

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FAZ DEĞİŞTİREN MADDE - İLAVELİ ISI ALICILARLA ELEKTRONİK
CİHAZLARIN SOĞUTULMASI**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Mustafa Yusuf YAZICI

**MAYIS 2019
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :



Trabzon



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Mustafa Yusuf YAZICI tarafından hazırlanan

FAZ DEĞİŞTİREN MADDE - İLAVELİ ISI ALICILARLA ELEKTRONİK
CİHAZLARIN SOĞUTULMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 /04/2019 gün ve 1800 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri


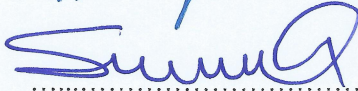
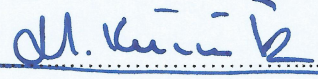
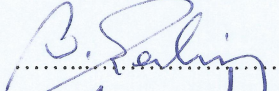
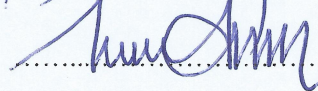
Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN

Üye : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK

Üye : Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK

Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Üye : Doç. Dr. Mete AVCI


.....

.....

.....

.....

.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Termal kontrol, mikroelektronik endüstrisinin gelişim sürecini doğrudan etkilemektedir. Elektronik bileşenlerin güvenilirliği ve performansı bünyelerinde üretilen ısının, müsaade edilen hücre sıcaklığı aşılmadan, güvenli bir şekilde dış ortama aktarılmasına bağlıdır. Bu durum, elektronik ekipmanların termal tasarımını ve kontrolünü önemli kılmaktadır.

Bu doktora tezi kapsamında, FDM-ilaveli ısı alıcı sistemlerinin termal performansı üzerinde etkili olan temel tasarım parametreleri (açısal konum, kanatçık sayısı ve kanatçık geometrisi) deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma, zaman bağımlı/periodyk olarak çalışan elektronik ekipmanların termal kontrolünde literatüre ve uygulamaya önemli katkılar sağlama potansiyeline sahiptir.

Lisanüstü eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren Doç. Dr. Mete Avcı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesine ve yönlendirilmesine sağladığı bilimsel katkılardan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Orhan Aydın'a teşekkür ederim.

Hayatımın her safhasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve çalışmalarım sırasında desteğini hep yanımda hissettiğim eşim Semra K.Yazıcı'ya en kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı oğullarım Yusuf Eren ve Mehmet Uras'a ithaf ediyorum.

Mustafa Yusuf YAZICI

Trabzon, 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “FAZ DEĞİŞTİREN MADDE - İLAVELİ ISI ALICILARLA ELEKTRONİK CİHAZLARIN SOĞUTULMASI” başlıklı bu çalışmayı baŐtan sona kadar danıŐmanım Doç. Dr. Mete AVCI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, 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.

10/05/2019

Mustafa Yusuf YAZICI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Elektronik Ekipmanların Termal Kontrolü.....	3
1.3. Faz Değiştiren Madde (FDM) - İlaveli Isı Alıcı.....	6
1.4. Literatür Araştırması.....	9
1.4.1. FDM Etkisinin İncelendiği Çalışmalar.....	13
1.4.2. FDM/Kanatçık Düzenlemesinin İncelendiği Çalışmalar.....	22
1.4.3. FDM/Metal Matris Düzenlemesinin İncelendiği Çalışmalar	38
1.4.4. FDM/Nano Partikül Düzenlemelerinin İncelendiği Çalışmalar	43
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	48
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	50
2.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Prensibi	50
2.1.1. Deney Düzenegi	50
2.1.2. Test Bölgesi	53
2.1.3. Deneysel Yöntem	60
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	62

3.1. Kanatçiksız Isı Alıcı Düzenlemesi: FDM ve Açısal Konum Etkisi	62
3.1.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	62
3.1.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	78
3.1.3. Erime Arayüzey Gelişimi	83
3.1.4. Isı Alıcı Termal Performansı (n=0)	91
3.2. Sabit Kesitli Levha Tip Kanatçıklara Sahip Isı Alıcı - Kanatçık Sayısı (n) ve Açısal Konum (θ) Etkisi.....	94
3.2.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	94
3.2.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	115
3.2.3. Erime Arayüzey Gelişimi	120
3.2.4. Isı Alıcı Termal Performansı (n = 0 - 5).....	140
3.3. Değişken Kesitli Levha tip Kanatçıklara Sahip Isı Alıcı - Kanatçık Genişlik Oranı Etkisi (S=1, 0,5, 0,2, 0)	145
3.3.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	146
3.3.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi.....	152
3.3.3. Erime Arayüzey Gelişimi	154
3.3.4. Isı Alıcı Termal Performansı (S = 1, 0,5, 0,2 ve 0)	157
4. SONUÇLAR.....	160
5. ÖNERİLER	163
6. KAYNAKÇALAR	164

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

FAZ DEĞİŞTİREN MADDE - İLAVELİ ISI ALICILARLA ELEKTRONİK CİHAZLARIN SOĞUTULMASI

Mustafa Yusuf YAZICI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mete AVCI
2019, 175 Sayfa

Faz değıştiren madde (FDM)-ilaveli soğutma sistemleri, zaman bağımlı (sabit ısı yük) veya periyodik ısı yük altında çalışan elektronik ekipmanların termal kontrolü için önemli bir alternatif halini almıştır. Bu çalışmada, FDM - ilaveli ve -ilavesiz bir ısı alıcının termal performansı farklı eğim açıları ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$), kanatçık sayıları ($n = 0 - 5$) ve kanatçık genişlik oranları ($S = 1 - 0$) için sabit ısı güç altında (16 W) deneysel olarak incelenmiştir. FDM olarak, n-eicosane kullanılmıştır. Isı alıcı düzenlemelerinin termal performans değerlendirmesi sıcaklık değışimleri ve katı/sıvı arayüzey ilerlemesi üzerinden sunulmuştur. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemeleri için güvenilir çalışma sürelerinin açısıl konumdan bağımsız olarak kanatçık sayısının artışıyla önemli düzeyde iyileştiği ($t = 2 \rightarrow 6$ dk.); ancak, uygulama açısından yetersiz olduğu belirlenmiştir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesi için ise, konum açısı, kanatçık sayısı ve kanatçık genişlik oranının FDM içerisindeki katı/sıvı arayüz ilerleme hızı ve ısı geçiş mekanizması ve çalışma süresi üzerinde önemli değışimlere neden olduğu gösterilmiştir. $n = 0$ için konum açısının artışıyla ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$) çalışma süreleri % 553, $\theta = 0^\circ$ için ise kanatçık sayısının ($n = 1 - 5$) artışıyla güvenilir çalışma süresi % 590 düzeyinde artmaktadır. Termal performans açısından, $S = 1$ (sabit kesit) durumuna ait optimum konum açısı ve kanatçık sayısı, sırasıyla, $\theta = 60^\circ$ ve $n = 3$ olarak belirlenmiştir. Kanatçık genişlik oranının azalmasıyla ($n = 3, S = 1 - 0$) güvenilir çalışma sürelerinin % 15 düzeyinde arttığı ve $S = 1$ ve $n = 5$ durumu ile aynı güvenilir çalışma süresi seviyesine ulaşıldığı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Termal Kontrol, Elektronik Soğutma, Isı Alıcı, Faz Değıştiren Madde, Açısıl Konum, Kanatçık Sayısı, Kanatçık Geomerisi

Doctoral Thesis

SUMMARY

**ELECTRONICS COOLING USING THE PHASE CHANGE MATERIAL-BASED
HEAT SINKS**

Mustafa Yusuf YAZICI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Doç. Dr. Mete AVCI
2019, 175 Pages

Phase change material (PCM) – based cooling systems is a promising alternative for thermal management of electronic equipment subjected to transient (constant heat load) or periodic heat loads. In this study, the thermal performance of a heat sink with and without PCM depending several design parameters, namely, inclination angle ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$), fin number ($n = 0 - 5$), fin width ratio ($S = 1 - 0$) are investigated experimentally under a constant value of the heat load (16 W). PCM namely n-eicosane is adopted. Temperature history and solid-liquid interface positions are recorded to evaluate thermal performance of heat sink configurations. For heat sink arrangements without PCM, it is obtained that reliable operating time significantly enhances with an increase in the number of fins independently of inclination angle, but it is insufficient for practice ($t = 2 \rightarrow 6$ min.) For the PCM-based heat sink arrangement, it is found that the inclination angle, fin number and fin geometry cause important changes on the solid/liquid interface velocity and heat transfer mode within PCM domain and the operating time. With increasing inclination angle ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$) for $n = 0$, the reliable operating times increased by 553 %, and for the $\theta = 0^\circ$, the operating time augmented with 590 % increase with the increasing number of fins ($n = 0 - 5$). In the sense of thermal performance, the optimal inclination angle and the number of fin for the case of $S = 1$ (constant section) are found $\theta = 60^\circ$ and $n = 3$, respectively. It is also revealed that reliable operating time increased by 15 % with the decrease of the fin widths' ratio ($n = 3, S = 1 - 0$), which is at the same level for $S = 1$ and $n = 5$ case.

