,14	49,36	73,18	96,48	119,17	141,40	163,43
	Durum 1'e göre artış (%)	7,07	7,12	6,17	5,40	4,43	4,0	3,13
Durum 5 (FDM +14 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,10	49,35	73,11	96,05	118,04	139,60	161,04
	Durum 1'e göre artış (%)	6,90	7,10	6,06	4,93	3,44	2,6	1,62

Tablo 13. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (45° yerleşim açısı)

Süre (dakika)		**60**	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**	**420**
Durum 1	Elektrik üretimi (Wh)	23,34	45,93	68,35	90,51	113,14	135,38	157,81
Durum 2 (Yalnız FDM)	Elektrik üretimi (Wh)	25,08	49,39	73,12	95,93	117,64	139,14	159,15
	Durum 1'e göre artış (%)	7,45	7,53	6,97	5,98	3,97	2,77	0,85
Durum 3 (FDM +6 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,03	49,26	73,11	96,4	119,01	141,19	163,3
	Durum 1'e göre artış (%)	7,24	7,25	6,96	6,50	5,18	4,29	3,47

Tablo 13'ün devamı

Durum 4 (FDM +10 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,15	49,83	73,68	96,97	119,90	142,37	164,72
	Durum 1'e göre artış (%)	7,75	8,50	7,80	7,14	5,97	5,16	4,40
Durum 5 (FDM +14 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	24,97	49,11	72,64	95,59	117,85	139,46	160,97
	Durum 1'e göre artış (%)	6,98	6,92	6,27	5,61	4,16	3,01	2,00

Tablo 14. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (90° yerleşim açısı)

Süre (dakika)		**60**	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**	**420**
Durum 1 (Isı alıcısız)	Elektrik üretimi (Wh)	23,33	45,70	68,07	90,43	112,80	135,17	157,53
Durum 2 (Yalnız FDM)	Elektrik üretimi (Wh)	25,08	49,45	73,15	95,84	117,30	138,09	158,64
	Durum 1'e göre artış (%)	7,50	8,20	7,46	5,98	3,98	2,16	0,70
Durum 3 (FDM +6 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	24,90	49,19	73,00	96,23	118,55	140,50	162,24
	Durum 1'e göre artış (%)	6,72	7,63	7,24	6,41	5,1	3,94	2,99
Durum 4 (FDM +10 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,00	49,31	73,17	96,45	119,00	141,05	163,00
	Durum 1'e göre artış (%)	7,15	7,90	7,50	6,65	5,50	4,35	3,47
Durum 5 (FDM +14 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	25,07	48,86	72,20	95,12	117,10	138,25	159,24
	Durum 1'e göre artış (%)	7,45	6,91	6,10	5,18	3,81	2,27	1,10

Tablo 15. 750 W/m^2 ışınım ve 17 °C ortam sıcaklığı altında üretilen toplam elektrik enerjisi ve Durum 1'e kıyasla elde edilen artış oranlarının saat bazlı dağılımı (45° yerleşim açısı)

Süre (dakika)		**60**	**120**	**180**	**240**	**300**	**360**	**420**
Durum 1 (Isı alıcısız)	Elektrik üretimi (Wh)	16,55	32,58	48,61	64,64	80,67	96,70	112,72
Durum 2 (Yalnız FDM)	Elektrik üretimi (Wh)	17,48	34,20	50,77	67,07	83,05	98,73	114,19
	Durum 1'e göre artış (%)	5,61	4.97	4,44	3,76	2,95	2,08	1,30
Durum 3 (FDM +6 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	17,53	34,07	50,61	67,0	83,20	99,27	115,20
	Durum 1'e göre artış (%)	5,93	4,58	4,11	3,65	3,14	2,66	2,20
Durum 4 (FDM +10 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	17,54	34,14	50,68	67,06	83,28	99,38	115,60
	Durum 1'e göre artış (%)	5,98	4,79	4,26	3,75	3,24	2,78	2,56
Durum 5 (FDM +14 kanal)	Elektrik üretimi (Wh)	17,31	33,73	50,01	66,2	82,12	97,86	113,46
	Durum 1'e göre artış (%)	4,60	3,53	2,89	2,41	1,80	1,2	0,66

Güç çıktıları üzerinde elde edilen bu sonuçlar, PV sistemlerinde sıcaklık kontrolünün elektriksel verimlilik üzerindeki kritik rolünü bir kez daha vurgulamaktadır. Sistemin termal durumunun termal regülasyon süresinin ötesini de kapsayacak şekilde dikkate alınması, elektriksel kazançların daha uzun vadeli sürdürülebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Aksi takdirde, geleneksel PV-FDM sistemlerinde (Durum 2) olduğu gibi elektriksel çıktıda önemli miktarda bir düşüş yaşanması kaçınılmazdır. Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında önerilen ve optimize edilen FDM ve hava destekli ısı alıcılar (Durum 3, 4 ve 5), termal regülasyon süresi boyunca sistemin elektriksel çıktısını pasif bir yaklaşımla artırmış, regülasyon sonrasında ise güç kazanımının korunması doğrultusunda önemli iyileşmeler sağlamıştır. Elde edilen bulgular, FDM katmanına açık uçlu boruların entegre edilmesinin, termal yönetim stratejilerinde karşılaşılan zorluklara etkili bir çözüm sunabileceğini ve enerji çıkışının daha sürdürülebilir hale getirilebileceğini göstermektedir.

3.3.4. FDM ve Hava destekli Sistemlerin Deşarj Sürecinin İncelenmesi

FDM ve hava destekli sistemlerin (Durum 3, 4 ve 5) katılaşma süreçleri, farklı yerleşim açıları (30°, 45°, 90°) ve düzlemsel kesitler üzerinden detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemelerde, yerel FDM sıcaklık verileri kullanılarak katılaşma dinamikleri analiz edilmiş ve sistemlerin performansı karşılaştırılmıştır. Şekil 80 - 115 arasında sunulan grafiklerde, ölçüm noktalarının konumları ve sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Katılaşma aralığının alt sıcaklığı (33,5 °C) turuncu kesikli çizgiyle, son katılaşan nokta ise siyah kesikli çizgiyle işaretlenmiştir.

Deşarj süreci boyunca sıcaklık değişimleri zaman bağlı olarak incelendiğinde, ışınımın ortadan kaldırılmasıyla öncelikle tüm yerel noktalarda sıcaklıkların katılaşmanın başladığı değere (35 °C) kadar kararlı bir düşüş sergilediği görülmektedir. Sıcaklık bu değere ulaşıncaya kadar FDM, erime sürecinde depoladığı duyulur ısıyı dış ortama aktarmakta ve katılaşmanın başladığı sıcaklığa ulaşmaktadır. Yerel sıcaklıklar incelendiğinde, deşarj sürecinin başında gerçekleşen bu ilk soğumanın, Durum 3, 4 ve 5 için Durum 2'ye kıyasla daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Bu nedenle Durum 3, 4 ve 5 içerisinde katılaşma daha erken bir zaman adımında başlamaktadır. Bu durum, deşarj sürecinin başında FDM sıcaklığının hava kanalları üzerinden doğal taşınım ile ısının dış ortama atılabilmesi için yeterli seviyede olması ve bu sayede FDM'den dış ortama atılan ek ısıdan kaynaklanmaktadır. Bu sayede, erimiş FDM içerisinde depolanan duyulur ısı, FDM

katmanından daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılmaktadır. Örneğin Durum 3'e ait 25 °C ortam sıcaklığında gerçekleşen deşarj süreci için yerel sıcaklıklar incelendiğinde (bkz. Şekil 85), 130. dakikada $T_{C,1,1\text{-}3}$ üst yerel noktalarda sıcaklık 35 °C'ye düşmüşken, bu zaman adımında Durum 2 için sıcaklık 37,5 °C olarak kaydedilmiştir. İlk soğuma hızında benzer durum, Şekil 107-115 arasında görüldüğü üzere 17 °C ortam sıcaklığı altında da meydana gelmiş, Durum 3-5 için yerel sıcaklık noktaları Durum 2'ye kıyasla yaklaşık 40 dakika daha erken katılaşma noktasına ulaşmıştır. Ayrıca önemli bir ayrıntı olarak, 25 °C ortam sıcaklığı altında yapılan deneylerde, özgün ve konvansiyonel sistemler arası ilk soğuma hızındaki bu farkın 30° yerleşim açısında daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu farklılık, düşük yerleşim açısına bağlı olarak Durum 2'nin katılaşma sıcaklığına kadar diğer yerleşim açılarına kıyasla daha yavaş soğumasından kaynaklanmaktadır. Bu olumsuzluk, deşarj sürecin başında FDM katmanının arkasında sıcak halde bulunan alüminyum yüzey ve çevre ortam arası doğal taşınım hareketlerinin düşük yerleşim açısı kaynaklı olarak zayıflaması ve bu yüzeyden atılan ısının diğer yerleşim açılarına kıyasla daha az olmasından kaynaklanmaktadır. FDM içerisine eklenen hava kanallarından dış ortama atılan ısı, düşük yerleşim açısında (30°) Durum 2 için ifade edilen bu olumsuzluğu azaltmış ve ilk soğumayı ilgili yerleşim açısı için belirgin bir şekilde hızlandırmıştır.

Yerel sıcaklıklar 35 °C'ye ulaştıktan sonra ise sıcaklık düşüşünde belirgin bir yavaşlama göze çarpmaktadır. Bu durum, yerel bölgelerde katılaşma sürecinin başladığını göstermektedir. FDM, bu süreçte, şarj sürecinde depoladığı gizli ısıyı dış ortama aktararak katılaşmaktadır. Tüm yerel sıcaklıklar katılaşma çizgisi dikkate alınarak incelendiğinde, dış yüzeye yakın noktalarda katılaşmanın daha erken tamamlandığı, en son katılaşan noktanın ise simetri ekseni (C ekseni) üzerinde orta kısımda yer alan $T_{C,2,2}$ veya $T_{C,3,2}$ noktaları olduğu görülmektedir. Örneğin, Durum 3 ve 45° yerleşim açısı için (T_{ortam} = 25 °C) yerel sıcaklıklar incelendiğinde (Şekil 83), katılaşmanın ilk olarak yaklaşık 280. dakikada A ekseni üzerinde en altta yer alan $T_{A,4,1}$, $T_{A,4,2}$ ve $T_{A,4,3}$ noktalarında meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde C ekseni üzerindeki yerel sıcaklıklar incelendiğinde ise $T_{C,2,2}$ veya $T_{C,3,2}$ noktalarının katılaşma sürelerinin yaklaşık 680 dakika olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, 17 °C ortam sıcaklığı için yerel sıcaklık dağılımları dikkate alındığında (Şekil 107-115), uygulanan ortam sıcaklığındaki azalmayla birlikte FDM ve hava destekli ısı alıcılar için katılaşma davranışının değişmediği ve dış yüzeye yakın noktaların daha erken katılaşma sürecini tamamladığı görülmektedir. Durum 3-5 için yerel katılaşma süreleri Durum 2 ile kıyaslandığında ise, katılaşmanın tüm yerel noktalarda önemli ölçüde hızlandığı göze

çarpmaktadır. Örneğin Şekil 82'de, Durum 2 ve 3 için 25 °C ortam sıcaklığı altında en geç katılaşan $T_{C,3,2}$ noktası için veriler incelendiğinde, toplam katılaşma süresinin Durum 2 için 850 dakika, Durum 3 için ise 655 dakika olarak kaydedildiği görülmektedir. 17 °C ortam sıcaklığı altında ise $T_{C,3,2}$ noktası için veriler Durum 2 ve 3 için sırasıyla 490 ve 395 dakika olarak tespit edilmiştir.

Katılaşma hızlarında elde edilen iyileşmeler, FDM ve hava destekli tüm sistemler için gözlemlenmiş olup, diğer parametreler için toplam katılaşma süreleri Tablo 16 ve 17'de derlenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, 25 °C ve 17 °C ortam sıcaklığında ortam sıcaklığı altında FDM ve hava destekli ısı alıcılarıyla toplam katılaşma sürelerinde sırasıyla %36,5 ve %26'ya varan kısalmalar elde edilmiştir.

Toplam katılaşma süresinde sağlanan bu önemli azalmalara, katılaşma sürecinde hava kanalları üzerinden atılan ısının yanı sıra, bu kanalları oluşturmak için kullanılan bakır boruların FDM'nin ısıl iletkenliğini artırmasının da katkıda bulunduğu belirtilmelidir. Daha önce Durum 2 için açıklandığı üzere, katılaşma esnasında katı FDM kalınlığının dış yüzeylerde artmasıyla ısıl direnç giderek artmaktadır. Bu durum, FDM katmanının iç kısımlarından ısının daha yavaş uzaklaştırılmasına neden olmakta ve Durum 2 için uzun katılaşma sürelerinin oluşmasına yol açmaktadır.

Durum 3-5 kapsamında FDM içine entegre edilen hava kanalları, FDM'nin iç bölgelerinden dış ortama ısı atılmasını sağlayarak katılaşma sürecinin önemli ölçüde hızlanmasına katkıda bulunmuştur. Bu durumun, aynı zamanda katılaşma davranışında da bir değişikliğe yol açtığı da ifade edilmelidir. Durum 3, 4 ve 5 için katılaşma, Durum 2'den farklı olarak, FDM hacmini çevreleyen dış düzlemsel yüzeylerin yanı sıra, hava kanallarının FDM ile temas eden yüzeylerinden de başlayarak ilerlemektedir. Ayrıca, katılaşma sürecinde iletimin baskın ısı transfer mekanizması olması nedeniyle, bakır hava kanallarının gövdesi, ısının FDM içerisinde iletilmesine yardımcı olmakta ve ısının dış ortama uzaklaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Isıl iletkenlikteki bu iyileşmenin sürece katkısı, deşarj sürecine ait ortalama FDM sıcaklıklarının verildiği Şekil 116'dan da görülebilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere FDM sıcaklığının 35 °C'nin altına düşmesi ve FDM-dış ortam arası sıcaklık farkının azalmasına, diğer bir ifadeyle hava kanallarından atılan ısının azalmasına karşın, FDM sıcaklığında Durum 2'ye kıyasla meydana gelen hızlı düşüş ısıl iletkenlikte sağlanan iyileşme sayesinde devamlılık göstermiştir.

Katılaşma sürecinin değerlendirilmesi adına, son olarak durumlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında, en kısa katılaşma sürelerinin genel olarak Durum 5 ile elde

edildiği tespit edilmiştir. Bu durum ilgili ısı alıcının 14 adet hava kanalı ile FDM içerisinde en yüksek ısı transfer yüzey alanını sağlamasıyla açıklanabilir. Ayrıca, katılaşma sürecinin iletim temelli gerçekleşmesine bağlı olarak, hava kanallarının erime sürecinde olduğu gibi taşınım hareketini bozması yönünde bir durum oluşturmaması, Durum 5'in en iyi katılaşma performansını vermesine olanak tanımıştır.

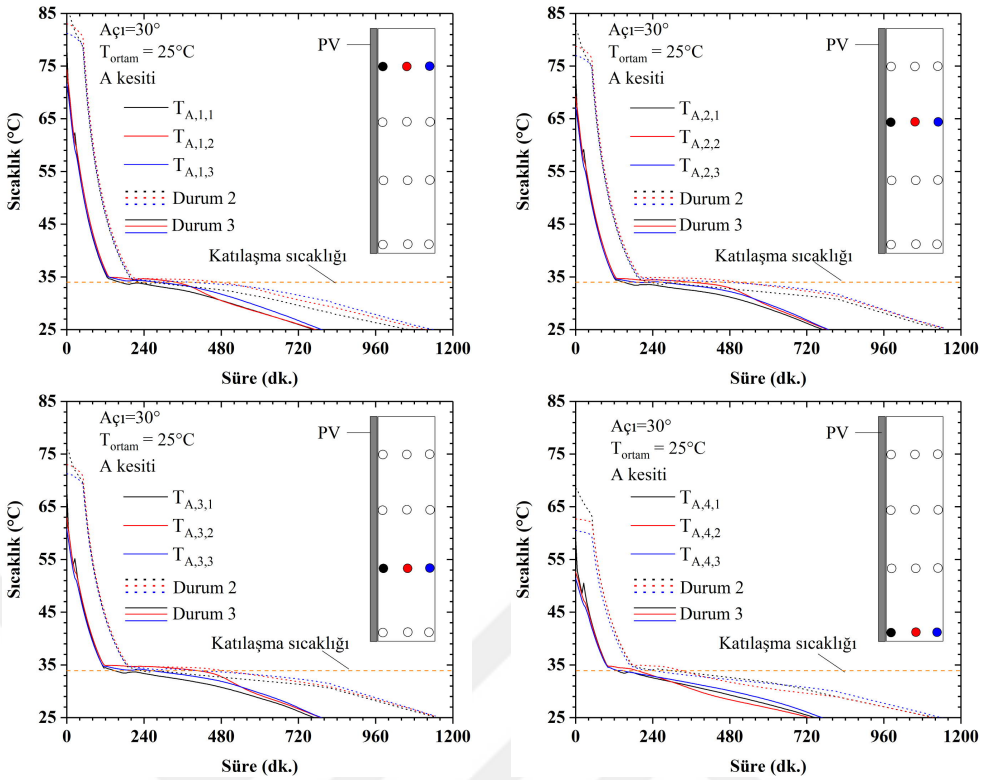
Bu sayede, Tablo 16'da görüldüğü üzere Durum 5 ile 45° ve 90° yerleşim açılarında katılaşma süresinde %36,5'e varan oranlarda azalma sağlanmıştır. Şarj süreci boyunca en iyi soğutma performansını sağlayan Durum 4 ise katılaşma süresinde %25'e varan oranda önemli azalma sağlamıştır. Daha önce Durum 2 için 25 °C ortam sıcaklığı altında yaklaşık 14 saat olarak tespit edilen katılaşma süresi, FDM ve hava destekli ısı alıcı uygulamasıyla 9 saate kadar düşürülmüştür. Bu azalma, PV-FDM sistemlerinde gece boyunca katılaşmanın temini ve ardışık günlerde aynı ısı depolama kapasitesini sunabilmesi açısından olumlu ve gerekli bir gelişme olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 16. Tüm PV-FDM sistemler için toplam katılaşma süreleri (T_{ortam} = 25 °C)

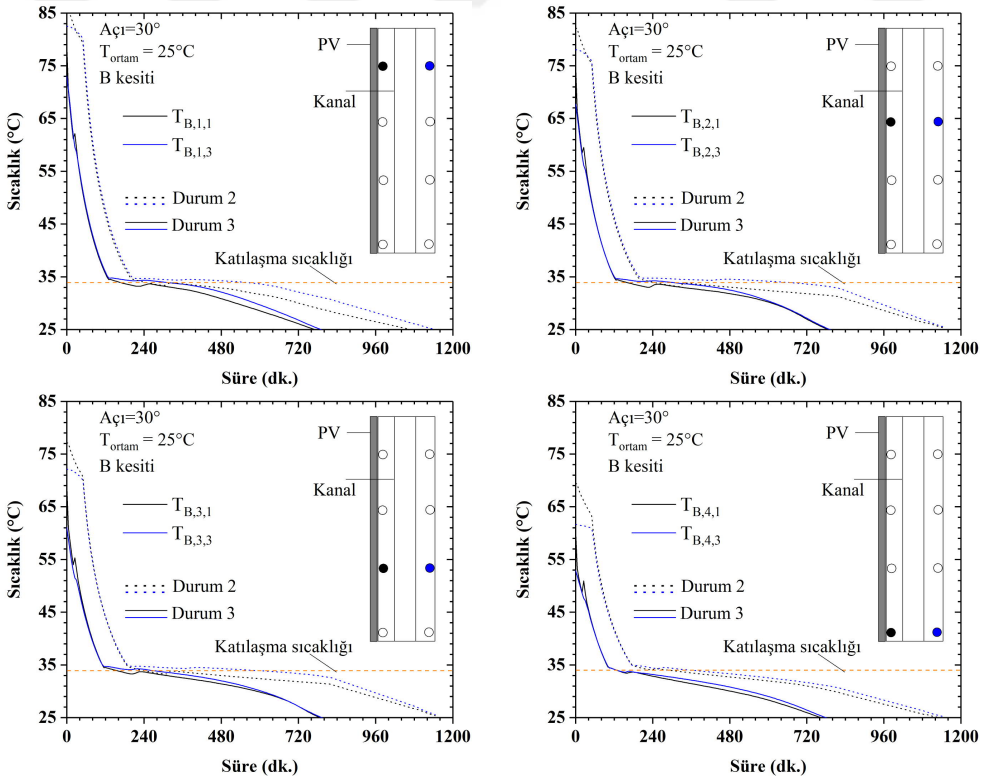
	Durum 2			**Durum 3**			**Durum 4**			**Durum 5**		
Yerleşim açısı	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**	**30°**	**45°**	**90°**
Toplam katılaşma süresi (dk.)	825	850	850	655	685	680	630	665	660	575	540	540
Katılaşma süresinde kısalma %	--	--	--	20,6	19,4	20,0	23,6	21,8	22,3	30,3	36,4	36,4

Tablo 17. Tüm PV-FDM sistemler için toplam katılaşma süreleri (T_{ortam} = 17 °C)

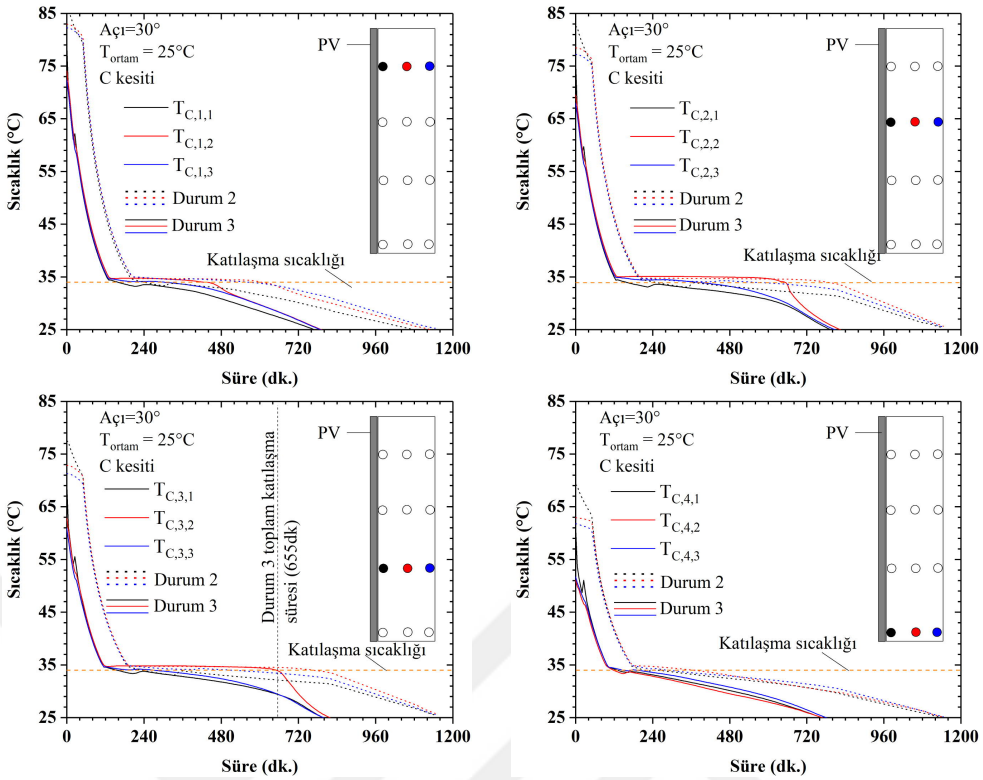
	Durum 2	**Durum 3**	**Durum 4**	**Durum 5**
Yerleşim açısı	**45°**	**45°**	**45°**	**45°**
Toplam katılaşma süresi (dk.)	490	395	380	362
Katılaşma süresinde kısalma %	--	19,4	22,5	26,2



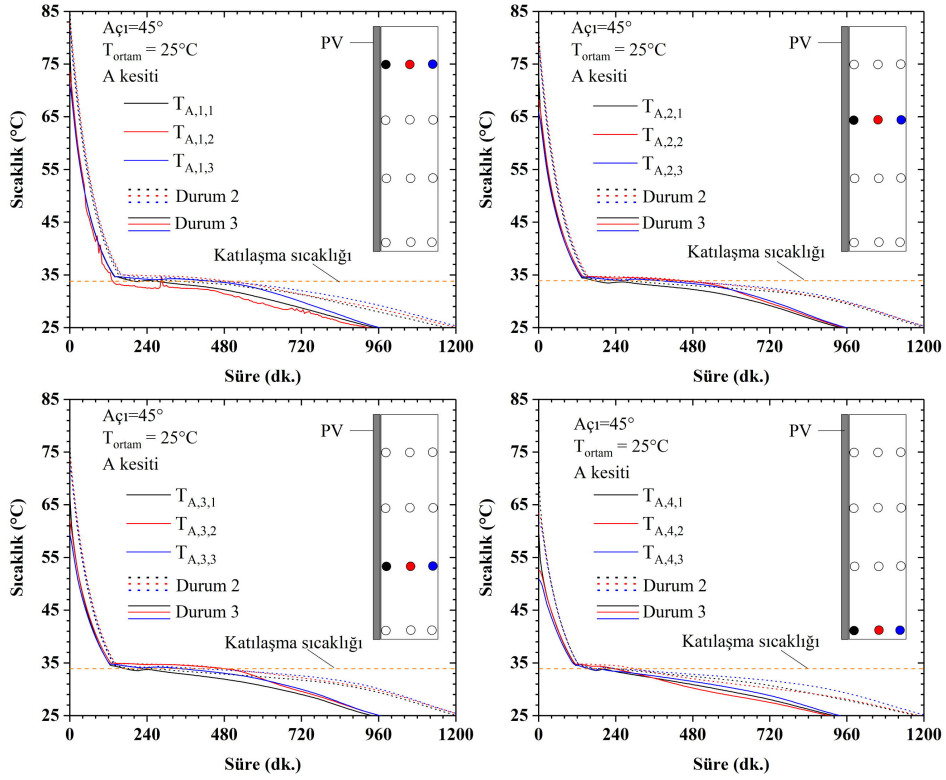
Şekil 80. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



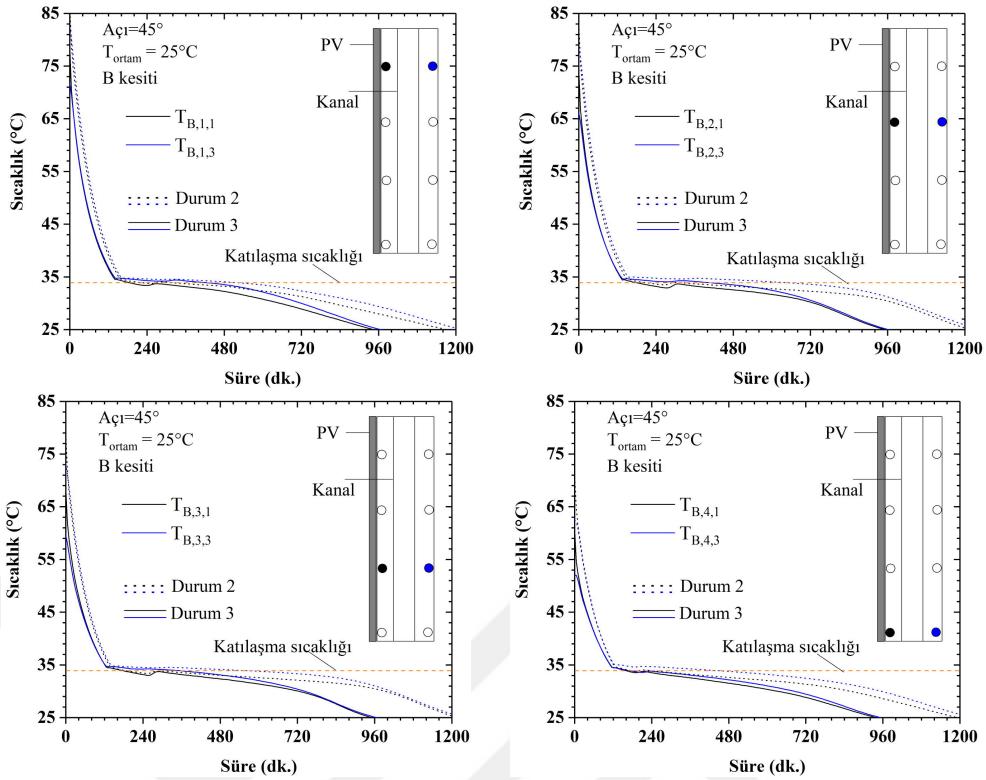
Şekil 81. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



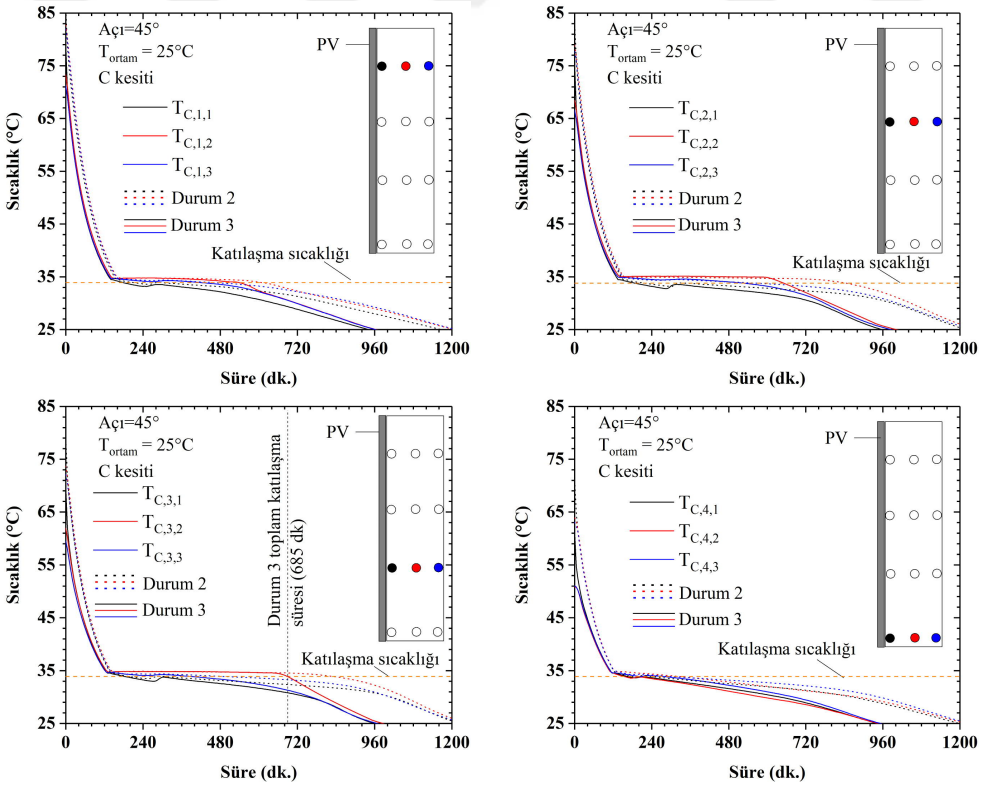
Şekil 82. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



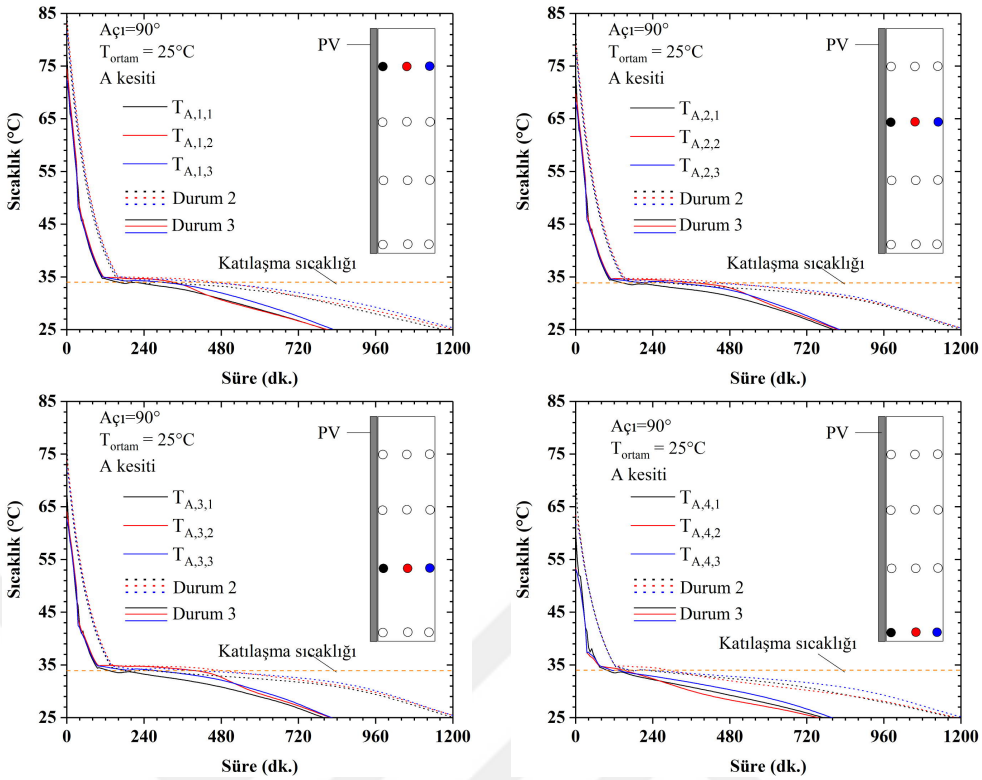
Şekil 83. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



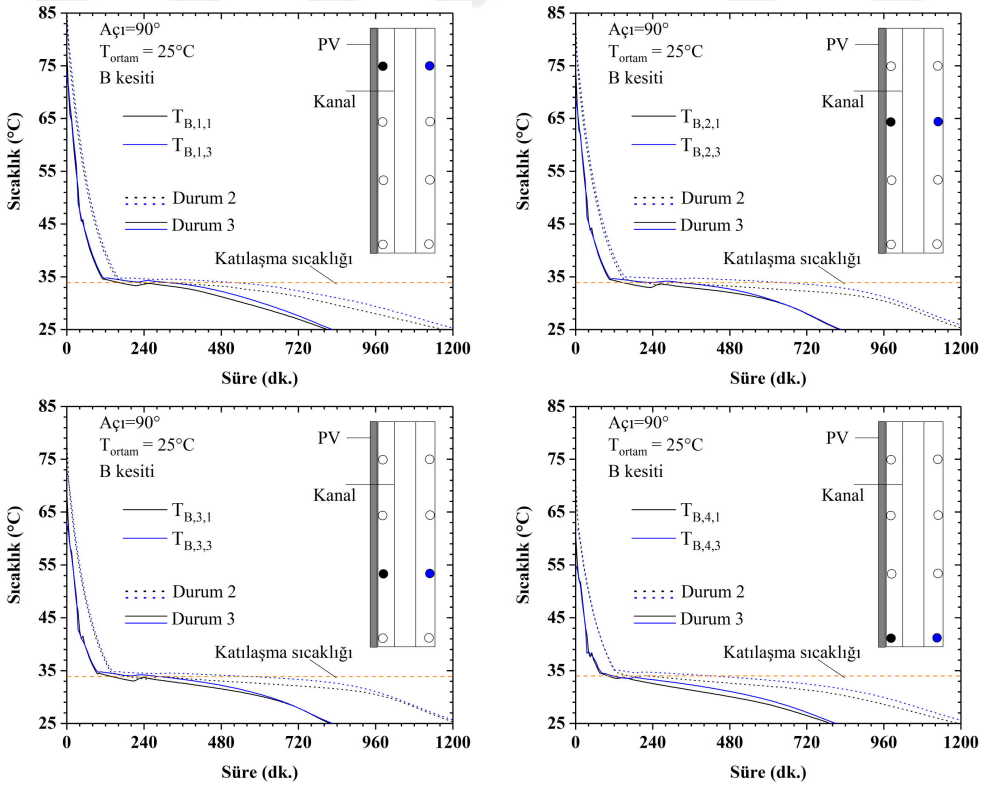
Şekil 84. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