Key Words: Thermal Management, Electronics Cooling, Heat Sink, Phase Change Material, Inclination Angle, Fin, Fin Geometry.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Mikroişlemci gelişim projeksiyonu: transistör boyutu, işlemci boyutu ve transistör yoğunluğu (a) ve maksimum ısı akısı ve güç yayılımı (b) (Murshed, 2016)	1
Şekil 1.2. Konvansiyonel termal kontrol yöntemleri için yüzey ısı akısı değerleri	4
Şekil 1.3. Termal kontrol yöntemleri	5
Şekil 1.4. FDM'nin erime ve katılaşma süreci	6
Şekil 2.1. Deney düzeneği: şematik resim, FDM-ilaveli ve FDM-ilavesiz (Kapalı ortam) (a) ; FDM-ilavesiz (Açık kanal) (b) ve test bölgesi (c).	52
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin çalışma prensibi.....	53
Şekil 2.3. Test bölgesine ait bileşenler	54
Şekil 2.4. Kanatçık geometrisi: sabit kesitli kanatçık (a), değişken kesitli kanatçık (b)	56
Şekil 2.5. Farklı kanatçık sayılarına sahip ısı alıcılara ait geometrik parametreler.....	56
Şekil 2.6. Isı değiştirici arka yüzeyi,ısıtıcı (a) ve termoeleman yerleşimi (b).....	58
Şekil 2.7. Kapalı ortam içerisindeki termoeleman yerleşimi	58
Şekil 2.8. N-eicosane ait DSC analizi	59
Şekil 3.1. FDM-İlavesiz ısı alıcı düzenlemesine ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d) ve T_{5a} (e)	64
Şekil 3.2. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b) ve T_{a3} (c).	65
Şekil 3.3. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d) ve T_{5a} (e).....	66
Şekil 3.4. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	67
Şekil 3.5. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e).....	68
Şekil 3.6. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	69
Şekil 3.7. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)	73

Şekil 3.8.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	74
Şekil 3.9.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)	75
Şekil 3.10.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	76
Şekil 3.11.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)	77
Şekil 3.12.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	78
Şekil 3.13.	Isı alıcı düzenlemeleri için ($n=0$) ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı: FDM-ilavesiz ısı alıcı, $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=45^\circ$ (c), $\theta=90^\circ$ (e); FDM-ilaveli ısı alıcı, $\theta=0^\circ$ (b), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=90^\circ$ (f)	82
Şekil 3.14.	Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g)	87
Şekil 3.15.	Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g)	879
Şekil 3.16.	Farklı konum açılarının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).....	92
Şekil 3.17.	Açısal konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi	93
Şekil 3.18.	FDM-ilaveli ısı alıcı için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b)	94
Şekil 3.19.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	98
Şekil 3.20.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	99
Şekil 3.21.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	100
Şekil 3.22.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	101
Şekil 3.23.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	102
Şekil 3.24.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	103
Şekil 3.25.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	104
Şekil 3.26.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	105

Şekil 3.27.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=3) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)	106
Şekil 3.28.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=3) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	107
Şekil 3.29.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=5) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	108
Şekil 3.30.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=5) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	109
Şekil 3.31.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=1) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	110
Şekil 3.32.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=1) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	111
Şekil 3.33.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=3) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	112
Şekil 3.34.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=3) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	113
Şekil 3.35.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=5) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)	114
Şekil 3.36.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine (n=0) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	115
Şekil 3.37.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=0^\circ$: n=1 (a), n=3 (b), n=5 (c)	118
Şekil 3.38.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=45^\circ$: n=1 (a), n=3 (b), n=5 (c)	119
Şekil 3.39.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=90^\circ$: n=1 (a), n=3 (b), n=5 (c)	120
Şekil 3.40.	Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey (t=12 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	124
Şekil 3.41.	Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey (t=24 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	126
Şekil 3.42.	Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey (t=36 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	128
Şekil 3.43.	Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey (t= t_{son}): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	130
Şekil 3.44.	Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey (t=12 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	132
Şekil 3.45.	Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey (t=24 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	134

Şekil 3.46.	Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey ($t=36$ dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).....	136
Şekil 3.47.	Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey ($t=t_{son}$): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).	138
Şekil 3.48.	Farklı konum açıları için kanatçık sayısının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi: FDM-ilavesiz ısı alıcı (a, c, e, g, i, j ve l), FDM-ilaveli ısı alıcı (b, d, f, h, i, k ve m).....	141
Şekil 3.49.	Açısal konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi: FDM-ilavesiz ısı alıcı, Açık Kanal (a), FDM-ilavesiz ısı alıcı, Kapalı Ortam (b), FDM-ilaveli ısı alıcı (c).....	144
Şekil 3.50.	Artan kanatçık sayısı değerleri için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b).....	145
Şekil 3.51.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d).....	147
Şekil 3.52.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	148
Şekil 3.53.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,2$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)	149
Şekil 3.54.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,2$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	150
Şekil 3.55.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d).....	151
Şekil 3.56.	FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).	152
Şekil 3.57.	Farklı kanatçık genişlik oranları için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı: $S=0,5$ (a), $S=0,2$ (b), $S=0$ (c)	153
Şekil 3.58.	Erime ara yüzey ilerlemesi, yanal yüzey: $S=1$ (a), $S=0,5$ (b), $S=0,2$ (c), $S=0$ (d).....	155
Şekil 3.59.	Erime ara yüzey ilerlemesi, alt yüzey: $S=1$ (a), $S=0,5$ (b), $S=0,2$ (c), $S=0$ (d).....	156
Şekil 3.60.	Farklı kanatçık genişlik oranlarının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi	158
Şekil 3.61.	Farklı kanatçık genişlik oranları için açısal konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi	158
Şekil 3.62.	Farklı kanatçık genişlik oranları için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b).....	159

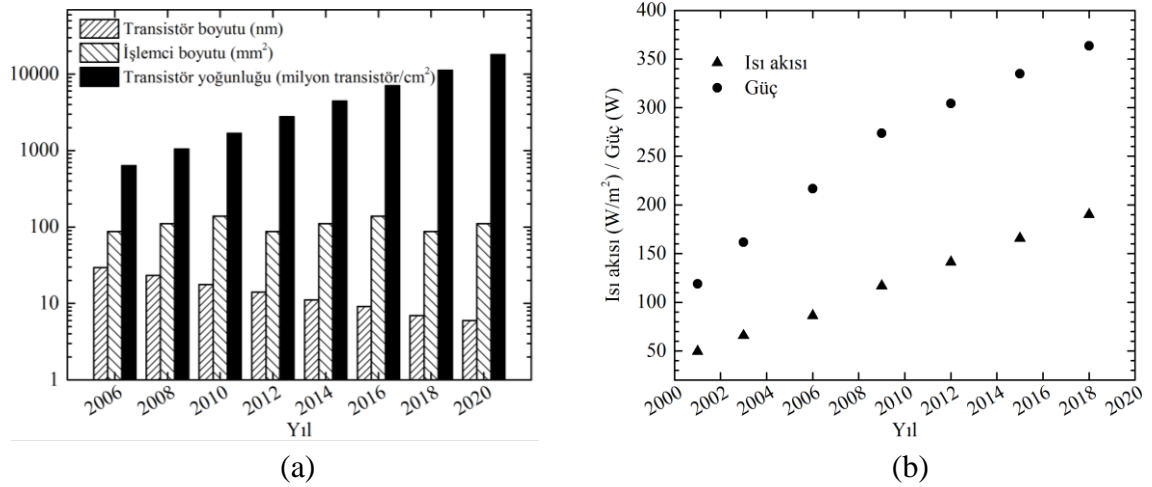
TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. FDM seçim kriterleri (Akeiber vd., 2016)	7
Tablo 1.2. FDM-ilaveli termal kontrol yönteminin kullanım alanları (Pal, 1996; Kumar vd., 2011)	8
Tablo 1.3. Araştırmacı, araştırma alanları ve incelenen etkiler.....	11
Tablo 1.4. FDM-ilaveli düzenleme.....	15
Tablo 1.5. Ayrık ısıtıcı düzenlemesine ait çalışmalar	20
Tablo 1.6. FDM/kanatçık düzenlemesine ait çalışmalar.	23
Tablo 1.7. FDM/metal matris düzenlemesine ait çalışmalar	41
Tablo 1.8. FDM/nano partikül düzenlemesine ait çalışmalar.....	46
Tablo 2.1. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler	52
Tablo 2.2. N-eicosane'ye ait termofiziksel özellikler.	59

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

20. yüzyılın en önemli icadı olarak kabul edilen transistörler, mikro elektronik endüstrisinin gelişiminde önemli bir dönüşüm sürecini başlatmıştır. İlerleyen süreçte ise, düzlemsel bütünleşik devrenin icadı ve üretim teknolojisinin gelişimine bağlı olarak transistör boyutlarının nanometre mertebelerine ulaşması (10 μm 'den ~ 10 nm'ye) gelişim sürecine büyük bir ivme kazanmıştır. Yarı iletken ve mikro elektronik teknolojilerindeki bu gelişmeler, Gordon Moore'a ait deneysel bir gözlem olan Moore yasası doğrultusunda boyutlarda küçülme, transistör yoğunluğunda artış, yüksek devre hızları ve yüksek işlemci performansı şeklinde devam etmektedir. Yarı iletkenler için Uluslararası Teknoloji Yol Haritası (International Technology Roadmap of Semiconductor) projeksiyonu Şekil 1.1 a'da verilmektedir (ITRS, 2006; Murshed, 2016). Burada, transistör boyutlarındaki azalmanın birim alan başına düşen transistör yoğunluğunu önemli düzeyde arttırdığı görülmektedir. Bu davranış, transistör, mikroişlemci ve sistem üzerindeki maksimum güç ve ısı akısı değerlerini önemli düzeyde arttırmaktadır (iNEMI, 2004; Murshed, 2016). 2020 yılı projeksiyonunda mikro işlemci üzerindeki güç ve ısı akısı değerlerinin sırasıyla 360 W ve 190 W/cm² düzeylerine ulaşacağı ön görülmektedir (Şekil 1.1 b).



Şekil 1.1. Mikroişlemci gelişim projeksiyonu: transistör boyutu, işlemci boyutu ve transistör yoğunluğu (a) ve maksimum ısı akısı ve güç yayılımı (b) (Murshed, 2016)

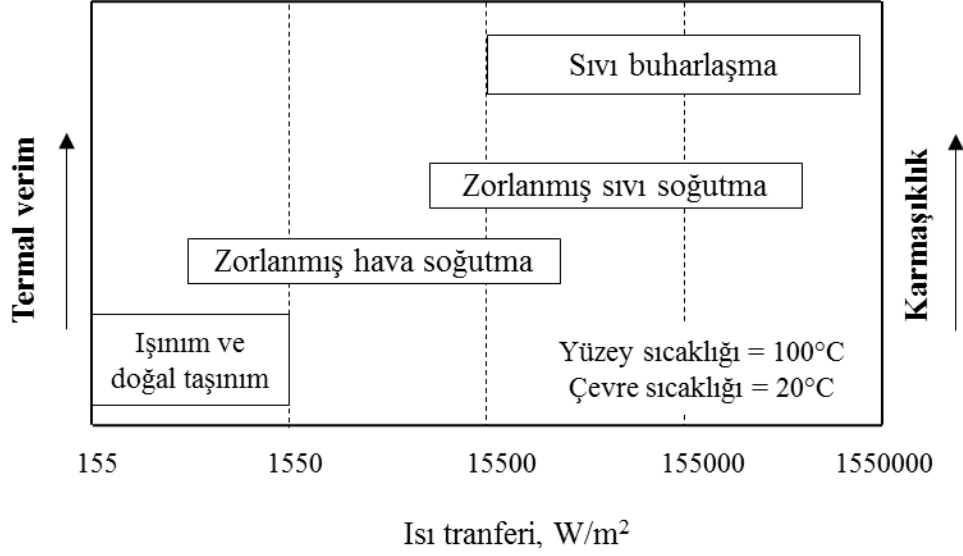
Mikroelektronik endüstrisindeki gelişmeler, elektronik cihazların daha minyatürize, fonksiyonel ve yüksek performansa sahip olmasına imkan verirken; yüksek güç yoğunlukları devre elemanlarında yüksek sıcaklık artışına sebep olmaktadır. İlgili sıcaklık düzeylerinin belirli limitlerin altında tutulması (maksimum çalışma sıcaklığı) ve yapı içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının sağlanması, elektronik ekipmanların performansını ve güvenilirliğini kısıtlayan/belirleyen temel unsurlardır. Bir başka ifade ile sıcaklık elektronik bileşenin/cihazın performansı ve güvenilirliği ile ilgili temel bir tasarım parametresidir. Elektronik cihazlar için kullanılan performans ve güvenilirlik kavramları, sırasıyla, şu şekilde tanımlanabilir. Performans, eşik voltajı, kaçak akım, gürültü sınırı gibi elektriksel parametrelerle, performans arızaları ise elektriksel işlevsellikteki bozulma ile karakterize edilmektedir. Performans-sıcaklık ilişkisi termal gerilimin elektriksel parametreler üzerindeki etkisi ile belirlenmektedir. Güvenilirlik ise bir cihazın amaçlanan işlevini yerine getirme kabiliyeti ve elektriksel işlevsellikteki bozulmalara bağlı olarak ekipman arızalarına sebep olan hata mekanizmalarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Güvenilirlik ile ilgili arızalar hata mekanizmalarından kaynaklanan hasar nedeniyle cihazı çalışamaz duruma getirmektedir. Elektronik bir sistem/cihaz için farklı elektronik bileşenlerin (işlemci, devre kartı vb.) bir araya getirilerek, kapalı bir sistemin oluşturulması elektronik paketleme olarak isimlendirilmektedir. Elektronik paketleme işlemi, genel olarak, 6 seviyeden (seviye 0-5) meydana gelmektedir. Farklı elektronik paketleme seviyelerinde yüksek çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak ortaya çıkabilecek hata mekanizmaları farklılıklar göstermektedir. Isıl yoğunluğun yüksek olduğu işlemci (seviye 0) ve işlemci paketi (seviye 1) seviyelerindeki sıcaklığa bağlı hata mekanizmaları, sırasıyla, elektriksel iletkenlikte azalma (düşük devre hızları), sıcak elektron (hot electron), elektriksel aşırı gerilim, oksit parçalanması (oxide breakdown), elektron göçü (electromigration); termal gerilme, devre elemanları bağlantı noktalarının kötleşmesi, mekanik gerilme (sıkıştırma ve eğilme), malzeme yorulması ve kırılması şeklindedir (Pecht, 1993). İlgili hata oranlarının Arrhenius eşitliğine bağlı olarak artan çalışma sıcaklığı ile logaritmik bir artış sergilediği literatürde belirtilmektedir (Krum, 2004; Tong, 2011). Örnek olarak, bir elektronik cihazın sıcaklığındaki 1°C'lik bir artışın güvenilirliğini % 1-3 oranında azalttığı; 10-15 °C seviyesindeki artışların ise cihazın kullanım ömrünü yarılayabildiği ortaya konulmuştur (Schmidt, 2000). Bir diğer çalışmada ise (Yeh, 1995), elektronik sistemlerde meydana gelen hataların % 50'den fazlasının sıcaklık kaynaklı olduğu literatürde belirtilmiştir. Bu doğrultuda, yarı iletken teknolojisinin

sahip olduğu potansiyelden etkin bir şekilde yararlanılabilmesi uygun termal analizlerin yapılarak optimum termal kontrol stratejisinin belirlenmesini ve fazla ısının etkin bir şekilde sistemden uzaklaştırılmasını gerekli kılmaktadır. Bir başka ifade ile ısıl kararlılığın sağlanması gerekmektedir. Bu durum, elektronik ekipmanların termal tasarımını ve kontrolünü ısı transfer teknolojilerinin en önemli uygulama alanlarından biri konumuna getirmiştir.

1.2. Elektronik Ekipmanların Termal Kontrolü

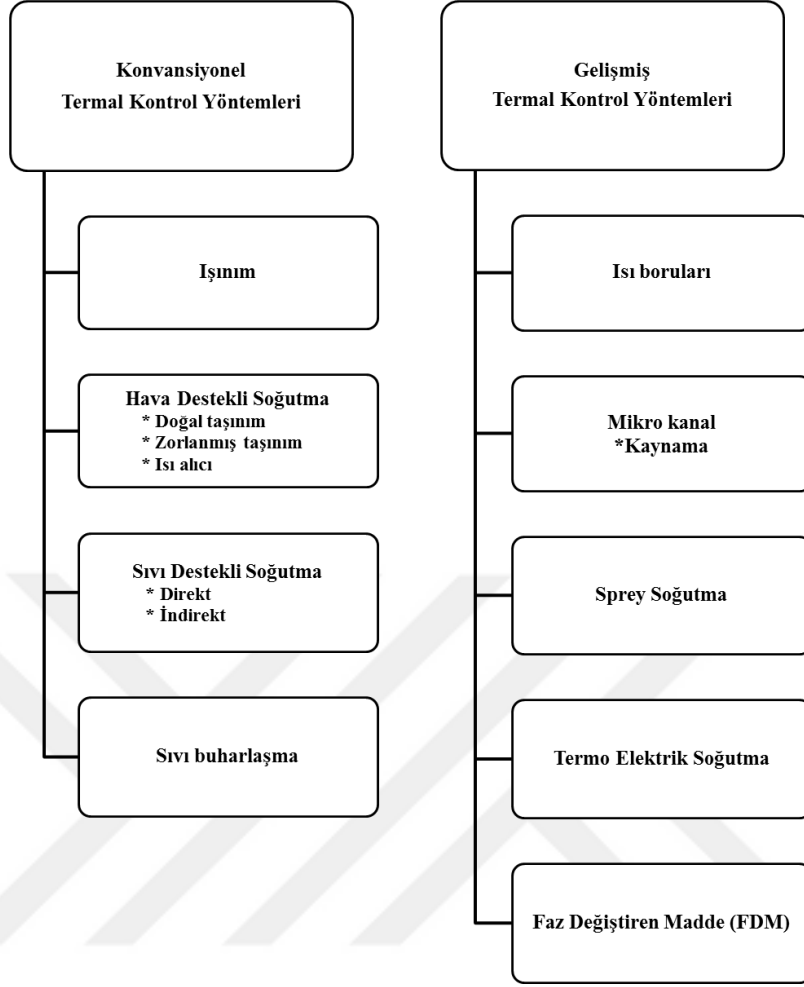
Termal kontrol, elektronik bileşenlerin üretmiş olduğu ısının, yarı iletken bağlantı noktası üzerinden çevre ortama etkin bir şekilde aktarımını hedeflemektedir. Bu süreç, sırasıyla, yarı iletken içerisindeki ısı transferi, yarı iletken üzerinden ısı yayıcıya olan ısı transferi ve farklı soğutma sistemleri kullanılarak ısı yayıcı üzerinden çevre ortama olan ısı transferi adımlarını kapsamaktadır.

Termal kontrol yöntemleri ısı transfer mekanizmalarının etkinliğine bağılı olarak dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar: ışınım, hava destekli soğutma (doğal ve zorlanmış), sıvı destekli soğutma (direkt ve indirekt) ve sıvı buharlaşmasını kapsayan konvansiyonel soğutma yöntemleridir (Scott, 1974). Konvansiyonel soğutma yöntemlerinin termal verim ve karmaşıklık düzeyleri ısı akısına bağılı olarak Şekil 1.2’de verilmiştir. Termal kontrol stratejilerinin gelişimi ile birlikte araştırmacılar bu sınıflandırmaya, sprej soğutma, mikrokanal, ısı boruları, termoelektrik soğutma ve faz değıştiren madde (FDM) kullanımını da dahil edilmiştir (Anandan ve Ramalingam, 2008; Murshed ve Castro, 2016). İlgili soğutma yöntemleri özet halinde Şekil 1.3’de verilmiştir. Ayrıca, yukarıda ifade edilen termal kontrol yöntemleri aktif ve pasif yöntemler olarak da sınıflandırılmaktadır. Aktif sistemlerde ısının uzaklaştırılması için ilave bir enerjiye (fan, pompa vb.) ihtiyaç varken, pasif yöntemlerde (ısı boruları, FDM) ise enerji tüketen herhangi bir mekanik parça gereksinimi yoktur.