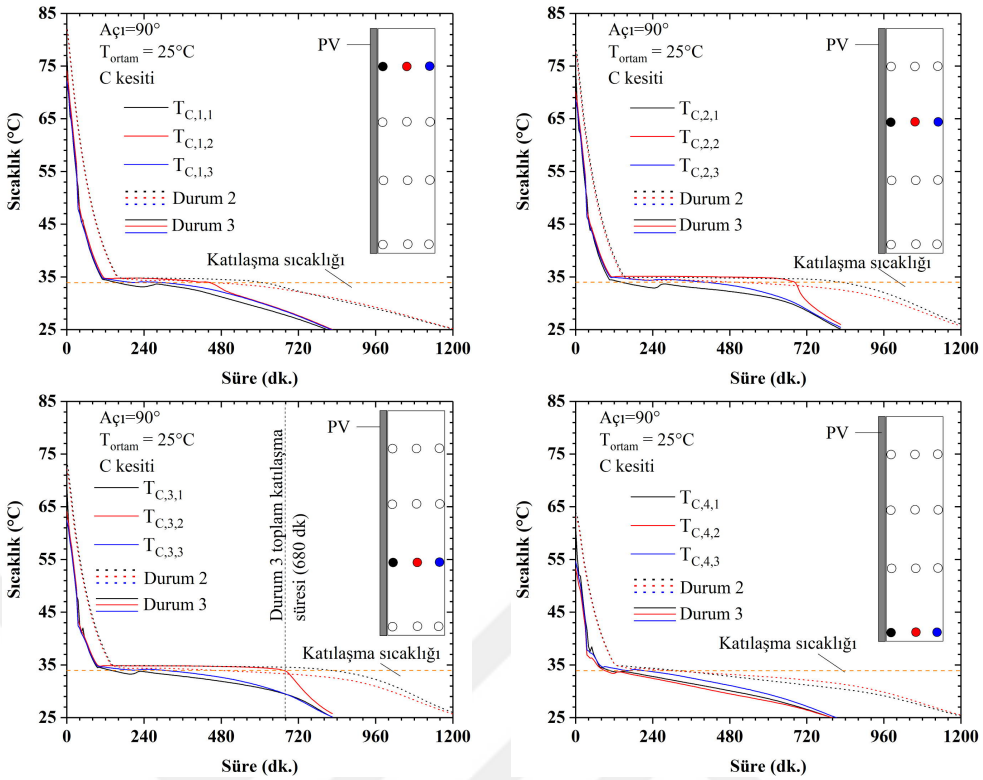
Şekil 85. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



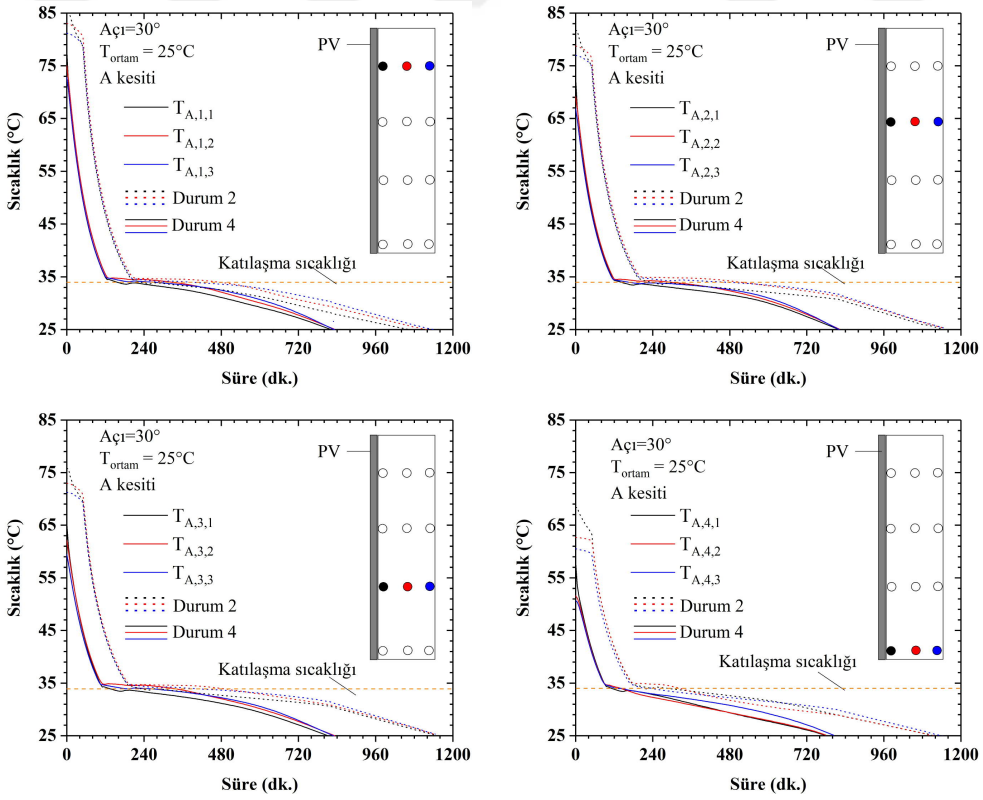
Şekil 86. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



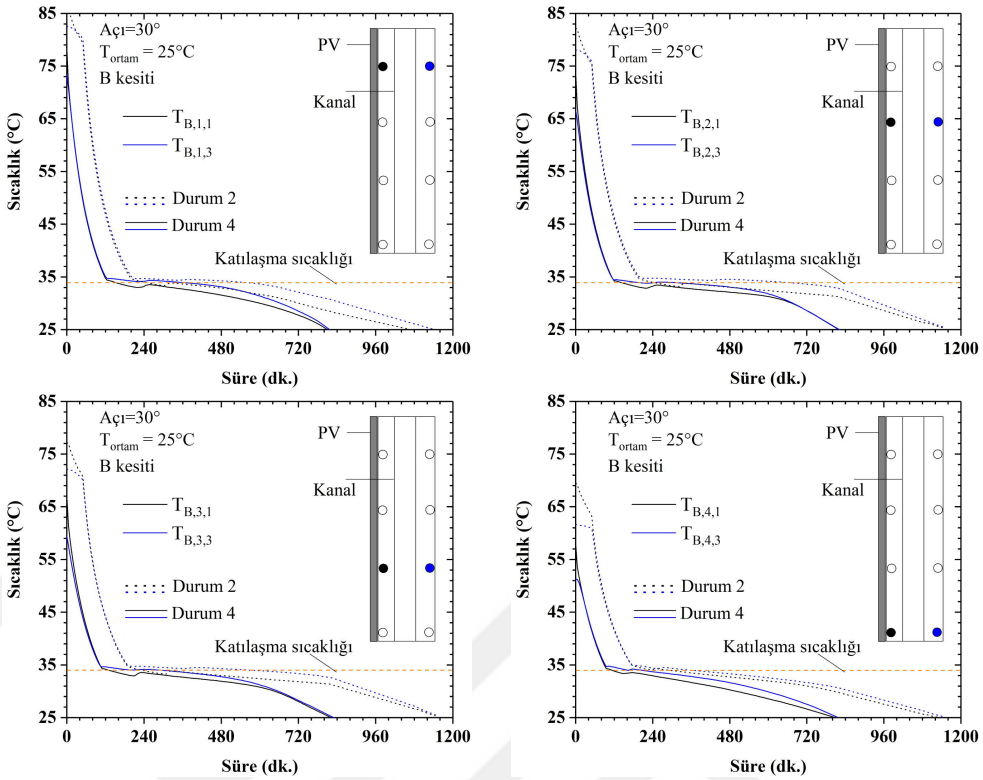
Şekil 87. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



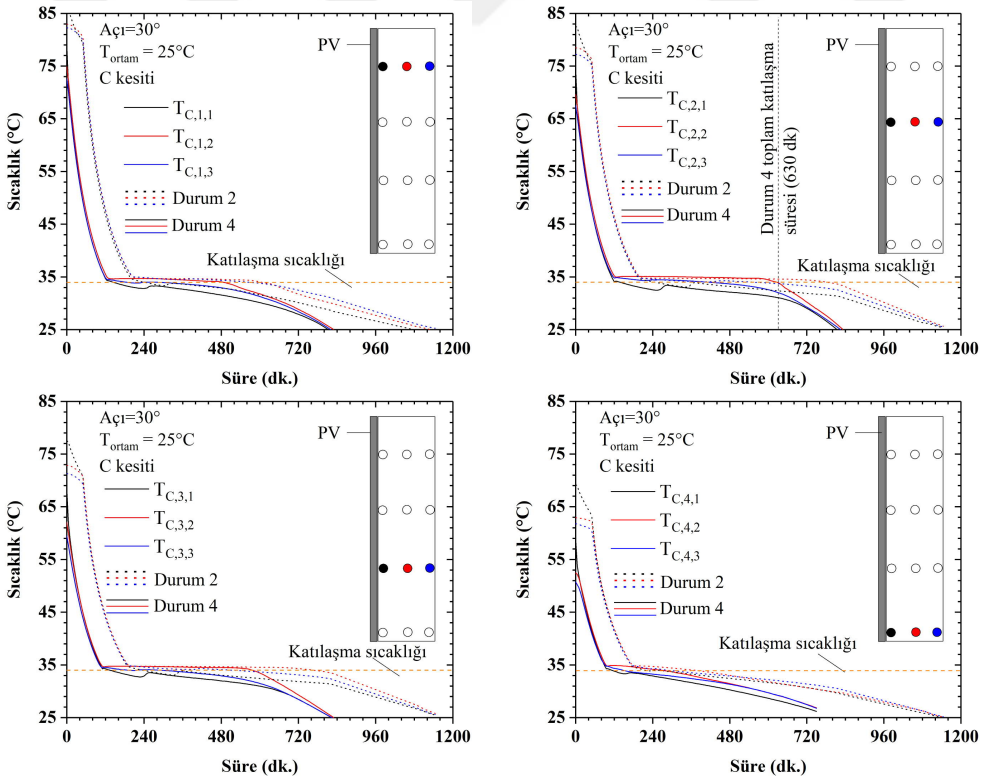
Şekil 88. Durum 3 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



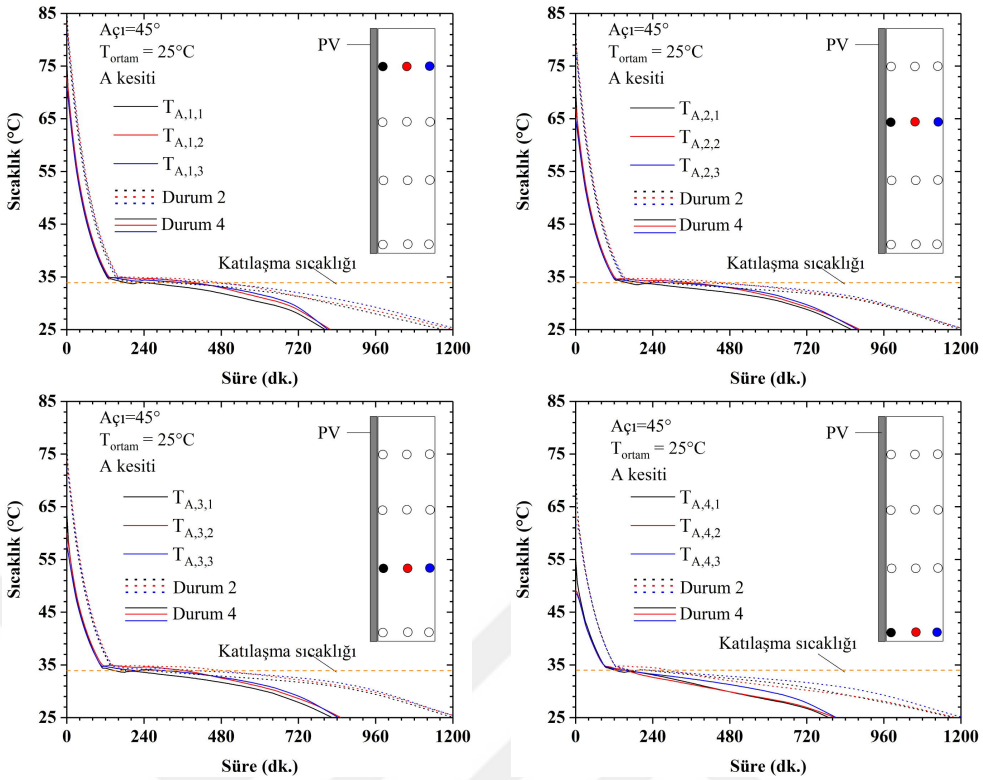
Şekil 89. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



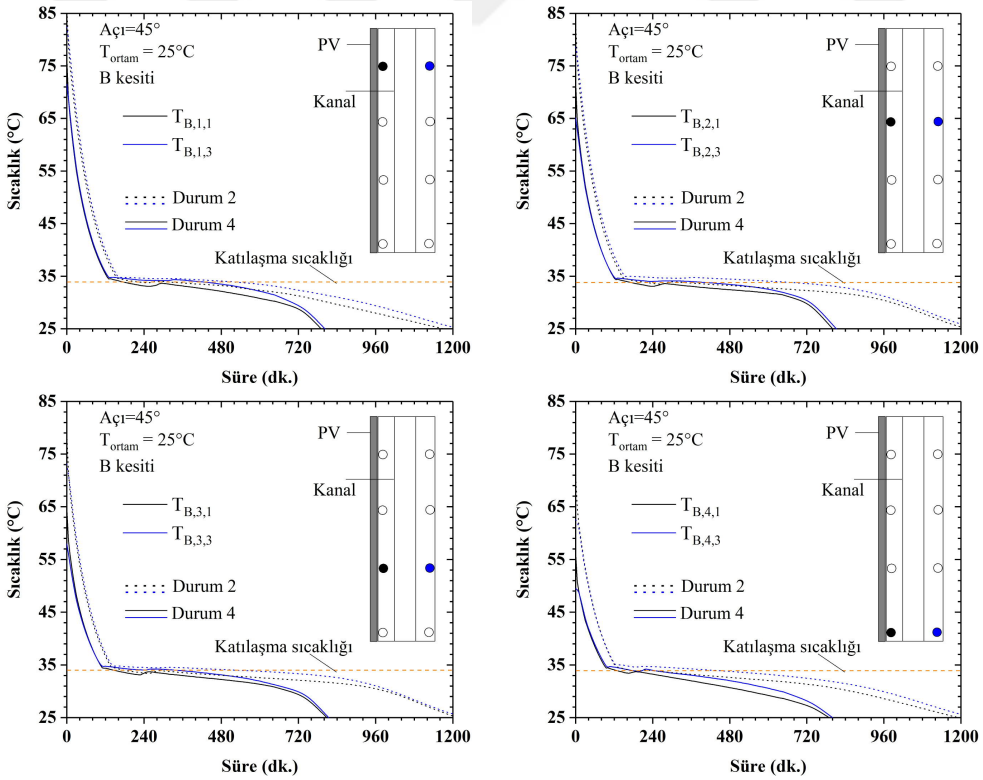
Şekil 90. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



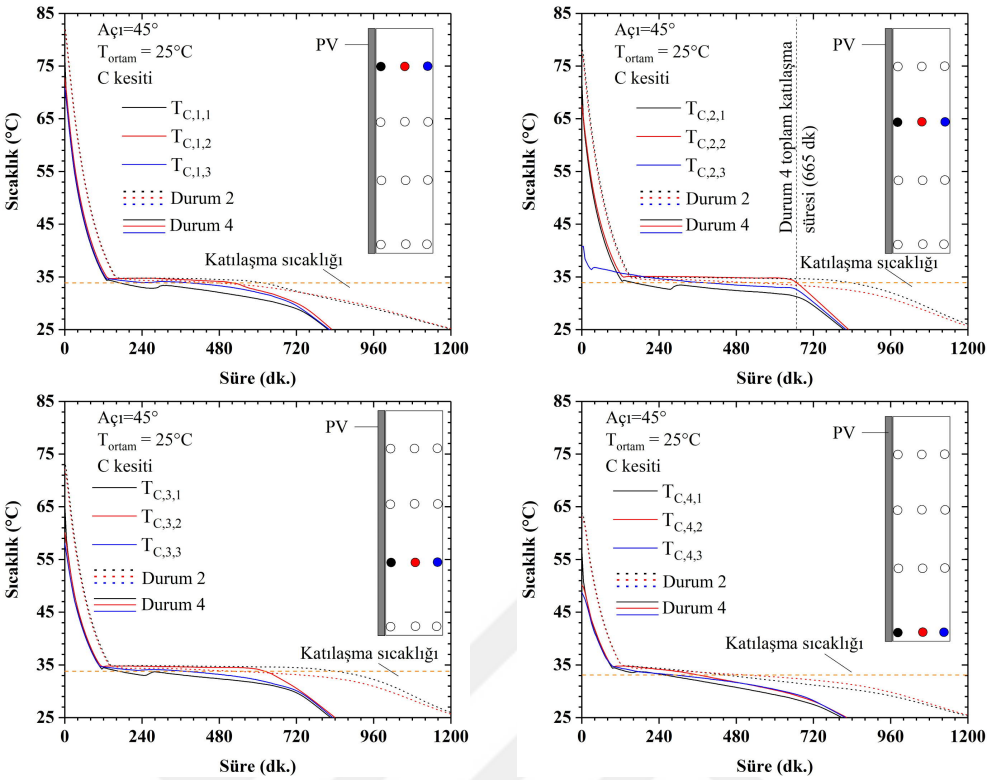
Şekil 91. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