Şekil 1.2. Konvansiyonel termal kontrol yöntemleri için yüzey ısı akısı değerleri (Anandan ve Ramalingam, 2008)

Termal kontrol stratejisinin belirlenmesinde, sistemin ısıl yük yoğunluğu ve dağılımı, güvenilir çalışma sıcaklığı, çevre sıcaklığı, kullanılabilir hacim (boyut), cihaz kullanım periyodu, gürültü, maliyet, bakım gereksinimi gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Elektronik bileşenlerin soğutulmasında yaygın olarak kullanılan zorlanmış hava / sıvı soğutmalı sistemlerde (jet akış, sprej soğutma vb.) pompa/kompresör kullanımına bağlı olarak akustik gürültü oluşumu, ağırlık ve hacim oranlarında artış problemleri ortaya çıkmaktadır. Çift fazlı sistemlerde (sıvı buharlaşma ve kaynama) artan boyut oranları ile birlikte sıcaklık ve basınç dalgalanması, ısı borularında yer çekimi nedeniyle düşük performans, termoelektrik soğutucularda ise sınırlı ısı yayılımı gibi dezavantajlar söz konusudur. Ayrıca, aktif termal kontrol yöntemlerinin kullanımı ile ortaya çıkan karmaşık sistem tasarımı ve ilave güç gereksinimi gibi dezavantajlar çalışma maliyetlerini de önemli ölçüde artırmaktadır.



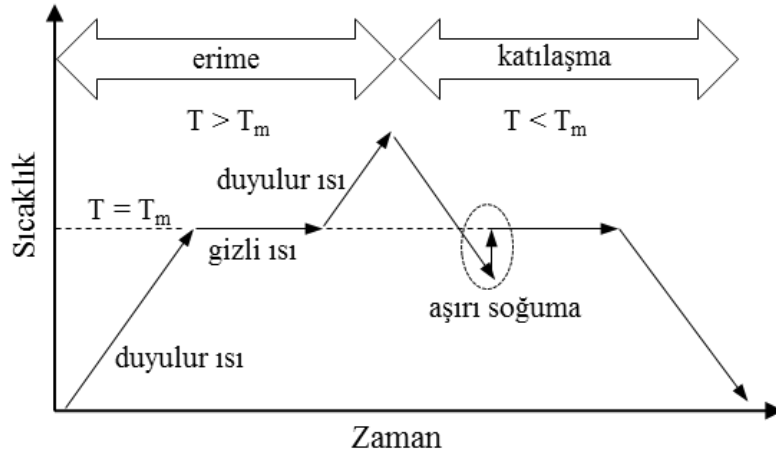
Şekil 1.3. Termal kontrol yöntemleri (Anandan ve Ramalingam, 2008; Murshed ve Castro, 2016)

Yüksek güç üretimine sahip, hacim ve ağırlık kısıtlamalarının yüksek olduğu taşınabilir elektronik cihazlar, savunma sanayi, uzay-havacılık vb. uygulamalar için yukarıda ifade edilen termal kontrol yöntemleri uygun çözümler sunamamaktadır. Bu durum, son dönemde araştırmacıların ilgisini hafif, sessiz, düşük maliyet ve yüksek ısı depolama kabiliyetine sahip pasif bir termal kontrol yöntemi olan faz değiştiren madde (FDM) ilaveli soğutma sistemlerine yönlendirmiştir. Faz değiştiren madde ilaveli termal kontrol sistemlerinde katı-sıvı faz değişimi ile gizli ısı depolama diğer faz geçiş yöntemlerine (katı-katı, katı-gaz ve sıvı-gaz) kıyasla daha yoğun olarak kullanılmaktadır.

1.3. Faz Değiştiren Madde (FDM) - İlaveli Isı Alıcı

Faz değiştiren madde (FDM)-ilaveli termal kontrol sistemleri elektronik bileşenlerin / cihazların termal kontrolü için önemli bir potansiyel olarak görölmektedir.

Faz değiştiren maddeler birim hacim için sahip oldukları yüksek erime gizli ısısı ile karakterize edilmektedir. Bu durum, erime sürecinde yüksek miktarda ısının gizli formda absorbe edilmesine olanak sağlamaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak faz değiştiren madde katı fazdan sıvı faza geğerken FDM yapısındaki kimyasal bağlar kopmaktadır. Faz dönüşümünün endotermik bir proses olması sebebiyle ağığa çıkan ısı FDM tarafından absorbe edilmektedir. FDM bünyesinde ısının depolanması ve faz dönüşüm sıcaklığına ulaşılması ile birlikte erime süreci başlamaktadır. Erime süreci tamamlanıncaya kadar sıcaklık sabit kalmaktadır. Malzemenin faz değiştirmesi sırasında depolanan bu ısı, gizli ısı olarak ifade edilmektedir. Isı kaynağının aktif olmadığı ve evre sıcaklığının erime sıcaklığından düşük olması durumunda ise çevrim ters yönde gerçekleşmektedir. Bir başka ifade ile erime sürecinde absorbe edilen ısı, katılaşma sürecinde dış ortama geri verilmektedir. FDM'nin erime ve katılaşma süreçleri şekil 1.4'de şematik olarak verilmiştir.



şekil 1.4. FDM'nin erime ve katılaşma süreci

FDM'nin ısı depolama kapasitesi aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$Q = \int_{T_o}^{T_m} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot H_m + \int_{T_m}^{T_s} m \cdot c_s \cdot dT \quad (1.1)$$

$$Q = m \cdot [H_m + c_k(T_m - T_o) + c_s(T_s - T_m)] \quad (1.2)$$

Burada; T_o , (K) başlangıç sıcaklığını, T_m , (K) erime sıcaklığını, T_s (K), son sıcaklığı, C_p (kJ/kgK,) maddenin katı fazının sabit basınçtaki özgül ısısını, C_s (kJ/kgK), sıvı fazın sabit basınçtaki özgül ısısını ve H_m (kJ/kg) erime gizli ısısını sembolize etmektedir. Gizli ısı depolamanın en önemli avantajları, yüksek ısı depolama kapasitesi, küçük depolama hacmi gereksinimi ve erime / katılaşma süresince küçük sıcaklık değişimleri olarak tanımlanabilir. Termal kontrol / gizli ısı depolama sistemlerinin tasarımında kullanılacak FDM'nin yüksek gizli depolama kabiliyeti, kimyasal kararlılık, kullanılabilirlik ve yüksek çekirdekleşme oranı gibi termofiziksel, kimyasal, ekonomik ve kinetik bazı temel özellikleri sağlaması gerekmektedir. İlgili özellikler Tablo 1.1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1.1. FDM seçim kriterleri (Akeiber vd., 2016)

Termofiziksel Özellikler	Yüksek ısıl iletkenlik, yüksek gizli ısı, yüksek özgül ısı ve düşük hacimsel genleşme
Kimyasal Özellikler	Korozif olmama, yanıcı olmama, kimyasal kararlılık ve toksik olmama
Kinetik Özellikler	Yüksek çekirdekleşme hızı ve yüksek kristal büyüme hızı
Ekonomik Özellikler	Kolay temin edilebilirlik ve düşük maliyet

Faz değiştiren maddeler, organik ve inorganik olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Zalba vd., 2003; Sharma ve Sagara, 2005; Rathod ve Banerjee, 2013; Akeiber vd., 2016). Organik FDM'ler parafinler ve parafin olmayanlar (yağ asitleri), inorganik FDM'ler ise tuz hidratlar ve metalik malzemeler olmak üzere olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Elektronik ekipmanların termal kontrolünde, yüksek gizli ısı, korozif

olmama, kimyasal kararlılık, kolay temin edilebilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları sebebiyle organik FDM grubuna ait parafin (n-parafin) yaygın olarak tercih edilmektedir.

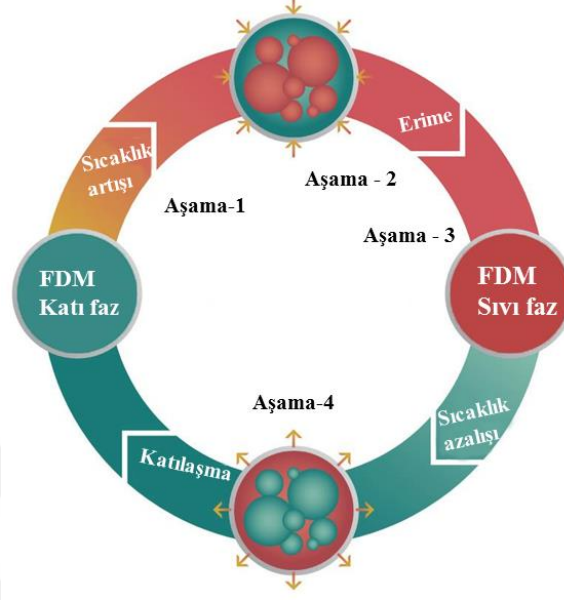
Faz değiştiren madde (FDM)-ilaveli ısı alıcı sistemleri sahip oldukları yüksek ısı depolama, düşük ağırlık ve hacim oranları ile zaman bağımlı yüksek ısıl yüklemelerin (sabit ve periyodik ısıl yüklemeler) söz konusu olduğu uygulamalar için önemli bir termal kontrol stratejisi olarak ön plana çıkmaktadır. FDM-ilaveli termal kontrol yönteminin uygulama alanları Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. FDM-ilaveli termal kontrol yönteminin kullanım alanları (Pal, 1996; Kumar vd., 2011)