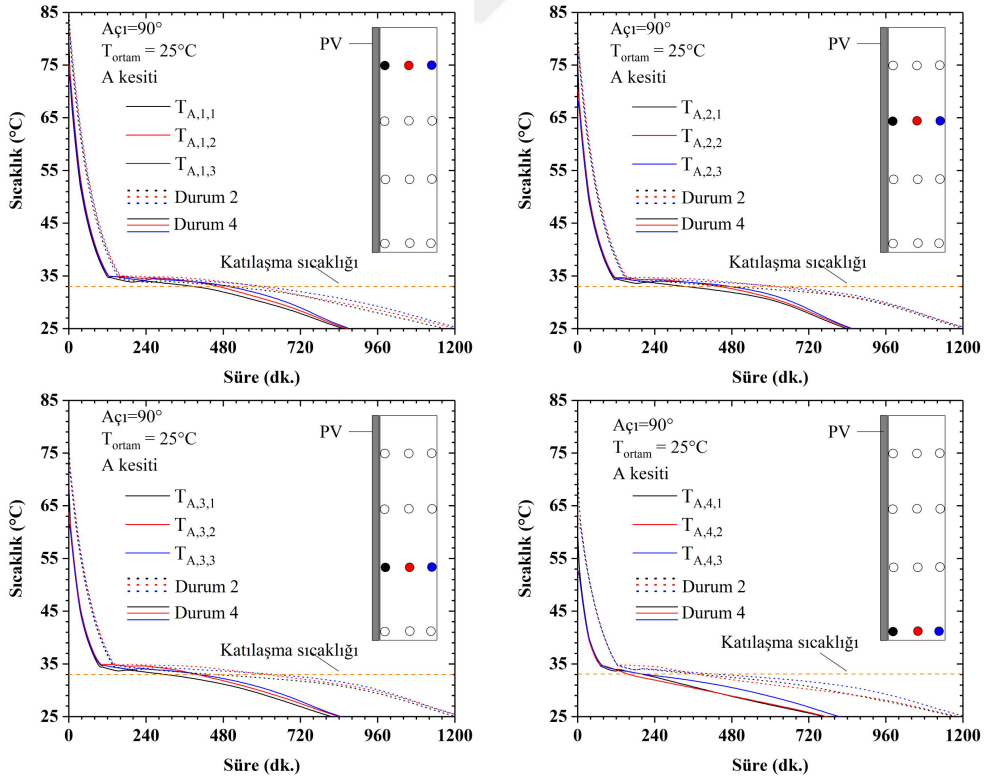
Şekil 92. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



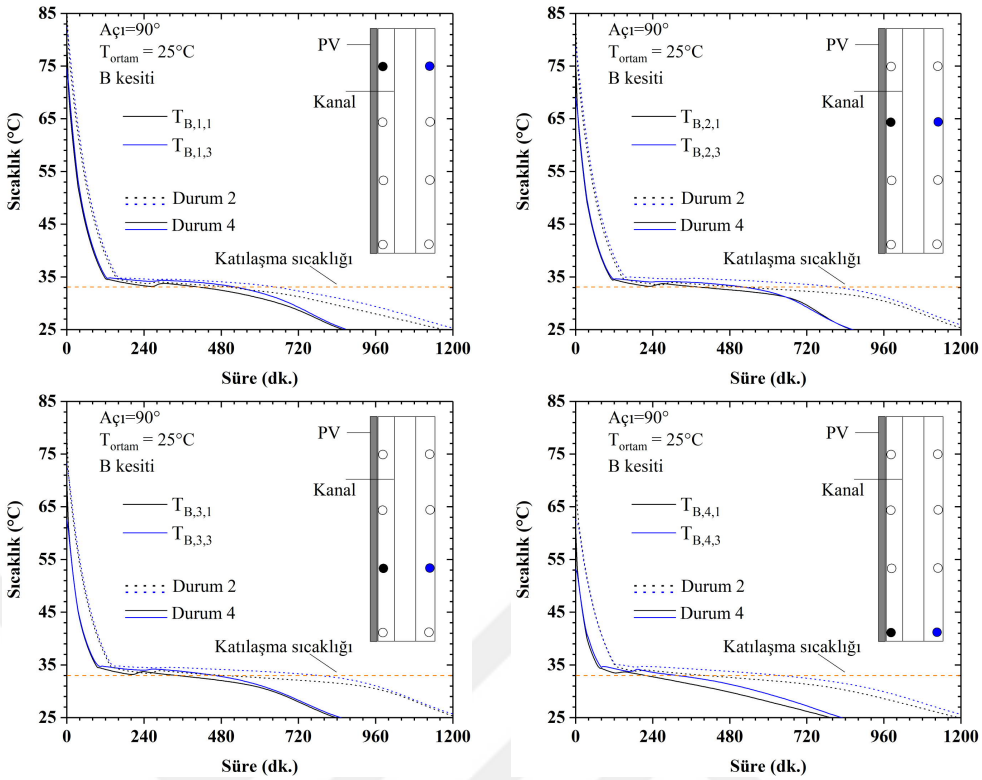
Şekil 93. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



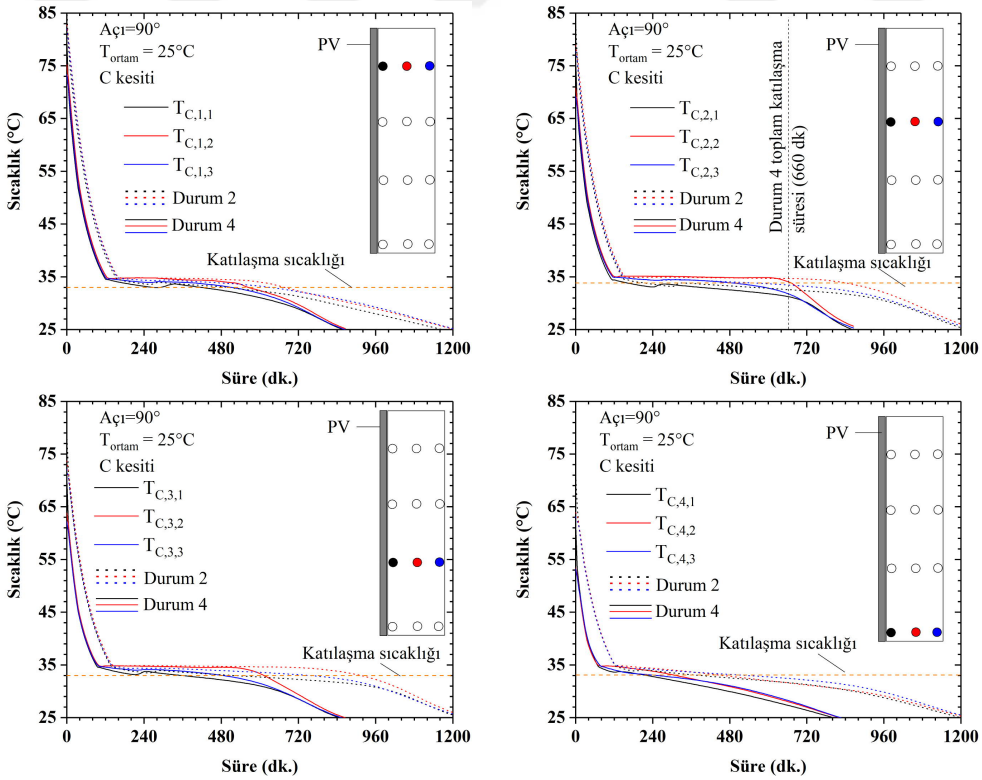
Şekil 94. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



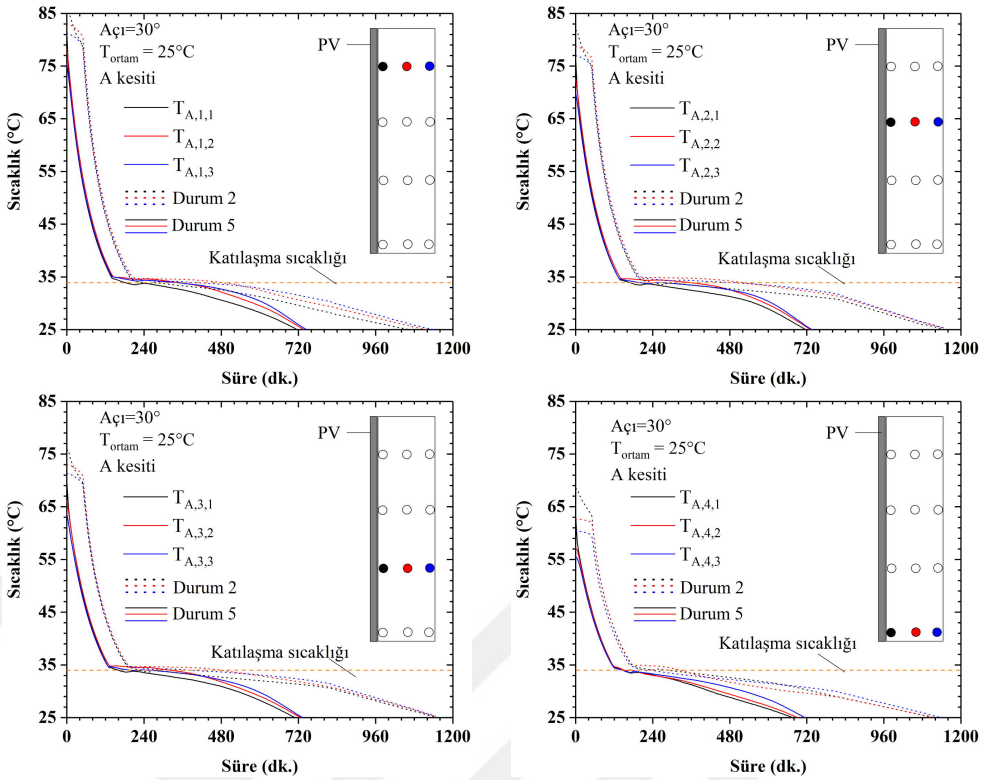
Şekil 95. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



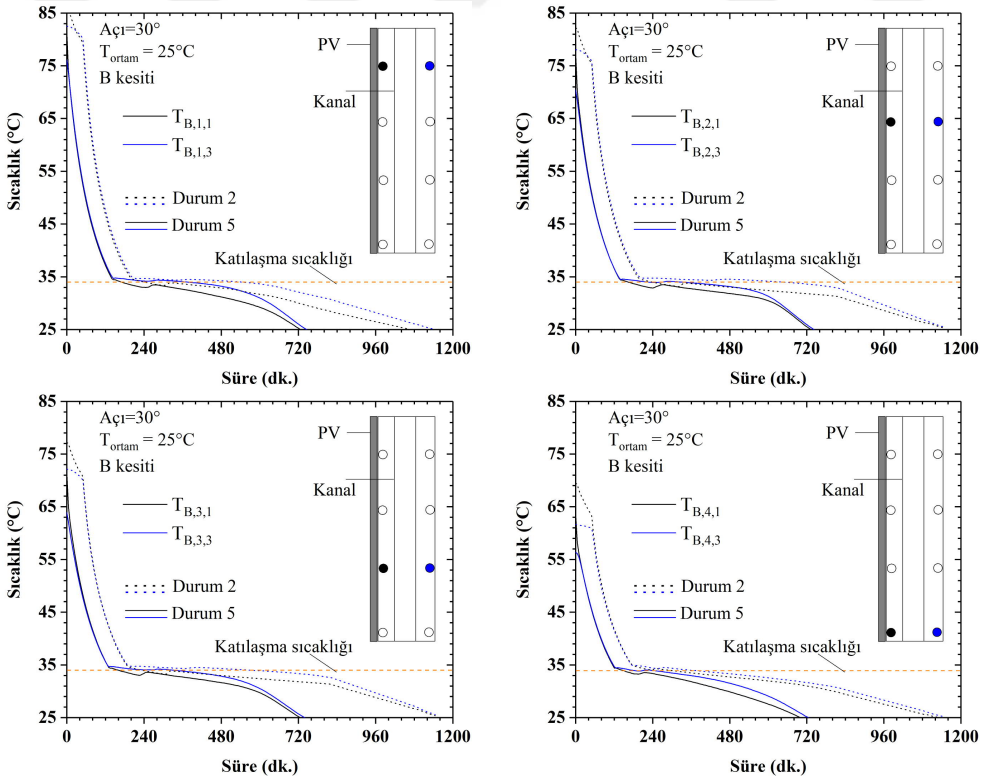
Şekil 96. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



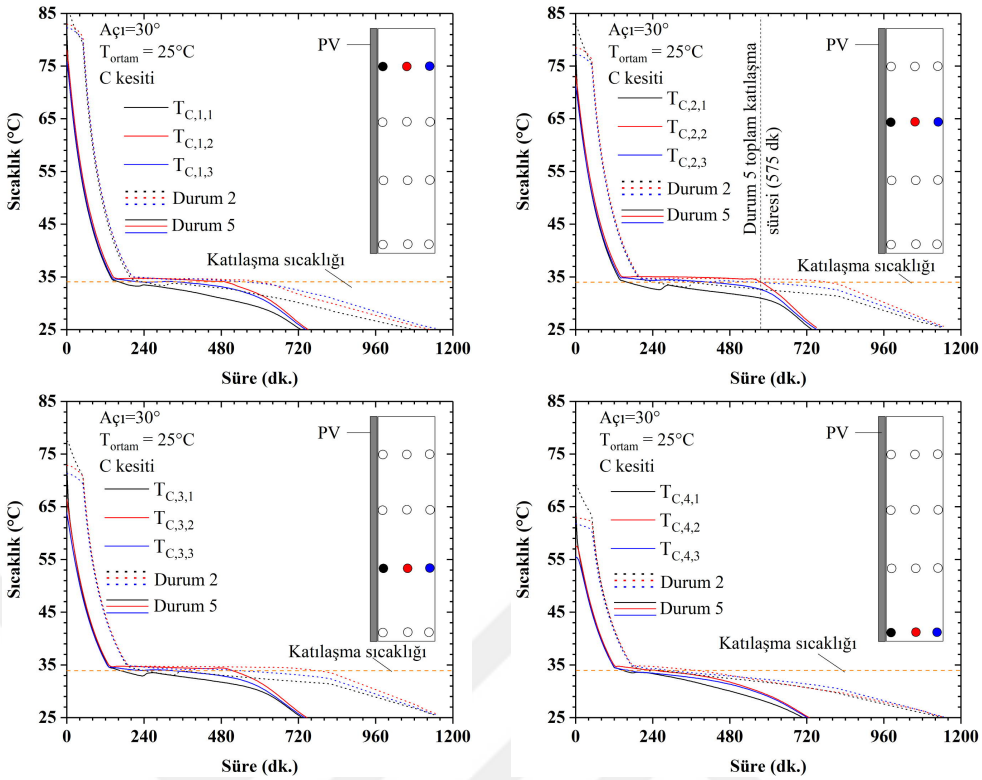
Şekil 97. Durum 4 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



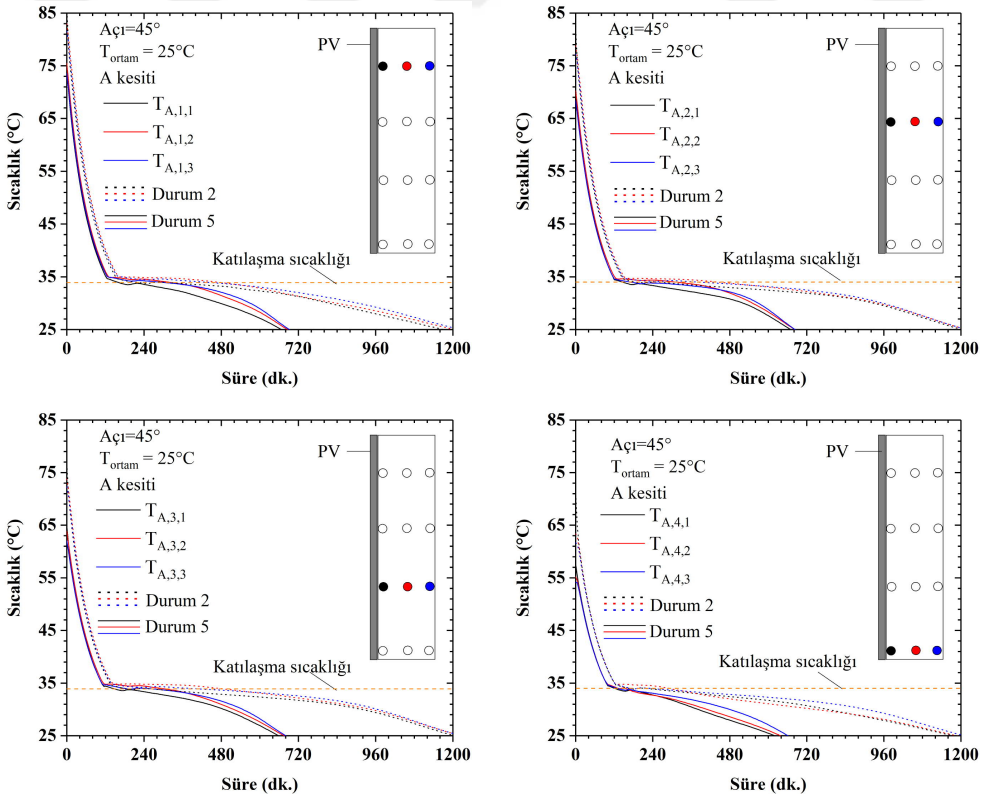
Şekil 98. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