Kullanım alanı	Uygulama
Havacılık ve Uzay	Radar termal kontrol, Lunar (Apollo 15, 16, 17) sürücü kontrol elektroniği
Savunma sanayi	Silah ve füze sistemleri elektroniği vb.
Taşınabilir cihazlar	Dizüstü bilgisayar, dizüstü bilgisayar altlığı, telsiz, cep telefonları vb.
Otomotiv elektroniği	Elektronik bileşenlerin yüksek motor ısısından korunması (hot-soak)
Sistem kontrol ve Robotik	Eyleyici ve kontrolcü güç modülleri

FDM-ilaveli bir sistem; ısı depolama ünitesi / ısı alıcı ve faz değiştiren madde (FDM) unsurlarından meydana gelmektedir. FDM-ilaveli ısı alıcı sistemlerinde enerji depolama süreci üç ana aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar; ısı enerjisinin faz dönüşüm sıcaklığına kadar duyulur formda depolandığı birinci aşama, faz dönüşüm sıcaklığı aralığında gizli formda depolandığı ikinci aşama ve faz dönüşüm sıcaklığının üstünde tekrar duyulur formda depolandığı üçüncü aşama şeklindedir. Sonraki süreçte ise (aşama 4), FDM bünyesine depolanan ısı doğal / zorlanmış taşınım mekanizmaları ile çevre ortama aktarılmakta ve FDM’nin tekrar katı faza geçerek bir sonraki çevrime hazır hale gelmesi sağlanmaktadır (Şekil 5). İlgili süreçler arasındaki geçiş hızını kısıtlayan en önemli unsur ise, FDM’nin (n-parafin) sahip olduğu düşük ısı iletkenlik düzeyidir. Bu olumsuzluk

kanatçık ilavesi, metal matris, nano partikül vb. yöntemler ile önemli düzeyde giderilmektedir.



Şekil 1.5. FDM-ilaveli bir termal kontrol süreci ve faz dönüşümleri

1.4. Literatür Araştırması

Termal kontrol, minyatürize ve yüksek güç yoğunluğuna sahip elektronik ekipmanların artması ile birlikte disiplinlerarası çalışmaların yoğunlaştığı önemli endüstriyel uygulamalardan biri haline almıştır.

Bu çalışmada, ısı üreten bir elemanın FDM-ilaveli bir ısı alıcı düzenlemesi ile termal kontrolü deneysel olarak incelenmiştir. Faz değişimi sürecince (katı-sıvı) FDM'nin sahip olduğu yüksek gizli ısı depolama kabiliyetinin daha düşük ve daha kararlı çalışma sıcaklıkları sağladığı bilinmektedir. Bu doğrultuda, FDM-ilaveli ısı alıcı sistemleri periyodik veya zaman bağımlı olarak çalışan uygulamalar için önemli bir potansiyel olarak görülmektedir. Bu durum, son dönemlerde araştırmacıların ilgi alanlarının FDM-ilaveli sistemler üzerine gelişmesine katkı sağlamıştır. Ancak, FDM'nin düşük ısıl iletim katsayısına sahip olması bu sistemlerin kullanımını kısıtlamaktadır. FDM'lerin düşük ısıl iletim katsayıları, ısı alıcı komşuluğunda direncin artmasına ve buna bağlı olarak ısı geçişinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu davranış, elektronik bileşenlerde birim zamanda yüksek sıcaklık artışına ve güvenilir çalışma sürelerinin kısılmasına sebep olmaktadır.

FDM'nin termal cevabının ve termal kontrol sistem performansının iyileştirilmesine yönelik olarak farklı yöntemler (kanatçık, metal matris ve nano partükül uygulamaları) birçok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar; araştırmacı ve araştırma alanları/incelenen parametreleri kapsayacak formda özet halinde Tablo1.3'de ve ayrı bölümler halinde aşağıda verilmektedir.



Tablo 1.3. Araştırmacı ve araştırma alanları

Araştırmacı	Araştırma alanları
<p>a) Bütünleşik ısıtıcı yerleşimi</p> <p>Zhang ve Bejan (1989), Pal ve Joshi (1997 ve 2001), Hodes vd. (2002), Krishnan ve Garimella (2004), Kandasamy (2007), Yang and Wang (2012), El- Omari (2011), Tan ve Fok (2012), Ge ve Liu (2013), Shokouhmand ve Kamkari (2013), Kamkari vd. (2014a), Kamkari vd. (2014b), Lu vd. (2014), Yang vd. (2016), Joneidi, vd. (2017), Zennouhi vd. (2017), Kamkari ve Amlashi (2017).</p> <p>b) Ayrık ısıtıcı yerleşimi</p> <p>Zhang vd.(1993), Zhang vd.(1994), Ju vd. (1998), Binet ve Lacroix (2000), Jianhua vd. (2001), Tan ve Tso (2004), Krishnan ve Garimella (2004), Faraji ve Qarnia (2009), Faraji ve Qarnia (2010a), Faraji ve Qarnia (2010b), Faraji ve Qarnia (2013), Gharbi vd. (2017), Srikanth ve Balaji (2017)</p>	<p>1. FDM ilaveli ısı alıcı sistemleri</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Güç seviyesi (sabit/değişken) ▪ Açısal konum ▪ FDM türü/miktarı ▪ Isı alıcı geometrisi ▪ Isıtıcı yerleşimi
<p>Wirtz vd. (1999), Wirtz ve Zheng (1999), Zheng ve Wirtz (2000), Zheng ve Wirtz (2000), Gurrum vd. (2002), Yoo and Joshi (2004), Akhilesh vd. (2005), Shatikian vd. (2005), Krishnan vd. (2005), Nayak (2006), Wang ve Mujumdar (2007), Wang vd. (2007), Wang vd. (2008), Kandasamy (2008), Shatikian vd. (2008), Saha vd. (2008), Fok vd. (2010), Setoh vd.(2010), Saha ve Dutta (2010), Parlak ve Etiz (2010), Hosseinizadeh vd. (2011), Jaworski (2011), Wang ve Yang (2011), Baby ve Balaji (2012), Stupar vd. (2012), Saha ve Dutta (2012), Suresh (2013),</p>	<p>2. FDM ilaveli ısı alıcı sistemleri: kanatçık etkisi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Güç seviyesi (sabit/değişken) ▪ Geometrik parametreler (kanatçık sayısı/geometrisi) ▪ FDM türü/miktarı ▪ Açısal konum ▪ Boy/en oranı ▪ Doğal taşınım

Tablo 1.3.'ün devamı

Araştırmacı	Araştırma alanları
<p>Saha ve Dutta (2013), Baby ve Balaji (2013a), Baby ve Balaji (2013b), Mahmoud vd. (2013), Levin vd. (2013), Fan vd. (2013), Baby and Balaji (2014), Saha ve Dutta (2015), Pakhrough vd. (2015), Pakhrough vd. (2015b), Tiari vd. (2015), Sahoo vd. (2016a), Kalbasi ve Salimpour (2015a), Gharbi vd. (2015), Kalbasi ve Salimpour (2015b), Alayil ve Balai (2015), Sahoo vd. (2016b), Ali ve Arshad (2017), Arshad vd. (2017) Ashraf vd. (2017), Arshad vd. (2018a), Arshad vd. (2018b), Ali vd. (2018), Kamkari ve Groulx (2018), Ji vd. (2018), Karami ve Kamkari (2019)</p>	<p>2. FDM ilaveli ısı alıcı sistemleri: kanatçık etkisi (devam).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Güç seviyesi (sabit/değişken) ▪ Geometrik parametreler ▪ FDM türü/miktarı ▪ Açısal konum ▪ Boy/en oranı ▪ Doğal taşınım
<p>Alawadhi ve Amon (2003), Qu vd. (2012), baby ve balaji (2013b), Krishnan vd. (2007), Lafdi vd. (2007, 2008), Dukhan ve Bodke (2010), Li vd. (2012), Zhao vd. (2012), Sundarram ve Li (2014), Chen vd. (2014 a), Chen vd.(2014 b), Yang vd. (2015), Zhu vd. (2016), Zhang ve He (2017).</p>	<p>3. FDM ilaveli ısı alıcı sistemleri: metal/kompozit matris etkisi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Güç seviyesi (sabit/değişken) ▪ Gözeneklilik/Gözenek yoğunluğu/Gözenek boyutu ▪ Açısal konum ▪ FDM türü
<p>Khodadadi ve Hosseneizadeh (2007), Weinstein vd. (2008), Sanusi vd. (2011), Zhao vd. (2011), Chintakrinda vd. (2011), Chintakrinda vd. (2012), Sebti vd. (2013), Khodadadi vd. (2013), Fan vd. (2015), Dhaidan vd. (2013), Motahar vd. (2017)</p>	<p>4. FDM ilaveli ısı alıcı sistemleri: nano partikül etkisi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nano partikül oranı/türü/şekli ▪ Güç seviyesi ▪ AR oranı

1.4.1. FDM Etkisinin İncelendiği Çalışmalar

FDM ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin incelendiği çalışmalar bütünleşik ve ayırık ısıtıcı düzenlemeleri için özet formunda Tablo 1.4’de ve açık formda aşağıda verilmiştir.

a) Bütünleşik ısıtıcı yerleşimi

Dikdörtgen bir prizma içerisindeki FDM’nin erime davranışını sabit ısı akısı sınır koşulu altında inceleyen ilk deneysel çalışmalardan biri Zhang ve Bejan (1989) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kapalı ortam içerisindeki FDM’nin (n-octadecane) erime davranışı, yüksek Rayleigh (Ra) sayıları için deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Deneysel kısımda, farklı ısı güç oranları (Rayleigh sayısı, Ra) ve aşırı soğuma (Stefan sayısı, Ste) etkisi araştırılmıştır. Rayleigh sayısındaki artış ile maksimum sıcaklığa ulaşma süreleri kısalırken, aşırı soğuma etkisinin artışına bağlı olarak sıcaklık artış hızının azaldığı belirtilmiştir. FDM içerisindeki ve sıcak yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımları, kısıtlı erime ara yüzey görüntüleri ile desteklenmiş ve doğal taşınım mekanizmasının etkisi vurgulanmıştır. Analitik kısımda ise taşınım rejimi içerisindeki aşırı ısınma etkisi sınır tabaka çözümü ile incelenmiştir. Ayrıca, sınır tabaka teorisi yaklaşımı kullanılarak Nusselt ve Rayleigh sayıları arasında bir korelasyon geliştirilmiştir.