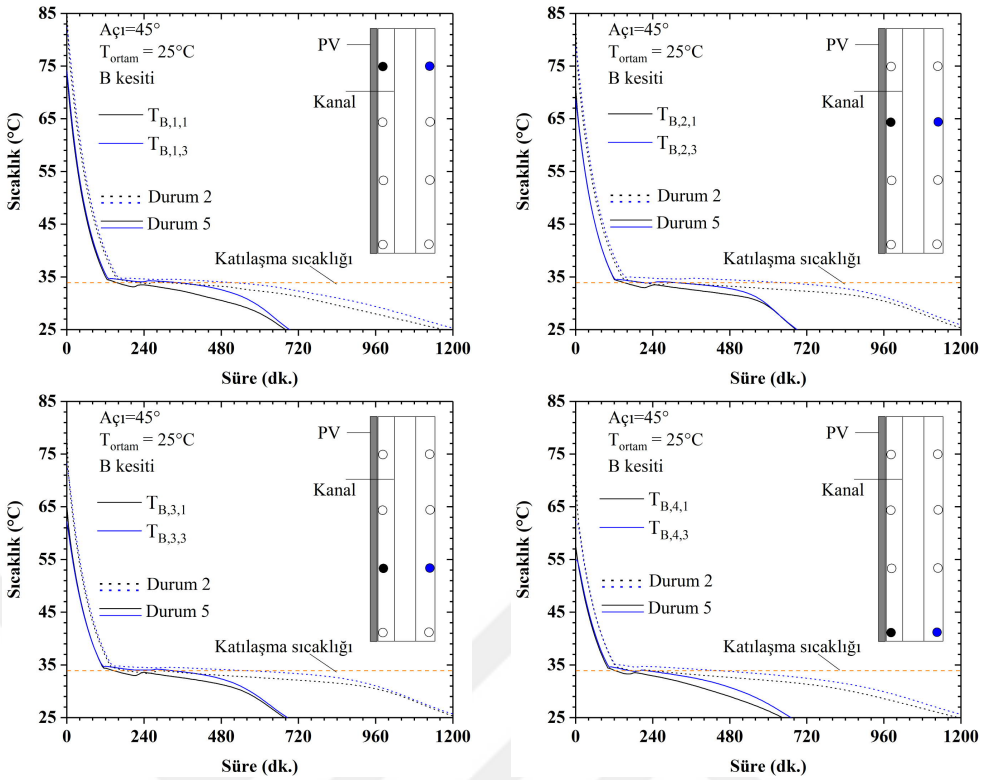
Şekil 99. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



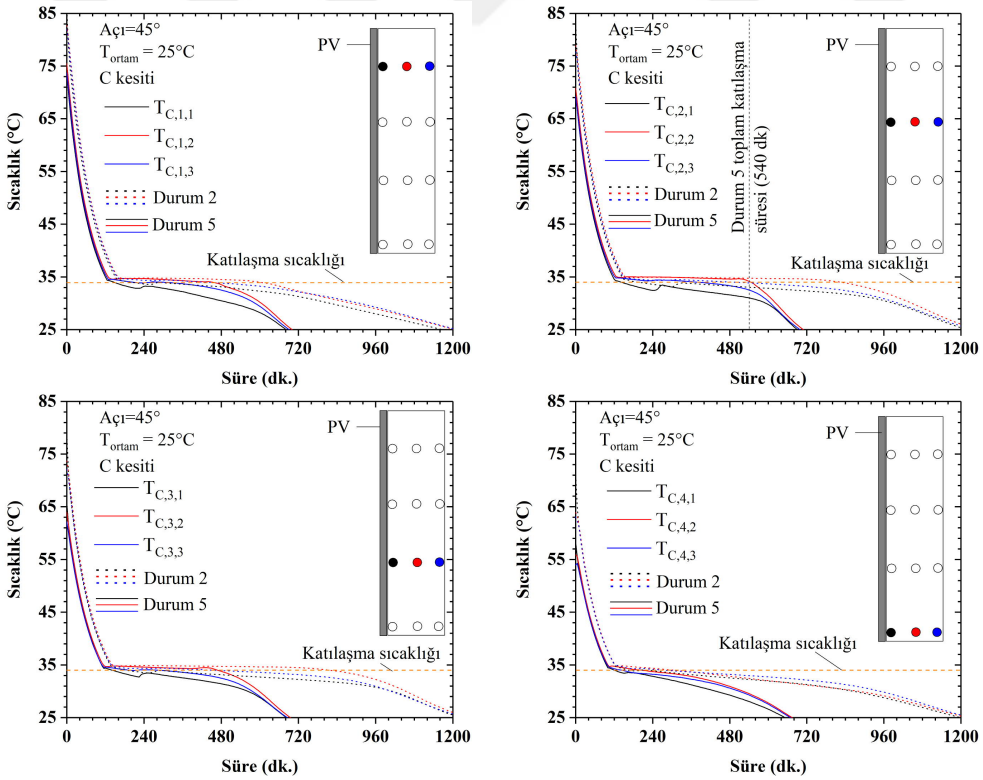
Şekil 100. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 30°, T_{ortam} = 25 °C)



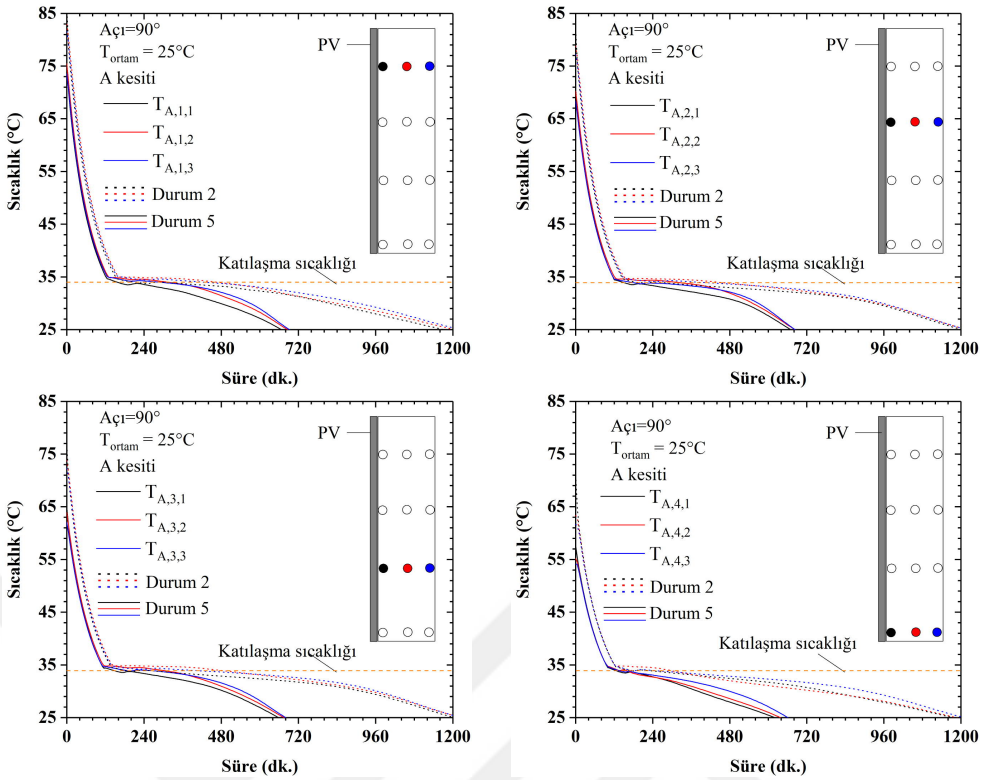
Şekil 101. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



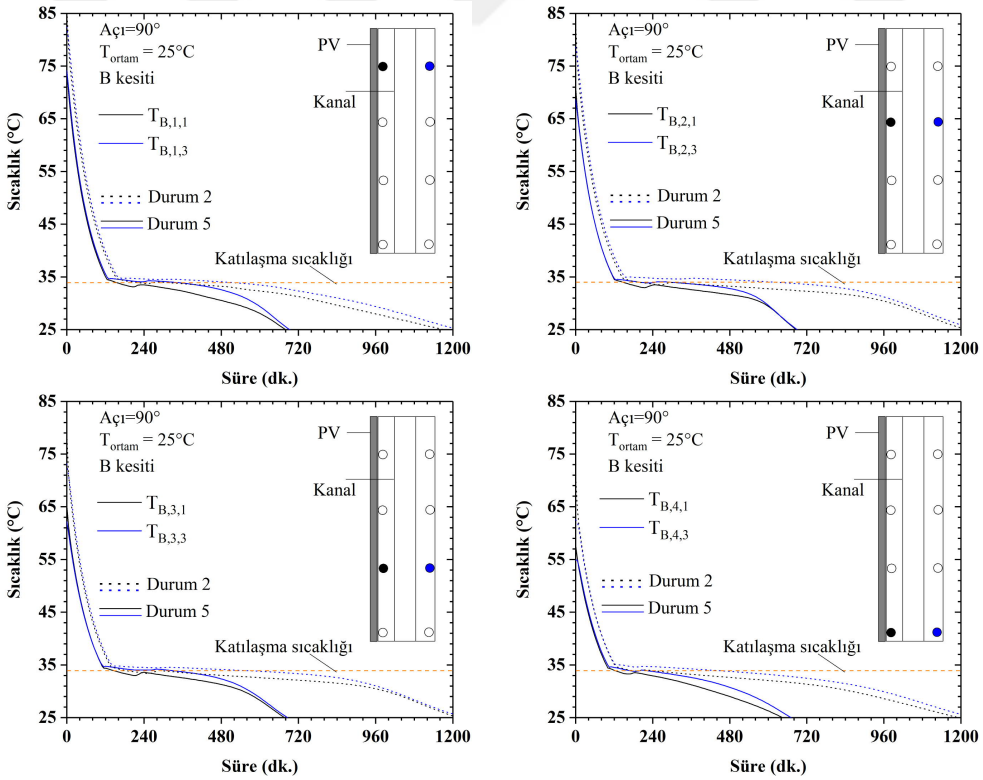
Şekil 102. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



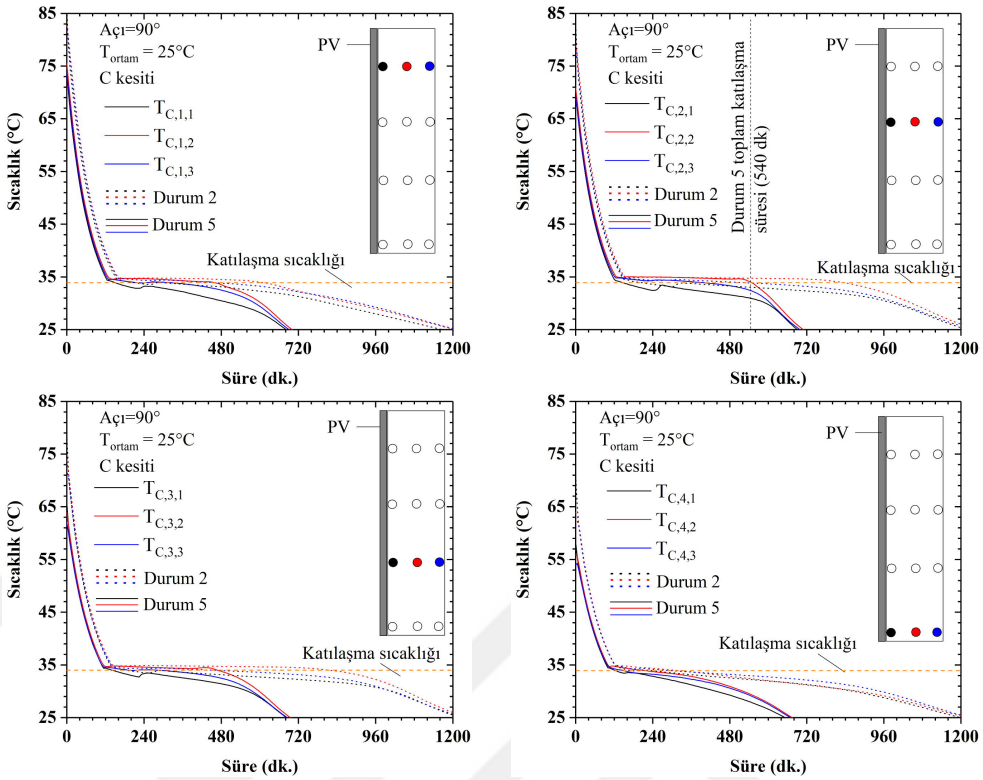
Şekil 103. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 25 °C)



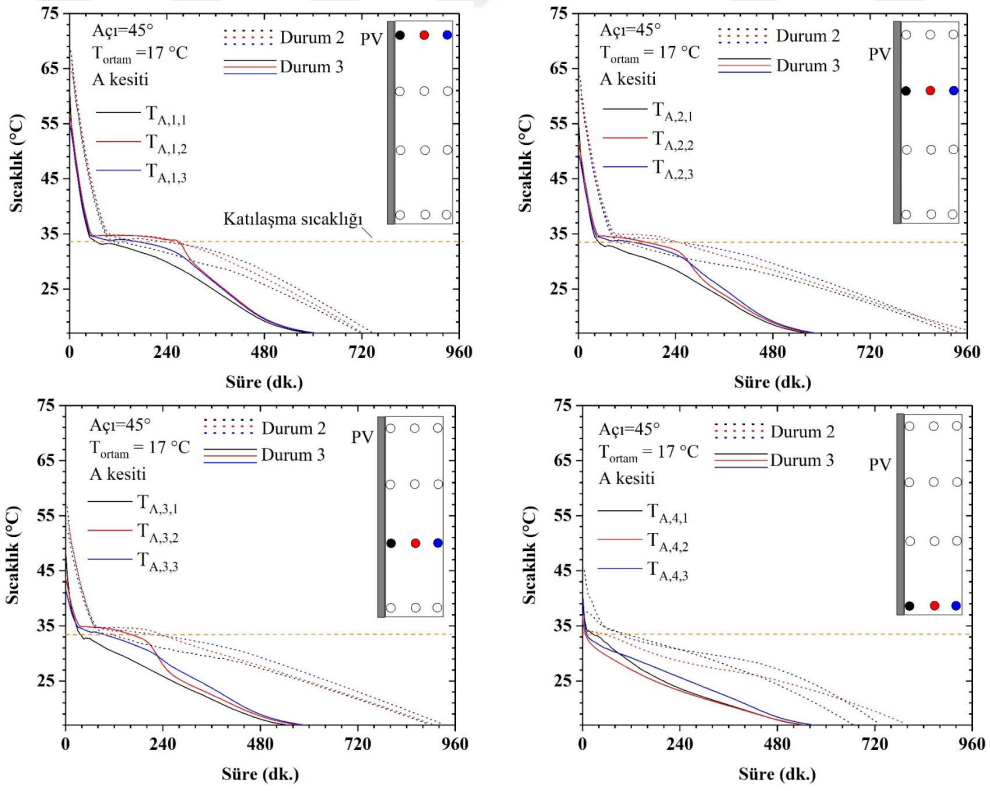
Şekil 104. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



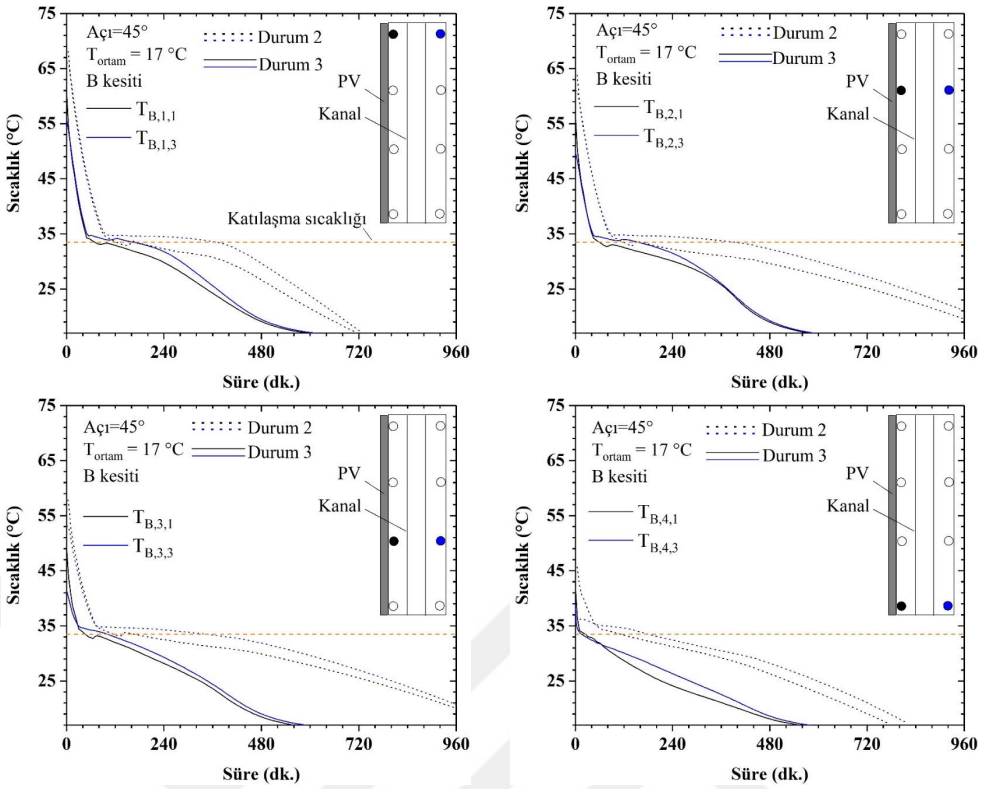
Şekil 105. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



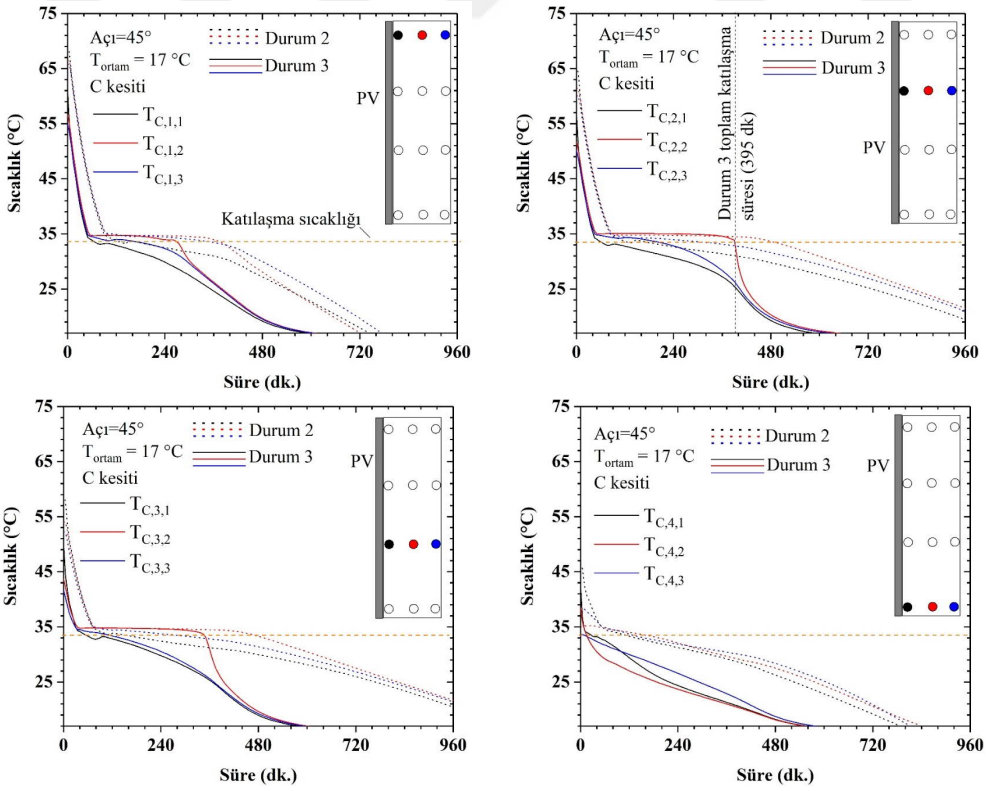
Şekil 106. Durum 5 için deşarj süresi boyunca noktasal FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 90°, T_{ortam} = 25 °C)



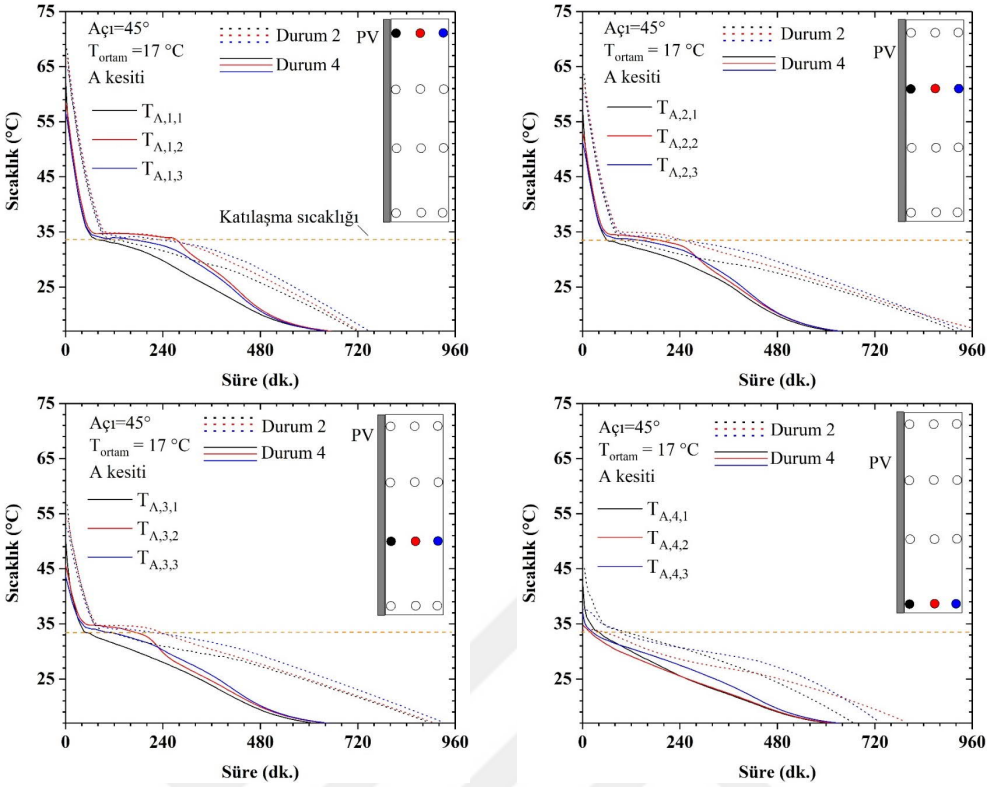
Şekil 107. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



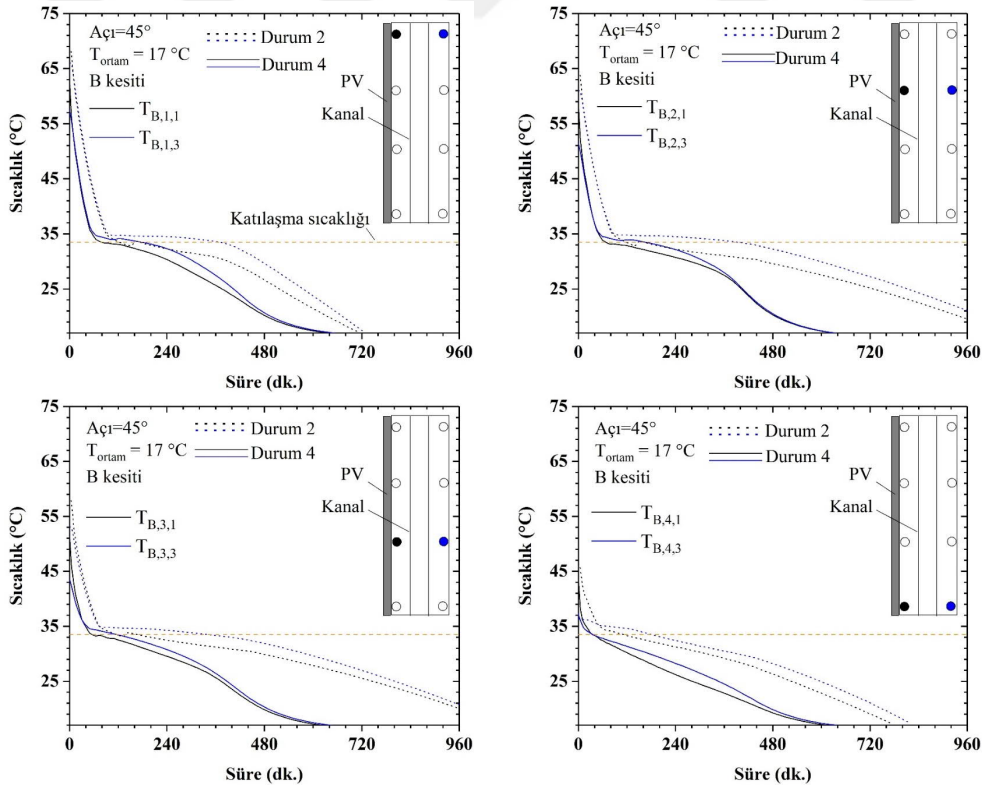
Şekil 108. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



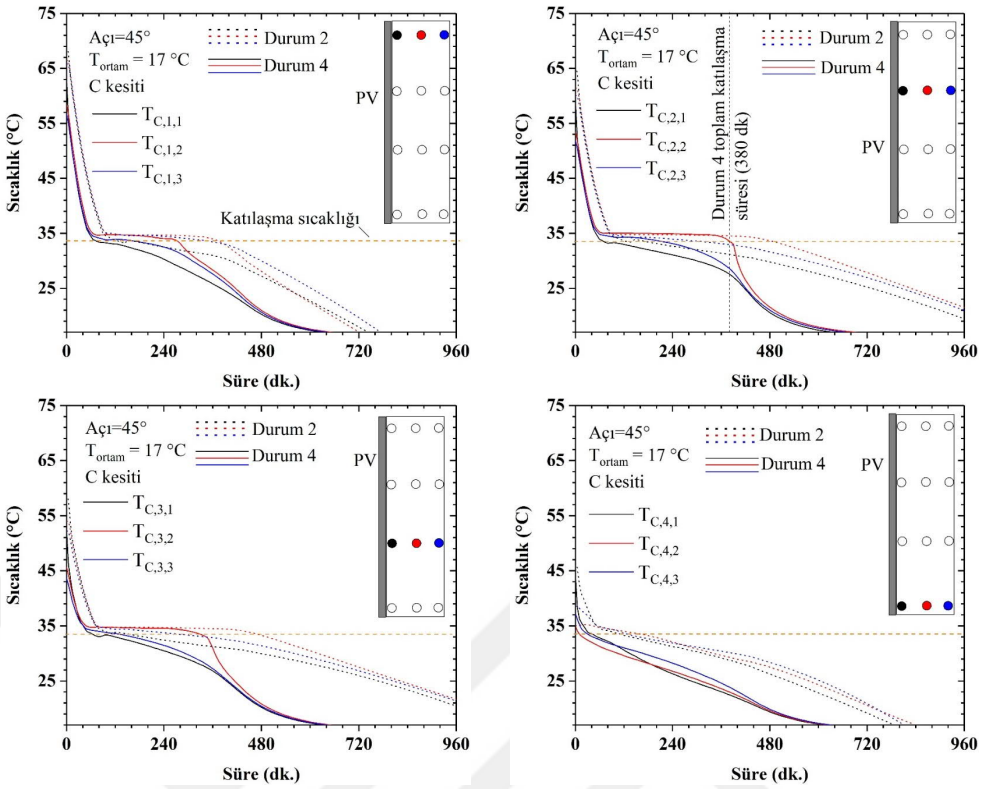
Şekil 109. Durum 3 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



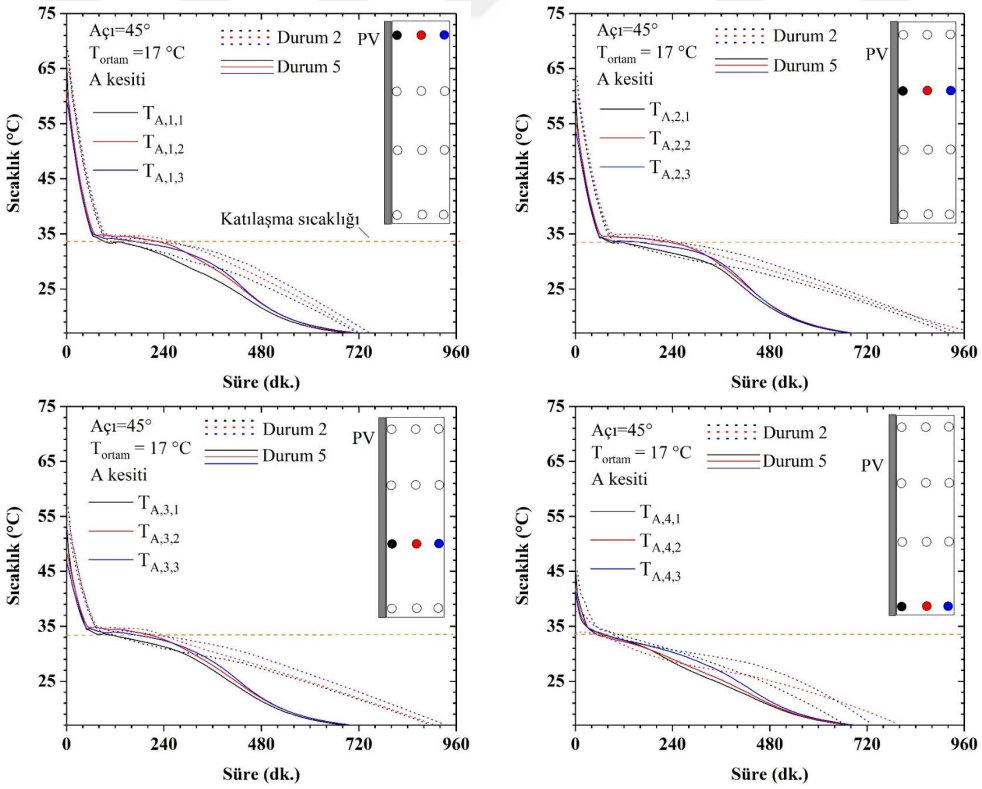
Şekil 110. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



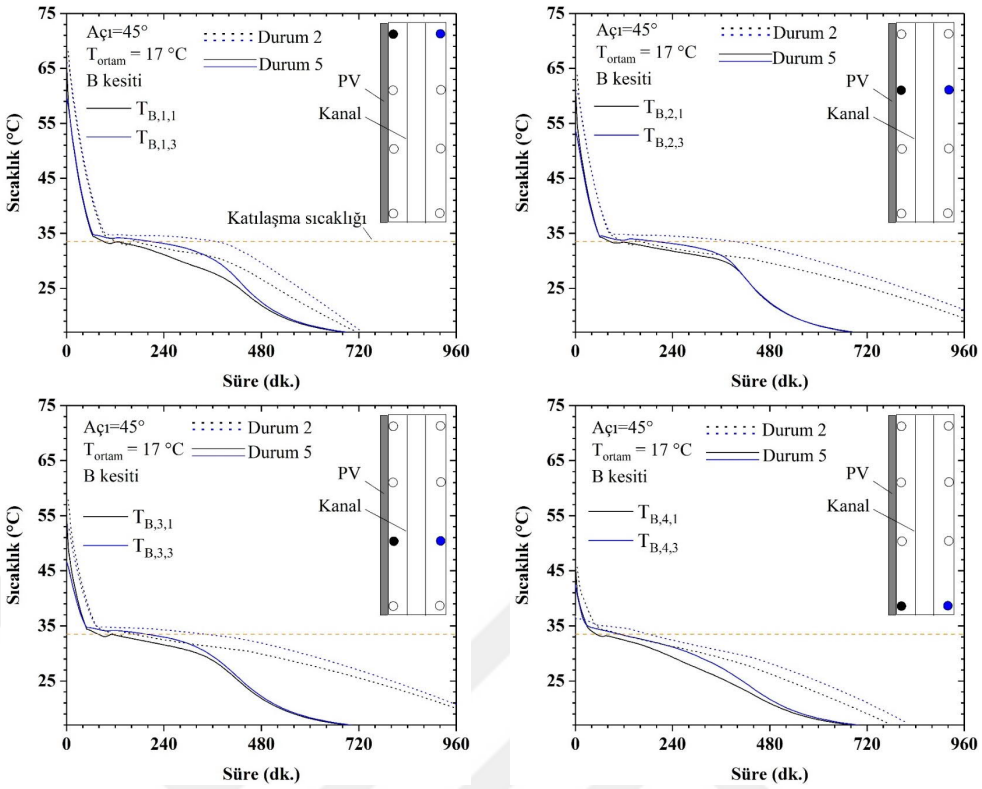
Şekil 111. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



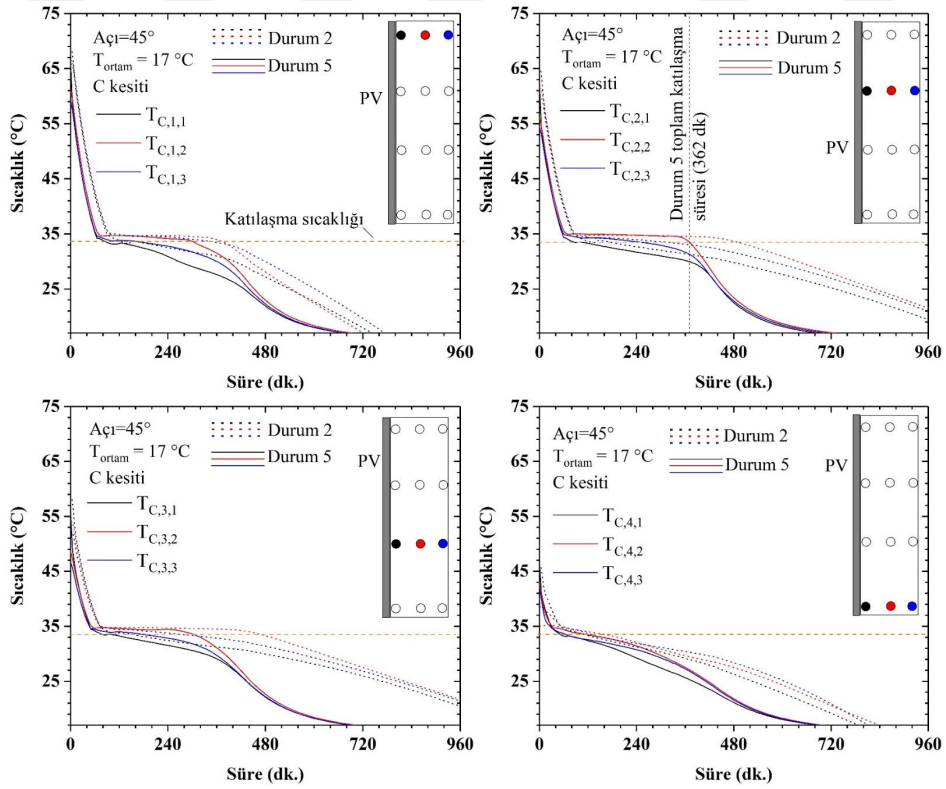
Şekil 112. Durum 4 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