Pal ve Joshi (2001), benzer bir geometri için erime sürecindeki doğal taşınım etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştirler. Erimenin ilerlemesi ile doğal taşınım ısı transfer mekanizmasının etkin hale geldiği ve sürecin devamında sıcaklık gradyanındaki değişime bağlı olarak etkisinin azaldığı vurgulanmıştır. Ayrıca, hacimsel erime oranı ve yüzeydeki ortalama Nusselt (Nu) ifadeleri için ampirik bir bağıntı ortaya konmuştur.

Pal ve Joshi (1997), elektronik bir ekipmanın (çoklu işlemci modülü) termal davranışını FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesi için sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, iki farklı FDM yerleşimine ait düzenleme, farklı ısı güç, FDM türü ve miktarı ve açısal konum için test edilmiştir. FDM ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin yüksek güç yoğunluğuna sahip zaman bağımlı sistemler için etkin bir soğutma yöntemi olduğunu ortaya koymuşlardır. Düşey konum için sıvı faz içerisindeki doğal taşınım mekanizmasının etkinliği ile daha düşük yüzey sıcaklıklarının elde edildiği ve elektronik ekipmanın termal performansının iyileştirildiği vurgulanmıştır.

Benzer bir çalışma, Hodes vd. (2002) tarafından taşınabilir bir elektronik ekipman (Handset) için gerçekleştirilmiştir. FDM türü, açısal konum ve ısı yükün termal performans üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştirler. Çalışmada, FDM kullanımı

ile çalışma sürelerinin uzadığı belirtilmiş ve düşük erime sıcaklığına sahip FDM'nin daha iyi performans sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, konum etkisinin sistem performansı üzerinde kısıtlı bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

Kandasamy vd. (2007), taşınabilir elektronik cihazların termal yönetimi için FDM- ilaveli ısı depolama ünitesi tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Sistemin termal performansı; farklı ısı yüklemeler, konum açısı ve erime / katılma çevrimleri için periyodik / periyodik olmayan çalışma koşulları altında deneysel ve sayısal olarak test edilmiştir. Düşük güç seviyelerinde erime sürelerinin daha uzun olmasına bağlı olarak ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının düşük olduğu gözlenmiştir. Açısız konum değişiminin sistemin termal performansı üzerindeki etki düzeyinin önemli olmadığı ve periyodik çalışma koşulları altında ısıtıcı ve yüzey sıcaklıklarının güvenilir sınırlar içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, ısı depolama ünitesi tasarımında en yüksek güç değerleri yerine ortalama güç değerinin dikkate alınmasının optimizasyon açısından daha uygun olacağı ortaya konulmuştur.

Tablo 1.4. FDM-ilaveli düzenleme

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Araştırma parametreleri
Zhang ve Bejan (1989)	Deneysel ve analitik/Erime	N-octadecane ($T_m = 28 \text{ }^\circ\text{C}$)	737x560x146	300-1600 W/m^2	Isıl yük, aşırı soğuma ve aşırı ısıtma
Pal ve Joshi (1997)	Sayısal (2-B*)/Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37 \text{ }^\circ\text{C}$) Bi/Pb/Sn/In ($T_m = 57 \text{ }^\circ\text{C}$)	82,4x82,4x7,6	7,5-30 W	Isıl yük, FDM miktarı ve konum açısı
Pal ve Joshi (2001)	Deneysel ve sayısal (2-B)/Erime	N-triacontane $T_m = 65,4 \text{ }^\circ\text{C}$	130x130x24.5	15 W	Doğal taşınım etkisi
Hodes vd. (2002)	Deneysel / Erime	Tricosane ($T_m = 48 \text{ }^\circ\text{C}$) ve Thermisorb-122 ($T_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$)	51x32x10	2, 3, 4 W	Isıl yük, konum açısı ve FDM türü
Tan ve Tso (2004)	Deneysel / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37 \text{ }^\circ\text{C}$)	47x24x8	4-16 W	Isıl yük
Kandasamy vd. (2007)	Deneysel ve sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	Parafin wax ($T_m=46-48 \text{ }^\circ\text{C}$)	132x76x10	2400-4800 W/m^2	Isıl yük (sabit ve değişken), konum ve erime/katılaşma çevrimi
Yang ve Wang (2012)	Sayısal (3-B) / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37 \text{ }^\circ\text{C}$)	63x50x15	2-4 W	Isıl güç ve açılal konum
El Omari vd. (2011)	Sayısal (2-B) / Erime	FDM ($T_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)	5x2.5 5x1.963 6.574x1.574 6.574x1.493 6.574x1.493	10000 W/m^2	Isı alıcı geometrisi
Ge ve Liu (2013)	Deneysel / Erime / Katılaşma	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ($T_m = 32 \text{ }^\circ\text{C}$) Parafin ($T_m = 40-43 \text{ }^\circ\text{C}$) N-eicosane Galyum ($T_m = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	40x40x3,5 26,2x20,2x5	1-3,5 W	Isıl yük ve FDM türü
Shokouhmand ve Kamkari (2013)	Deneysel / Erime	Laurik asit ($T_m = 43-48 \text{ }^\circ\text{C}$)	120x50x50	Sabit yüzey sıcaklığı	Sıcaklık farkı
Kamkari vd. (2014a)	Deneysel / Erime	Laurik asit ($T_m = 43-48 \text{ }^\circ\text{C}$)	120x50x120	Sabit yüzey sıcaklığı	Sıcaklık farkı ve açılal konum

Tablo 1.4.'ün devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Araştırma parametreleri
Lu vd. (2014)	Deneysel / Erime	N-hexadecanol ($T_m=49^\circ\text{C}$)	80x80x30	20/40 W	Isıl yük ve açısal konum
Yang vd. (2016)	Sayısal (2-B) Erime	Galyum ($T_m = 30^\circ\text{C}$) N-icosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	3(5,8,10)x10 (20,30,40)	$\Delta T = 5-25\text{ K}$ ve 30000-100000 W/m^2	Yüzey sıcaklığı, ısıl yük, FDM türü, Rayleigh sayısı ve en/boy oranı
Joneidi vd. (2017)	Deneysel / Erime	RT-35 ($T_m=29-36^\circ\text{C}$)	50x100x30	4,4 - 5,6 W	Isıl yük ve açısal konum
Zennouhi vd. (2017)	Sayısal / Erime (2-B)	Galyum ($T_m = 30^\circ\text{C}$)	120x50	Sabit yüzey sıcaklığı	Açısal konum
Kamkari ve Amlashi (2017)	Sayısal / Erime (2-B)	Laurik asit ($T_m = 43-48^\circ\text{C}$)	120x50x120	Sabit yüzey sıcaklığı	Yüzey sıcaklığı, açısal konum
Zhao vd. (2018)	Deneysel / Sayısal (2-B) Erime	N-Octadecane ($T_m = 28^\circ\text{C}$)	160x160x40	Sabit yüzey sıcaklığı	Açısal konum

El Omari vd. (2011), beş farklı geometrik düzenleme için ısı depolama ünitesinin termal analizini sabit ısıl yük altında sayısal olarak incelemişlerdir. Aynı FDM hacmi için yapılan kapsamlı analizde, incelenen ısı deposu geometrileri arasında en iyi performansın FDM hacminin üst kısma aktarıldığı dikdörtgen formun sağladığı belirtilmiştir.

Yang ve Wang (2012), FDM - ilaveli ısı alıcının termal performansını farklı güç seviyeleri ve açısal konum için sayısal olarak incelemişlerdir. FDM'nin hacimsel genişmesi çözüme dâhil edilmiştir. Erime ve katılaşma süreçleri için ısı alıcının termal analizi yapılmıştır. FDM kullanımı ile daha dengeli çalışma sıcaklıkları, artan güç seviyeleri ile daha yüksek çalışma sıcaklıkları elde edildiği; ayrıca, açısal konum etkisinin önemsiz olduğu belirtilmiştir.

Ge ve Liu (2013), taşınabilir elektronik sistemlerin (akıllı telefon) tanımlanan limit sıcak değerleri altında kullanımının iyileştirilmesine yönelik olarak bir ısı depolama ünitesi tasarımı ortaya koymuşlardır. Sabit ısıl yükleme altında, düşük erime sıcaklığına sahip

FDM'ler (metalik, parafin) için deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışma ile FDM - ilaveli ısı depolama ünitesinin taşınabilir elektronik ekipmanın termal performansını ve kullanım sürelerini iyileştirdiği gözlenmiştir. Metalik FDM'nin parafine kıyasla daha iyi bir performans sunduğu görülmüştür. Ayrıca, düşük erime sıcaklığına sahip metalik FDM'lerin akıllı telefonların soğutulmasında uygun olduğu ifade edilmiştir.