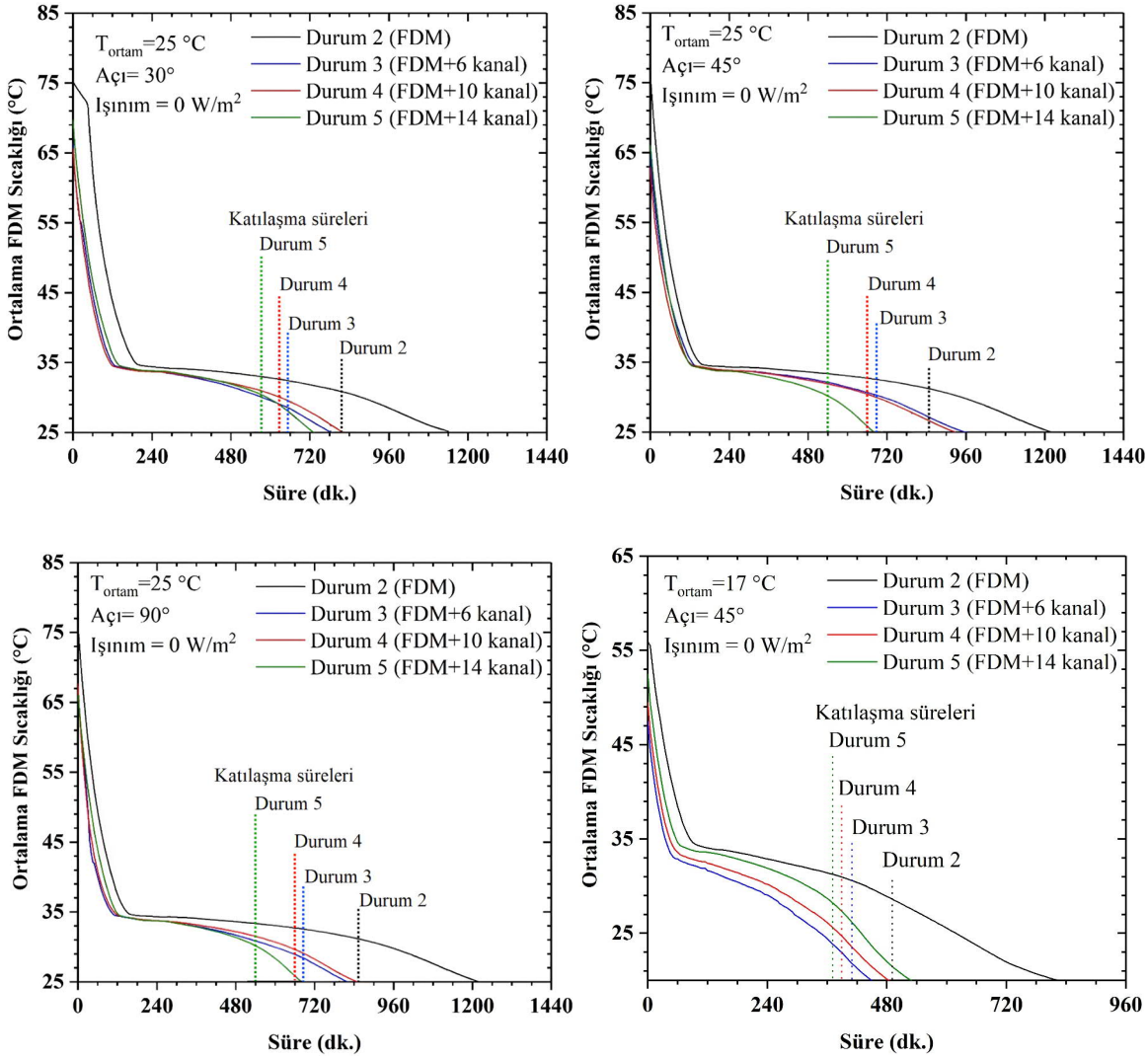
Şekil 113. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (A kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



Şekil 114. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (B kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



Şekil 115. Durum 5 için deşarj süresi boyunca yerel FDM sıcaklık değerleri (C kesiti, yerleşim açısı = 45°, T_{ortam} = 17 °C)



Şekil 116. Deşarj süresi boyunca farklı yerleşim açıları altında ortalama FDM sıcaklığındaki değişim.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, FDM destekli ısı alıcılarının termal regülasyon performansının artırılmasını yönelik deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında Durum 1 (ısı alıcısısız PV panel), Durum 2 (geleneksel PV-FDM sistemi) ve Durum 3, 4 ve 5 (özgün FDM ve hava destekli) olmak üzere 5 farklı sistem düzenlemesi dikkate alınmıştır. Laboratuvar ortamında deneyler 1000 W/m^2 - 25 °C, 750 W/m^2 - 17 °C olmak üzere iki farklı ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı altında gerçekleştirilmiştir. Dikkate alınan sistemlerin sıcaklık ve elektriksel çıktıları zaman bağlı olarak incelenerek, termal davranış ile elektriksel performans arasındaki ilişki detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

Şarj süreci için sonuçlar;

1. PV panellerin sınırlı elektriksel verimleri nedeniyle ışınım enerjisinin elektriğe dönüşemeyen kısmı panel sıcaklığını artırarak güç çıktısını azaltmaktadır. 1000 W/m^2 ışınım ve 25 °C ortam sıcaklığı altında yapılan deneylerde ısı alıcısız PV sıcaklığı (Durum 1) hızlıca yükselerek 68 °C'ye ulaşmakta ve buna bağlı olarak güç çıktısında %18'lik bir azalma meydana gelmektedir.
2. FDM destekli ısı alıcılarının panel arkasına entegre edilmesi (Durum 2-5) PV panelin sıcaklık artışını belirli bir süre önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Bu süreçte FDM faz dönüşümü geçirerek yüksek miktarda gizli ısı depolamakta ve PV panel üzerinde pasif olarak termal regülasyon sağlamaktadır.
3. Şarj sürecinde FDM içerisinde baskın ısı transfer mekanizması başlangıçta iletim ilerleyen süreçte ise doğal taşınımdır. İletimin baskın olduğu süreçte, panel doğrultusunda sıcaklık üniform bir dağılım gösterirken FDM'nin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle PV sıcaklığında sağlanan azalma sınırlı düzeyde kalmaktadır.
4. Isı transfer sürecinin ilerleyen aşamalarında baskın ısı transfer mekanizması doğal taşınımdır. Buna bağlı olarak FDM'nin üst bölgeleri daha hızlı faz dönüşümüne girmekte ve bu bölgelerde daha yüksek yerel sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Doğal taşınım, PV panel ve FDM arasındaki ısı transferine katkı sağlayarak erime tamamlanana kadar panel sıcaklık artışı minimum düzeyde seyretmektedir.

5. Konvansiyonel PCM destekli ısı alıcı (Durum 2) ile PV panel üzerinde sınırlı sürelerde termal regülasyon sağlanmaktadır. Bu süre, erimenin yaklaşık %70 oranda tamamlanmasıyla sona ermekte olup, 1000 W/m^2 ışınım altında bu süre yaklaşık 230 dakika, 750 W/m^2 ışınım altında ise erime hızındaki yavaşlamaya bağlı olarak 260 dakika olarak tespit edilmiştir.
6. FDM destekli ısı içerisinde ek bir soğutma önlemli alınmaması durumunda (Durum 2), panel arkasında oluşan yüksek termal direnç nedeniyle regülasyon sonrası aşırı sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu durum, regülasyon boyunca elektrik üretiminde elde edilen kazancın regülasyon sonrasında giderek kaybolmasına neden olmaktadır.
7. Özgün FDM ve hava destekli ısı alıcılarının (Durum 3-5) kullanımı, PV-FDM sistemlerinin ısıl ve elektriksel performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. FDM içerisine entegre edilen hava kanalları sayesinde şarj süreci boyunca doğal taşınım yoluyla ısı FDM ortamından uzaklaştırılmıştır. Atılan ısı, Durum 2'ye kıyasla daha uzun termal regülasyon süreleri, daha düşük PV sıcaklıkları ve daha yüksek güç çıktıları elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca hava desteği, panel arkasındaki termal direnci azaltarak regülasyon sonrası gözlemlenen aşırı sıcaklık artışını önemli ölçüde minimize etmiş ve deney sonunda elde edilen toplam elektrik enerji kazancını artırmıştır.
8. FDM ve hava destekli ısı alıcılarında kullanılan hava kanallarının çap ve sayısı, FDM katmanından uzaklaştırılan ısı miktarı ve FDM sıcaklığı üzerinde etkili olmuştur. Kanal çapındaki daralma ısı atılımı için gerekli sıcaklık farkını yükseltirken kanal sayısındaki artış daha üniform bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Ayrıca özgün ısı alıcıları içerisindeki erime davranışı, sıcak FDM bölgesi ve kanal yüzey teması ilişkisini etkileyerek ısı atılımı için gerekli şartların oluşumu üzerinde belirleyici rol oynamıştır.
9. En düşük PV panel ve FDM sıcaklığı, dikkate alınan tüm yerleşim açıları altında 10 hava kanalı ve 26 mm kanal çapına sahip ısı alıcı ile (Durum 4) elde edilmiştir. Bu durum, ilgili ısı alıcısının sahip olduğu kanal çapı ve sayı düzenlemesi sayesinde dış ortama daha fazla atmasıyla açıklanmıştır. En düşük soğutma performansı ise Durum 5 ile elde edilmiştir. Bu durum ise ilgili ısı alıcındaki düşük kanal çapı ve yüksek kanal sayısının hava kanalı ve FDM katmanı içerisindeki doğal taşınım mekanizmalarını olumsuz etkilenmesiyle açıklanmıştır.

10. FDM ve hava destekli ısı alıcıları yüksek ışınım ve ortam sıcaklığı altında (1000 W/m^2, 25 °C) PV sıcaklığı üzerinde daha etkili sonuçlar sunmuştur. Durum 4 ile 30, 45 ve 90° açılar için sırasıyla deney boyunca ortalama PV sıcaklığında 6,5 °C 8,5 °C ve 6,9 °C azalma sağlanırken termal regülasyon süresinde %25,3, %45,6 ve %25,5 uzama elde edilmiştir. Ayrıca Durum 4'le regülasyon sonrası erişilen maksimum sıcaklıkta sırasıyla 9 °C, 10,5 °C ve 9,5 °C azalma sağlanmış ve bu sayede deney süresi sonunda elektriksel güç kazanımı sırasıyla %3, %4,4 ve %3,5 oranlarına yükseltilmiştir.

Deşarj süreci için sonuçlar:

1. Deşarj süreci boyunca FDM içerisindeki baskın ısı transfer mekanizması, FDM erime sıcaklığına ulaşıncaya kadar taşınım, ardından katılaşma süreci boyunca iletimdir.
2. İlk soğuma sürecinde doğal taşınım hareketine bağlı olarak FDM'nin alt ve üst kısımları arasında sıcaklık gradyanı oluşmaktadır. Sıcaklık gradyanının etkisiyle FDM katmanının alt kısımları katılaşma sürecine daha erken girmektedir. Ardından katılaşma tüm dış yüzeylerden FDM'nin merkezine doğru ilerleme göstermektedir.
3. Yüzeyde katı FDM kalınlığının artmasıyla dış yüzeylerde termal direnç yükselmektedir. Bu durum, FDM'nin iç kısımlarında depolanmış gizli ısının uzaklaştırılmasını güçleştirmekte ve uzun katılaşma sürelerinin oluşmasına neden olmaktadır.
4. Konvansiyonel PV-FDM sistemi (Durum 2) için ısı transferinin sınırlı yüzeyden gerçekleşmesi ve FDM içerisindeki düşük ısıl iletkenlik nedeniyle toplam katılaşma süresi 25 °C ortam sıcaklığı altında yaklaşık 14 saat olarak tespit edilmiştir.
5. Faz dönüşüm sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki farkın katılaşma süresi üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ortam sıcaklığının 17 °C'ye düşmesiyle altında Durum 2 için katılaşma süresi 8,3 saate gerilemiştir.
6. FDM ve hava destekli ısı alıcılar içerisindeki hava kanalları, FDM katmanı içerisinde ek ısı transfer yüzeyiyle depolanan ısının daha hızlı bir şekilde sistemden uzaklaştırılmasını sağlayarak toplam katılaşma süresini kısaltmıştır. Ayrıca hava kanalları için kullanılan malzeme (bakır borular) FDM katmanı içerisinde ısıl iletkenliği güçlendirerek katılaşma sürecine katkı sağlamıştır.

7. İncelenen tüm durumlar içerisinde en kısa katılaşma süresi 22 mm kanal çapına ve 14 hava kanalına sahip Durum 5 ile elde edilmiştir. Bu durum, ilgili ısı alıcının FDM içerisinde en yüksek ısı transfer yüzeyini sunmasıyla açıklanmıştır. Durum 5 ile toplam katılaşma süresi 25 °C ve 17 °C ortam sıcaklıkları için sırasıyla 9 ve 6 saat olarak tespit edilmiş olup Durum 2'ye kıyasla bu süre sırasıyla %36 ve %26 azalmıştır. Bu oran, Durum 4 ve Durum 3 için ise sırasıyla yaklaşık %22 ve %20 olarak tespit edilmiştir.
8. Katılaşma sürecinde iletimin baskın olması nedeniyle incelenen tüm durumlar için farklı yerleşim açıları altında benzer katılaşma davranışı ve benzer toplam katılaşma süreleri elde edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Yürütülen deneysel çalışma ile PV-FDM sistemlerinin ısıl ve elektriksel davranışları incelenmiş ve sistem performansına etkiyen parametreler belirlenmiştir. Yapılan deneylerle ortaya konan sonuçlar üzerinden, gelecek çalışmalar için şu öneriler yapılabilir:

1. Özgün ısı alıcılarında kullanılan hava kanalların konumlarının değiştirilmesi (PV panele yaklaştırılması veya doğrudan temas ettirilmesi) yönünde geometrik düzenlemeler yapılabilir. Bu sayede hava kanallarından ısının, erime sürecinin daha erken aşamalarında uzaklaştırılması sağlanarak sistem performansı artırılabilir.
2. Hava kanalı entegrasyonuna ek olarak, FDM'nin ısıl iletkenliğinin artırılmasına yönelik, metal köpük, kanatçık veya nanoparçacık gibi metal ilavesine yönelik uygulamalar yapılabilir. FDM içerisine metal ilavesi ve hava desteğinin birleşimi ile termal regülasyon süreleri kısaltılmadan PV sıcaklıklarında azalma sağlanabilir.
3. Çalışma kapsamında en iyi performansı sunan ısı alıcı ile (Durum 4), Türkiye içerisinde güneş potansiyeli yüksek olan bir bölgede dış ortam deneyleri gerçekleştirilebilir. Bir yıllık genel performansın elde edilmesiyle, önerilen sistemlere ait geri dönüş süreleri hesaplanabilir.
4. Çalışma kapsamında incelenen sistemlerin sayısal analizi üzerine bir çalışma yürütülerek, dış ortama atılan ısı miktarı gibi deneysel çalışma kapsamında net olarak belirlenemeyen faydalı veriler elde edilebilir.
5. Farklı FDM türleri ve farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM'ler ile deneyler gerçekleştirilerek ilgili parametrelerin ısıl ve elektriksel performansa etkisi araştırılabilir.
6. Fan desteği ile hava kanallarından zorlanmış taşınım ile ısı transferi sağlanabilir. Bu uygulama ile atılan ısının sağladığı elektrik kazancı ve fan tarafından harcanan enerji arasındaki ilişki üzerine bir çalışma yürütülebilir.
7. Önerilen FDM ve hava destekli ısı alıcıların farklı tür PV panellere uygulanması üzerine bir çalışma yürütülebilir.

6. KAYNAKLAR

Abdelrahman, H.E., Wahba, M.H., Refaey, H.A., Moawad, M., & Berbish, N.S. (2019). Performance enhancement of photovoltaic cells by changing configuration and using PCM (RT35HC) with nanoparticles Al_2O_3. *Solar Energy*, 177, 665–671.

Abdulmunem, A.R. & Jalil, J.M. (2018). Indoor investigation and numerical analysis of PV cells temperature regulation using coupled PCM/Fins. *International Journal of Heat*

Adibpour, S., Raisi, A., Ghasemi, B., Sajadi, A.R., & Rosengarten, G. (2021). Experimental investigation of the performance of a sun tracking photovoltaic panel with Phase Change Material. *Renewable Energy*, 165, 321–333.

Al-Lami, H., Al-Mayyahi, N.N., Al-Yasiri, Q., Ali, R., & Alshara, A. (2022). Performance enhancement of photovoltaic module using finned phase change material panel: An experimental study under Iraq hot climate conditions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44, 6886–6897.

Al-Najjar, H., Mahdi, J., Bokov, D., Khedher, N., Alshammari, N., Catalan Opulencia, M., Fagiry, M., Yaïci, W., & Talebizadehsardari, P. (2022). Improving the Melting Duration of a PV/PCM System Integrated with Different Metal Foam Configurations for Thermal Energy Management. *Nanomaterials*, 12, 423.

Al-Waeli, A.H.A., Sopian, K., Chaichan, M.T., Kazem, H.A., Ibrahim, A., Mat, S., & Ruslan, M.H. (2017). Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*, 151, 693–708.

Ali, H.M. (2020). Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review. *Solar Energy*, 197, 163–198.

Alkhalidi, A., & Dulaimi, N. (2018). Design of an Off-Grid Solar PV System for a Rural Shelter. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24352.07689

Alzaabi, A.A., Badawiyeh, N.K., Hantoush, H.O., & Hamid, A.K. (2014). Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3 (4), 385-389.

Aneli, S., Arena, R., & Gagliano, A. (2021). Numerical Simulations of a PV Module with Phase Change Material (PV-PCM) under Variable Weather Conditions. *International Journal of Heat and Technology*, 39, 643–652.

Atkin, P., & Farid, M.M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217–228.

Avci, M., & Yazici, M.Y. (2018). An experimental study on effect of inclination angle on the performance of a PCM-based flat-type heat sink. *Applied Thermal Engineering*,

131, 806–814.

Bagheritabar, M., Bagheitabar, H., Kashani, M.M.R., & Khodashenas, N.S. (2018). Photovoltaic systems with rotational panels to harvest natural and artificial light for electrical production. *5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering,* (ICEEE). IEEE, ss. 211–214.

Bahaidarah, H.M.S. (2016). Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics. *Solar Energy,* 135, 605–617.

Barthwal, M., & Rakshit, D. (2022). No fins attached? Numerical analysis of internal–external fins coupled PCM melting for solar applications. *Applied Thermal Engineering,* 215, 118911.

Bayrak, F., Ertürk, G., & Oztop, H.F. (2017). Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production,* 164, 58–69.

Bekhet, H.A., Matar, A., & Yasmin, T. (2017). CO_2 emissions, energy consumption, economic growth, and financial development in GCC countries: Dynamic simultaneous equation models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 70, 117–132.

Bestas, S., Aktas, I.S., & Bayrak, F. (2024). A bibliometric and performance evaluation of nano-PCM-integrated photovoltaic panels: Energy, exergy, environmental and sustainability perspectives. *Renewable Energy,* 226, 120383.

Bhattacharyya, S.C. (2012). Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis. *Energy for Sustainable Development,* 16, 260–271.

Bria, A., Raillani, B., Chaatouf, D., Salhi, M., Amraqui, S., & Mezrhab, A. (2023). Effect of PCM thickness on the performance of the finned PV/PCM system. *Materials Today: Proceedings,* 72, 3617–3625.

Chaibi, Y., Allouhi, A., Malvoni, M., Salhi, M., & Saadani, R. (2019). Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models. *Solar Energy,* 188, 1102–1110.

Charles Divyateja, B., Unnikrishnan, K.S., & Rohinikumar, B. (2021). Modelling and Numerical simulation of Nano-enhanced PV-PCM System for Heat Transfer Augmentation from the Panel. *Journal of Physics: Conference Series,* 2054, 012051.

Darkwa, J., Calautit, J., Du, D., & Kokogianakis, G. (2019). A numerical and experimental analysis of an integrated TEG-PCM power enhancement system for photovoltaic cells. *Applied Energy,* 248, 688–701.

Díaz, F.A., Moraga, N.O., & Cabrales, R.C. (2022). Computational modeling of a PV-PCM passive cooling system during a day–night cycle at arid and semi-arid climate zones. *Energy Conversion and Management,* 270, 116202.

Duan, J. (2021). The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel. *Renewable Energy*, 180, 1315–1332.

Eltbaakh, Y.A., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Othman, M.Y., Sopian, K., & Fadhel, M.I. (2011). Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1403–1426.

Esen, V., Sağlam, Ş., & Oral, B. (2017). Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1240–1250.

Fabbri, G., & Greppi, M. (2021). Numerical modeling of a new integrated PV-TE cooling system and support. *Results in Engineering*, 11, 100240.

Fayaz, H., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M., Nasrin, R., & Rivai, A. (2019). Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM. *Renewable Energy*, 143, 827–841.

Gao, Y., Wu, D., Dai, Z., Wang, C., Chen, B., & Zhang, X. (2023). A comprehensive review of the current status, developments, and outlooks of heat pipe photovoltaic and photovoltaic/thermal systems. *Renewable Energy*, 207, 539–574.

Gozgor, G., Lau, C.K.M., & Lu, Z. (2018). Energy consumption and economic growth: New evidence from the OECD countries. *Energy*, 153, 27–34.

Hamou, S., Zine, S., & Abdellah, R. (2014). Efficiency of PV Module under Real Working Conditions. *Energy Procedia*, 50, 553–558.

Hasan, A., Alnoman, H., & Rashid, Y. (2016). Impact of integrated photovoltaic-phase change material system on building energy efficiency in hot climate. *Energy and Buildings*, 130, 495–505.

Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., & Norton, B. (2014). Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method. *Energy Conversion and Management*, 81, 322–329.

Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., & Norton, B. (2010). Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 84, 1601–1612.

Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Sarwar, J., & Norton, B. (2015). Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. *Solar Energy*, 115, 264–276.

Hasan, A., Sarwar, J., Alnoman, H., & Abdelbaqi, S. (2017). Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. *Solar Energy*, 146, 417–429.

Hendricks, J.H.C., & van Sark, W.G.J.H.M. (2013). Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials. Progress in Photovoltaics: *Research and Applications*, 21, 620–630.

Hernandez-Perez, J.G., Carrillo, J.G., Bassam, A., Flota-Banuelos, M., & Patino-Lopez, L.D. (2020). A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: A computational and experimental evaluation. *Renewable Energy*, 147, 1209–1220.

Homlakorn, S., Velmurugan, K., Suksri, A., & Wongwuttanasatian, T. (2023). Comparative study for photovoltaic cooling using metal mesh inserted eutectic phase change material enclosure. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 103024.

Huang, M., Eames, P.C., Norton, B., & Griffiths, P.W. (2002). Experimental validation of a numerical model for the prediction of thermal regulation of building-integrate photovoltaics using phase change materials, *Proceedings of VII World Renewable Energy Congress*, July, Cologne, Germany. ss. 2123–2126.

Huang, M.J., Eames, P.C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 80, 1121–1130.

Huang, M.J., Eames, P.C., & Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2715–2733.

Huang, M.J., Eames, P.C., & Norton, B. (2000). The Application of Computational Fluid Dynamics to Predict the Performance of Phase Change Materials for Control of Photovoltaic Cell Temperature in Buildings, *World Renewable Energy Congress VI. Elsevier*, ss. 2123–2126.

Hudișteanu, V.-S., Cherecheș, N.-C., Țurcanu, F.-E., Hudișteanu, I., & Romila, C. (2024). Impact of Temperature on the Efficiency of Monocrystalline and Polycrystalline Photovoltaic Panels: A Comprehensive Experimental Analysis for Sustainable Energy Solutions. *Sustainability*, 16, 10566.

Kline, S. J. (1963). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.

Japs, E., Sonnenrein, G., Steube, J., Vrabec, J., Kenig, E., & Krauter, S. (2013). Technical investigation of a photovoltaic module with integrated improved phase change material, *Proceedings of the 28th European photovoltaic solar energy conference and exhibition*, Paris, Frankreich. ss. 500–502.

Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., & Biwole, P.H. (2016). Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy*, 140, 151–161.

Keliang, L., Jie, J., Tin-tai, C., Gang, P., Hanfeng, H., Aiguo, J., & Jichun, Y. (2009). Performance study of a photovoltaic solar assisted heat pump with variable-frequency compressor – A case study in Tibet. *Renewable Energy*, 34, 2680–2687.

Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K.S., Mallick, T.K., Radulovic, J., Khusainov, R., Hutchinson, D., & Becerra, V. (2019). Electrical enhancement period of solar photovoltaic using phase change material. *Journal of Cleaner Production*, 221, 878–884.

Khanna, S., Reddy, K.S., & Mallick, T.K. (2018a). Optimization of finned solar photovoltaic

phase change material (finned pv pcm) system. *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 313–322.

Khanna, S., Reddy, K.S., & Mallick, T.K. (2018b). Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material. *Solar Energy*, 163, 591–599.

Khanna, S., Reddy, K.S., & Mallick, T.K. (2018c). Climatic behaviour of solar photovoltaic integrated with phase change material. *Energy Conversion and Management*, 166, 590–601.

Khanna, S., Reddy, K.S., & Mallick, T.K. (2017). Performance analysis of tilted photovoltaic system integrated with phase change material under varying operating conditions. *Energy*, 133, 887–899.

Khanna, S., Singh, P., Mudgal, V., Newar, S., Sharma, V., Becerra, V., Reddy, K.S., & Mallick, T.K. (2022). Novel thermal conductivity enhancing containers for performance enhancement of solar photovoltaics system integrated with phase change material. *Energy*, 243, 122923.

Klugmann-Radziemska, E., & Wcisło-Kucharek, P. (2017). Photovoltaic module temperature stabilization with the use of phase change materials. *Solar Energy*, 150, 538–545.

Li, S., Zhou, Z., Liu, J., Zhang, J., Tang, H., Zhang, Z., Na, Y., & Jiang, C. (2022). Research on indirect cooling for photovoltaic panels based on radiative cooling. *Renewable Energy*, 198, 947–959.

Lo Brano, V., Ciulla, G., Piacentino, A., & Cardona, F. (2013). On the Efficacy of PCM to Shave Peak Temperature of Crystalline Photovoltaic Panels: An FDM Model and Field Validation. *Energies*, 6, 6188–6210.

Luo, Z., Huang, Z., Xie, N., Gao, X., Xu, T., Fang, Y., & Zhang, Z. (2017). Numerical and experimental study on temperature control of solar panels with form-stable paraffin/expanded graphite composite PCM. *Energy Conversion and Management*, 149, 416–423.

Maghrabie, H.M., Mohamed, A.S.A., Fahmy, A.M., & Abdel Samee, A.A. (2023). Performance enhancement of PV panels using phase change material (PCM): An experimental implementation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102741.

Mah, C.-Y., Lim, B.-H., Wong, C.-W., Tan, M.-H., Chong, K.-K., & Lai, A.-C. (2019). Investigating the Performance Improvement of a Photovoltaic System in a Tropical Climate using Water Cooling Method. *Energy Procedia*, 159, 78–83.

Mahdavi, A., Farhadi, M., Gorji-Bandpy, M., & Mahmoudi, A. (2024). A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins. *Applied Thermal Engineering*, 123519.

Martinelli, M., Bentivoglio, F., Caron-Soupart, A., Couturier, R., Fourmigue, J.-F., & Marty, P. (2016). Experimental study of a phase change thermal energy storage with copper foam. *Applied Thermal Engineering*, 101, 247–261.

Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J.R., Vera-García, F., Káiser, A.S., & Zamora, B. (2013). Improving the Electrical Parameters of a Photovoltaic Panel by Means of an Induced or Forced Air Stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 1–10.

Moein-Jahromi, M., Rahmanian-Koushkaki, H., Rahmanian, S., Pilban & Jahromi, S. (2022). Evaluation of nanostructured GNP and CuO compositions in PCM-based heat sinks for photovoltaic systems. *Journal of Energy Storage*, 53, 105240.

Moein-Jahromi, M., Rahmanian, S., & Rahmanian-Koushkaki, H. (2024). Novel designs for PCM passive heat sink of concentrated photovoltaic cells to enhance the heat transfer rate: presenting 4E analyses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 1667–1695.

Mondol, J.D., Yohanis, Y.G., & Norton, B. (2007). The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 32, 118–140.

Nada, S.A., El-Nagar, D.H., & Hussein, H.M.S. (2018). Improving the thermal regulation and efficiency enhancement of PCM-Integrated PV modules using nano particles. *Energy Conversion and Management*, 166, 735–743.

Namin, A., Jivacate, C., Chenvidhya, D., Kirtikara, K., & Thongpron, J. (2012). Construction of Tungsten Halogen, Pulsed LED, and Combined Tungsten Halogen-LED Solar Simulators for Solar Cell Characterization and Electrical Parameters Determination. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1–9.

Nedumaran, M.S., Nagarajan, G., & Hooman, K. (2022). Numerical analysis of multiple phase change materials based heat sink with angled thermal conductivity enhancer. *Journal of Energy Storage*, 55, 105316.

Nouira, M., & Sammouda, H. (2018). Numerical study of an inclined photovoltaic system coupled with phase change material under various operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 141, 958–975.

PraveenKumar, S., Agyekum, E.B., Kumar, A., & Velkin, V.I. (2023). Performance evaluation with low-cost aluminum reflectors and phase change material integrated to solar PV modules using natural air convection: An experimental investigation. *Energy*, 266, 126415.

Rabie, R., Emam, M., Elwardany, A., Ookawara, S., & Ahmed, M. (2021). Performance evaluation of concentrator photovoltaic systems integrated with combined passive cooling techniques. *Solar Energy*, 228, 447–463.

Rajvikram, M., Leoponraj, S., Ramkumar, S., Akshaya, H., & Dheeraj, A. (2019). Experimental investigation on the abasement of operating temperature in solar photovoltaic panel using PCM and aluminium. *Solar Energy*, 188, 327–338.

Refaey, H.A., Abdo, S., Saidani-Scott, H., El-Shekeil, Y.A., Bendoukha, S., Barhoumi, N., & Abdelrahman, M.A. (2024). Thermal regulation of photovoltaic panels using PCM with multiple fins configuration: Experimental study with analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102457.

Qasim, M.A., Ali, H.M., Khan, M.N., Arshad, N., Khaliq, D., Ali, Z., & Janjua, M.M. (2020). The effect of using hybrid phase change materials on thermal management of photovoltaic panels – An experimental study. *Solar Energy*, 209, 415–423.

Qu, H., Du, Z., & Kong, Q. (2024a). Experimental study on the effect of tilt angle on the output parameters of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system under wind conditions. *Journal of Energy Storage*, 102, 114263.

Qu, H., Gao, B., Kong, Q., & Xu, Z. (2024b). Experimental study of the effect of ambient temperature on the output characteristics of PV-PCM systems. *Journal of Energy Storage*, 88, 111535.

Sarkar, S., & Rahman, M. (2018). Power-Energy Optimization of Solar Photovoltaic Device Modeling, *2018 IEEE Electron Devices Kolkata Conference (EDKCON)*. IEEE, ss. 541–546.

Sathe, T., & Dhoble, A.S. (2020). Experimental investigations of phase change material filled rectangular enclosure with inclined top and side heating mode. *Journal of Energy Storage*, 32, 101799.

Senthil Kumar, K., Ashwin Kumar, H., Gowtham, P., Hari Selva Kumar, S., & Hari Sudhan, R. (2021). Experimental analysis and increasing the energy efficiency of PV cell with nano-PCM (calcium carbonate, silicon carbide, copper). *Materials Today: Proceedings*, 37, 1221–1225.

Sharaf, M., Yousef, M.S., & Huzayyin, A.S. (2022). Year-round energy and exergy performance investigation of a photovoltaic panel coupled with metal foam/phase change material composite. *Renewable Energy*, 189, 777–789.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.

Singh, P., Mudgal, V., Khanna, S., Mallick, T.K., & Reddy, K.S. (2020). Experimental investigation of solar photovoltaic panel integrated with phase change material and multiple conductivity-enhancing-containers. *Energy*, 205, 118047.

Sivakumar, B., Navakrishnan, S., Cibi, M.R., & Senthil, R. (2021). Experimental study on the electrical performance of a solar photovoltaic panel by water immersion. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 42981–42989.

Stropnik, R., & Stritih, U. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671–679.

Takyi, G., & Nyarko, F.K. (2020). Investigation of the Effect of Temperature Coefficients on Mono-Crystalline Silicon PV Module Installed in Kumasi, Ghana. *Journal of Power and Energy Engineering*, 08, 20–34.

Unnikrishnan, K.S., Jayatej, M., & Rohinikumar, B. (2023). Three-dimensional numerical analysis of performance of PV module integrated with PCM and internal pin fins of different shapes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 9739–9760.

Unnikrishnan, K.S., Santhosh, K., & Rohinikumar, B. (2024). Experimental and numerical analysis of PV-PCM integrated with novel shaped corrugated fins. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 102562.

URL-1. (24 Mart 2025). Birleşmiş Milletler, Dünya Nüfus Beklentileri: https://population.un.org/wpp adresinden alınmıştır.

URL-2. (24 Mart 2025). Uluslararası Enerji Ajansı, Dünya Enerji Görünümü: www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024 adresinden alınmıştır.

URL-3. (24 Mart 2025). Uluslararası Enerji Ajansı, Global Veri: www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2024-free-dataset adresinden alınmıştır.

URL-4. (24 Mart 2025). Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Yenilenebilir Enerji İstatistikleri: www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023 adresinden alınmıştır.

URL-5. (24 Mart 2025). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş: https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes adresinden alınmıştır.

URL-6. (27 Nisan 2025). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik: https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik adresinden alınmıştır.

Velmurugan, K., Karthikeyan, V., Korukonda, T.B., Madhan, K., Emsaeng, K., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., Wongwuttanasatian, T., Elavarasan, R.M., Alhelou, H.H., & Subramaniam, U. (2020). Experimental Studies on PV Module Cooling With Radiation Source PCM Matrix. *IEEE Access*, 8, 145936–145949.

Xu, H., Zhang, C., Wang, N., Qu, Z., & Zhang, S. (2020). Experimental study on the performance of a solar photovoltaic/thermal system combined with phase change material. *Solar Energy*, 198, 202–211.

Yazici, M.Y., Avci, M., & Aydin, O. (2019). Combined effects of inclination angle and fin number on thermal performance of a PCM-based heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113956.

Yesildal, F., Ozakin, A.N., & Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100983.

Yin, E., Li, Q., Li, D., & Xuan, Y. (2019). Experimental investigation on effects of thermal resistances on a photovoltaic-thermoelectric system integrated with phase change materials. *Energy*, 169, 172–185.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuz Kaan YAĞCI, 2008 yılında Ünye Mehmet Refik Güven Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2016 yılında "Düşey Silindirik Bir Halka Aralık İçerisinde Isıl Enerji Depolama: Kanatçık Etkisi" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından 2017 yılında doktora eğitimine başladı. 2014 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır. Doktora tezi kapsamında yayımlanan makale ve bildiri çalışmaları aşağıda sunulmaktadır.

- Yağcı O. K., Avcı M., Aydın O., Markal B., (2024). An experimental study on the performance of PCM-based heat sink with air for thermal regulation of PVs, Solar Energy, 278, 112800.
- Yağcı O. K., Avcı M., Aydın O., Markal B. (2023). Fotovoltaik Panellerin Faz Değiştiren Madde Destekli Isı Alıcısıyla Soğutulması. 15. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Turkey, 26 - 29 April 2023, 1502-1516