Shokouhmand ve Kamkari (2013), dikdörtgen kesitli kapalı bir ortam içerisindeki FDM'nin erime davranışını ve ısı geçişini sabit yüzey sıcaklığı altında deneysel olarak incelemiştir. Sıcaklık ölçümleri, erime ara yüzey görüntüleri ile desteklenmiştir. Yapılan çalışma ile erime sürecinin başlangıcında iletim, sonrasında taşınım mekanizmasının etkin olduğu ifade edilmiştir. Aynı çalışma grubu, (Kamkari vd., 2014a) açılma konum etkisini araştırma sorusuna dahil ederek önceki çalışmalarını tekrarlamışlardır. Yatay konuma sahip kapalı ortam için erime sürelerinin düşey konuma kıyasla kısaldığı belirlenmiştir. Kamkari ve Amlashi (2017), aynı problemi sayısal olarak incelemişler ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Lu vd. (2014), FDM - ilaveli bir ısı alıcının termal performansı farklı açılma konumları için deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler iki sabit ısı yükü altında gerçekleştirilmiştir. Isı alıcı termal performansının açılma konumunun bir fonksiyonu olduğu ve artan konum açısına bağlı olarak tanımlanan limit sıcaklığa ulaşma sürelerinin iyileştiği ortaya konmuştur.

Yang vd. (2016), kapalı ortam içerisindeki FDM'nin erime davranışını ve ısı geçiş mekanizmalarını sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı akısı sınır koşulları altında sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, FDM olarak düşük erime sıcaklığına sahip galyum ve n-eicosane kullanılmıştır. Etkin ısı transfer mekanizmasının; galyum için yüksek ısı iletim katsayısına bağlı olarak iletim, eicosane için ise doğal taşınım olduğu ortaya konmuştur. Artan ısı gücü ve sıcaklık farkları ile erime sürelerinin kısaldığı belirtilmiştir.

Joneidi vd. (2017), ısı yükü ve açılma konum etkisini FDM - ilaveli dikdörtgen kapalı bir ortam için deneysel olarak incelemiştir. Üç farklı ısı yükü ve açılma konum seviyesi çalışma parametreleri çalışılmıştır. Erime sürecine yönelik olarak katı-sıvı ara yüzey gelişimi fotoğraflanmıştır. Açılma konumunun artışı ile ortalama ısıtıcı yüzey ve FDM sıcaklıklarının ve toplam depolanan ısı miktarlarının arttığı belirlenmiştir.

Zennouhi vd. (2017), dikdörtgen kapalı bir ortam içerisindeki FDM'nin erime sürecini iki boyutlu sayısal bir model ile incelemiştir. Çalışmada, açılma konumunun akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkisi kapsamlı olarak araştırılmıştır. Azalan konum

açısına bağlı olarak (düşey konumdan yataya doğru) erime hızlarının arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, yatay konum için sıvı FDM içerisinde Benard taşınım hücrelerinin varlığı ortaya konulmuştur. Benzer bir çalışma, Zhao vd. (2018) tarafından deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmaların uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

b. Ayrık ısıtıcı düzenlemesi

Bütünleşik ısıtıcı düzenlemelerinde karşılaşılan asimetric erime davranışı, FDM-ilaveli ısı alıcı sistemlerinin termal performansını kısıtlayan en önemli sorunlardan biridir. Bu durum, araştırmacıların ilgisinin ayrık ısıtıcı düzenlemeleri konusuna yoğunlaştırmıştır. Isıtıcı yerleşim düzenlerinin incelenmesine yönelik mevcut çalışmalar özet formunda Tablo 1.5.'de ve açık formda aşağıda sunulmuştur.

Zhang vd. (1993), gömülü ayrık ısıtıcılara sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcı (dikdörtgen kapalı ortam) içerisindeki erime davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Düşey duvar üzerine yerleştirilen üç adet eş ısıtıcıya ait düzenlemenin test edildiği çalışmada, FDM-ilaveli durumun FDM-ilavesiz duruma kıyasla yaklaşık olarak % 50 daha düşük ısıtıcı yüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. FDM-ilaveli durum için, eş aralıklı düzenlemede kapalı ortamın üst bölgesindeki sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu ve katı-sıvı ara yüzeyin daha hızlı ilerlediği görülmüştür. Bu davranış, sıvı FDM içerisinde baskın role sahip olan doğal taşınım mekanizması ile açıklanmıştır. Termal performans açısından, ısıtıcı yerleşim düzeninin taban komşuluğuna kaydırılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Aynı çalışma grubu (Zhang vd., 1994), sınır tabaka teorisi yaklaşımını kullanarak mevcut problemi analitik olarak incelemişlerdir.

Ju vd. (1998), ayrık ve çıkıntılı ısıtıcı düzenlemelerine sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal davranışını incelemişlerdir. Isıtıcı yüzeyler üzerinde Nusselt sayısındaki değişim elde edilmiştir. FDM'nin erime davranışının katı/sıvı ara yüzünde doğal taşınım etkisi ile basamak formunu aldığı ve kapalı ortam içerisinde alt yarı bölgeye kıyasla üst yarı bölgede sıcaklıkların daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Gömülü ısıtıcı düzenlemesi referans alınarak yapılan kıyaslamada ise çıkıntılı ısıtıcı düzenlemesinin ısıtıcı yüzey sıcaklıkları açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum, çıkıntılı ısıtıcı düzenlemesinin pürüzlü bir yüzey oluşturarak doğal taşınımı iyileştirmesi ile açıklanmıştır.

Binet ve Lacroix (2000), dikdörtgen forma sahip bir ısı alıcının düşey iki yüzeyine gömülü formda yerleştirilen ayrık ısıtıcıların FDM'nin erime davranışına etkisini sayısal

ve deneysel olarak incelemişlerdir. Isıtıcı sayısı ve boyutu, ısıtıcılar arası mesafe ve kapalı ortamın en/boy oranı çalışma parametrelerini oluşturmaktadır. En/boy oranının azalması ile ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının azaldığı ve bu durumun, daha uzun erime sürelerine neden olduğu belirtilmiştir. Isıtıcı yerleşiminin yüksek en/boy oranları için erime davranışının üzerinde belirleyici bir parametre olduğu ortaya konmuştur. Isıtıcılar arasındaki mesafenin, alt bölgeye doğru azaltılması ile aşırı ısınma probleminin giderilebileceği vurgulanmış ve bu davranış, ısı alıcı üst bölgesinde meydana gelen baskın doğal taşım mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, toplam ısıl yük sabit olmak üzere, ayrık ısıtıcı yerleşiminin bütünleşik ısıtıcı kullanıma kıyasla daha iyi soğutma performansı sağladığı ortaya konmuştur.

Jianhua vd. (2001), alt yatay yüzeyine üç adet eş ayrık ısıtıcı yerleştirilen FDM-ilaveli bir ısı alıcıdaki erime sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, Stefan sayısı (farklı ısıl güç oranları), aşırı soğuma ve en/boy oranı araştırma parametresi olarak tanımlanmıştır. Yüksek Stefan sayısı (Ste) ve en/boy oranlarında erimenin sürecinin daha hızlı olduğu, aşırı soğumanın ise erime bölgesinin gelişimi ile etkisini kaybettiği belirtilmiştir.

Tablo 1.5. Ayrık ısıtıcı düzenlemesine ait çalışmalar

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Araştırma parametreleri
Zhang vd. (1993)	Deneysel / Erime	N-octadecane ($T_m=28^\circ\text{C}$)	100x60x50	600-1600 W/m ²	Isıtıcı düzeni (gömülü), ısıl yük ve aşırı soğuma
Zhang vd. (1994)	Analitik / Erime	N-octadecane ($T_m=28^\circ\text{C}$)	100x60x50	600-1600 W/m ²	Isıtıcı düzeni (gömülü) ve ısıl yük
Ju vd. (1998)	Deneysel / Erime	N-octadecane ($T_m=28^\circ\text{C}$)	100x60x60	750-2500	Isıtıcı düzeni (gömülü) ve aşırı soğuma.
Binet ve Lacroix (2000)	Deneysel ve Sayısal / Erime	N-octadecane ($T_m = 28^\circ\text{C}$)	190x20x400	50 W/m	Isıtıcı düzeni (gömülü) ve en/boy oranı
Jianhua vd. (2000)	Deneysel / Erime	N-octadecane ($T_m = 28^\circ\text{C}$)	100x120x60	2-6 W	Isıtıcı yerleşimi, ısıl yük ve en/boy oranı
Krishnan ve Garimella (2004)	Sayısal / Erime (2B)	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	30x7.5	10W/50W	Isıtıcı düzeni (gömülü), en/boy oranı ve ısıl yük
Faraji ve Quarnia (2009)	Sayısal / Erime (2B)	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	123x35	30-60 W/m	Isıtıcı düzeni (çıkıntılı) ve ısıl yük
Faraji ve Quarnia (2010a)	Sayısal / Erime (2B)	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	123x35	7,5-100 W/m	Isıtıcı düzeni (çıkıntılı) ve ısıl yük
Faraji ve El Qarnia (2010b)	Sayısal / Erime (2B)	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	122x30,55	7,5 W/m	Isıtıcı düzeni (çıkıntılı)
Tan ve Fok (2012)	Sayısal (3-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	28x100x50	2-8 W	Isıtıcı düzeni, ısıl yük
El Qarnia vd. (2013)	Sayısal / Erime (2B)	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	121x35	7,5-60 W/m	Isıtıcı düzeni (çıkıntılı), en/boy oranı ve ısıl yük
Gharbi vd. (2017)	Deneysel / Erime	Plastik parafin ($T_m = 51,75^\circ\text{C}$)	170x58x243	9000 (sabit) 18000 (periyodik) W/m ²	Isıtıcı düzeni (gömülü) ve ısıl yük (sabit ve periyodik)

Yatay olarak konumlandırılan FDM-ilaveli bir ısı depolama ünitesinin ısıtıcı yerleşim düzenine bağlı termal davranışı, Tan ve Tso (2004) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, gömülü ısıtıcılar eş ve eş olmayan ısı yükleri altında test edilmiştir. Eş yükleme durumuna kıyasla eş olmayan ısı yüklemesi durumunda, ısıtıcı yüzey üzerinde yerel sıcaklıklarının termal gerilmelere yol açacak düzeyde farklı değerlere ulaştıkları ortaya konmuştur.

Krishnan ve Garimella (2004), FDM-ilaveli bir ısı depolama ünitesinin soğutma performansını farklı ısı yük değişimi (atımlı güç yayılımı), en/boy oranı ve ısıtıcı yerleşim planları için sayısal olarak incelemiştir. Isı kaynaklarının alt yatay bölüme yerleştirilmesi durumunda en iyi termal performans sağlandığı ortaya konmuştur. En/boy oranının artışına bağlı olarak ısı kaybının arttığı ve ısı performansının iyileştiği belirlenmiştir. Atımlı güç uygulama sürelerinin daha kısa olduğu analizler için sıcaklıkların daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.

Faraji ve El Qarnia (2009), çıkıntılı ayrı ısıtıcıların kullanıldığı FDM-ilaveli bir ısı alıcının soğutma davranışını sayısal olarak incelemiştir. Rayleigh sayısının artışına bağlı olarak ısıtılan yüzeye ait sıcaklıkların özellikle üst bölgede oldukça yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Alt bölgedeki ısıtıcı elemanının taban yüzeye yakınlığı arttıkça yüzey sıcaklıklarının azaldığı ve güvenilir çalışma sürelerinin uzadığı görülmüştür. Aynı çalışma grubu başka bir çalışmada (Faraji ve El Qarnia, 2010 a), aynı problem için ısıtıcı kalınlığının değişimini de incelemiştir. Artan ısıtıcı kalınlıkları ile FDM'ye olan ısı transfer oranının iyileştiği ve güvenilir çalışma sürelerinin uzadığını belirlemiştir. Benzer bir çalışmada (Faraji ve El Qarnia, 2010 b), erime sürecindeki akış ve ısı transfer karakteristikleri boyutsuz parametreler üzerinden analiz edilmiştir. El Qarnia vd. (2013) incelemeyi kapalı ortam boy/en oranını ve ısıtıcı elemanlar arasındaki mesafeyi dahil ederek genişletmişlerdir. Isıtıcı elemanlar arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak çalışma sürelerinin kısaldığı belirtilmiştir. Bu durum, üst bölgedeki ısıtıcıların üst yatay duvara yaklaşması ve erime sürecinin hızlanması ile ilişkilendirilmiştir.

Gharbi vd. (2017), dikey konumlandırılmış ısıtıcı için ısı yük dağılımının ısı alıcı performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Isıtıcı yüzeyi üzerinde ve FDM içerisinde sıcaklık ölçümleri yapılmış ve problemde etkili olan ısı transfer mekanizmaları erime görüntüleri üzerinden tartışılmıştır. Sabit ısı yüklemesi durumuna kıyasla düşük çevrim sayısına sahip periyodik ısı yüklemelerin daha uzun çalışma sürelerine cevap verdiği belirlenmiştir.

1.4.2. FDM / Kanatçık Düzenlemesinin İncelendiği Çalışmalar

Kanatçık ilavesi, ısı transfer yüzey alanının artırılması ve düşük ısıl iletkenliğe sahip ortamlar içerisinde ısıl köprülerin oluşturulmasına dayanan pasif bir ısı transfer iyileştirme tekniğidir. Bu tekniğin FDM-ilaveli ısı alıcılara uygulanmasıyla, FDM'ye olan ısı geçişi önemli düzeyde artırılabilir ve böylelikle ısıtıcı yüzey üzerindeki yüksek sıcaklık gradyanları azaltılabilmektedir. Kanatçık etkisinin incelendiği çalışmalar özet formunda Tablo 1.6.'da ve bunlardan bazıları açık formda aşağıda verilmiştir.

Zheng ve Wirtz (1999), elektronik ekipmanın termal kontrolüne yönelik aktif ve pasif soğutma sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrid bir alıcı sistemin termal davranışını yarı ampirik matematiksel bir model ile incelenmişlerdir. Çalışmada, katı-katı faz değişim özelliğine sahip faz değiştiren madde ve dikdörtgen kesit levha kanatçık geometrisine sahip ısı alıcı kullanılmıştır. Termal performans açısından yüksek ısı iletim katsayısına sahip FDM'nin daha uzun çalışma süresi sağladığı gösterilmiştir. Aynı çalışma grubu (Zheng ve Wirtz, 2000), başka bir çalışmalarında kanatçık kalınlığı, sayısı ve yüksekliğini mevcut probleme dahil ederek analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Gurram ve Joshi (2002), içerisine metalik FDM'nin ilave edildiği mikrokanal ısı alıcı sistemlerinin termal performansını periyodik ısıl yüklemeler altında sayısal olarak incelenmişlerdir. FDM'nin etkinliği ve sıcaklık değişimleri ısıtıcı kalınlığı, kanal genişliği ve ısıl gücün bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Artan mikro kanal sayısı, azalan kanat genişliği ve ısıtıcı kalınlığının erime sürecini hızlandırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, mikro kanal malzemesinin sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Yoo and Joshi (2004), dikdörtgen (levha form) ve kare kesitli kanatçık geometrilerine sahip FDM-ilaveli hibrid bir ısı alıcının termal performansını periyodik ısıl yükleme altında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneyler, iki farklı zorlanmış taşınım koşulu altında gerçekleştirilmiştir. FDM-ilavesiz duruma kıyasla FDM-ilaveli durumda ısı alıcı yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu, kritik sıcaklığa ulaşma sürelerinin uzadığı ve faz değişim sürecinde termal dengenin oluştuğu gözlenmiştir. Dikdörtgen kesitli kanatçık geometrisinin daha fazla depolama hacmine cevap vermesi nedeniyle, kare kesitli kanatçık geometrisine kıyasla daha yüksek termal performansa ulaşmıştır.

Benzer bir çalışmada, Krishnan vd. (2005) levha tip kanatçık geometrisine sahip bir hibrid ısı alıcı sisteminin termal performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım etkisi sayısal analize dahil edilmiştir. Kanatçıkların FDM ile olan teması sadece uç kısımlardan sağlanmış ve böylelikle, kanatçıklar arasında zorlanmış hava akışına izin verilmiştir. Hava ile soğutmanın yetersiz olduğu veya olası arıza durumunda üretilen ısıнын FDM tarafından depolanması araştırma sorusu olarak tanımlanmıştır. Çalışmada; FDM türü, konumu, miktarı ve kanatçık kalınlığı etkisi incelenmiştir. Kanatçık sayısının, kanatçık kalınlığının, FDM miktarının ve derinliğinin artışına bağlı olarak ısı geçişinin önemli düzeyde iyileştiği ortaya konmuştur.

Tablo 1.6. FDM / kanatçık düzenlemesine ait çalışmalar

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Wirtz ve Zheng (1999)	Analitik	FDM (katı-katı) ($T_m = 81 \text{ }^\circ\text{C}$)	50,8x54,3x50,2	4,35-17,4 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Isıl yük ve FDM
Zheng ve Wirtz (2000)	Analitik	Pentagliserin (katı-katı) ($T_m = 83 \text{ }^\circ\text{C}$)	25,4x100x100 38,1x100x100	100-130 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı / yüksekliği / kalınlığı ve FDM
Gurram vd. (2002)	Sayısal (2-B)	Metalik FDM ($T_m = 223,5 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,1625x8	30-100 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Isıl yük, kanatçık sayısı / kalınlığı ve ısıtıcı kalınlığı
Yoo and Joshi (2004)	Deneysel ve sayısal (2-B) / Erime	50Bi/27Pb/13Sn /10Cd ($T_m = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)	70,95x60x28 59,95x59,95x28,05	35 W (periyodik)	Dikdörtgen kesitli (levha form) / kare kesitli gözenekli	Kanatçık geometrisi
Akhilesh vd. (2005)	Sayısal (2-B)	N-eicosane ($T_m = 34-37 \text{ }^\circ\text{C}$)	50x60	2000-25000 W/m^2	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık kalınlığı, ısıl yük ve FDM miktarı

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Krishnan vd. (2005)	Sayısal (2-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$) Heneicosane ($T_m = 40,4\text{ }^\circ\text{C}$), Suntech P116 ($T_m = 47\text{ }^\circ\text{C}$), Bi/Pb/Sn/Cd/In ($T_m = 47\text{ }^\circ\text{C}$)	100x1(7,5)	Sabit yüzey sıcaklığı	Dikdörtgen kesitli	Kanatçık kalınlığı, FDM konumu ve doğal taşınım
Shatikain vd. (2005)	Sayısal (2-B/3-B)	RT-25 ($T_m = 23-25\text{ }^\circ\text{C}$)	10x34x24	Sabit yüzey sıcaklığı	Dikdörtgen (levha form)	Kanatçık kalınlığı/ yüksekliği ve FDM kalınlığı
Akhilesh vd. (2005)	Sayısal (2-B)	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	50x60	2000-25000 W/m^2	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık kalınlığı, ısıl yük ve FDM miktarı
Nayak vd. (2006)	Sayısal (2-B/3-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	25x42x42	4-6 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) ve İğne kesitli (kare ve dairesel form)	Kanatçık geometrisi, kanatçık sayısı, ısıl yük ve doğal taşınım
Wang vd. (2007)	Sayısal (2-B) / Erime	Parafin wax ($T_m = 46-48\text{ }^\circ\text{C}$)	12x22	Sabit yüzey sıcaklığı	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Açısal konum ve FDM miktarı
Shatikain vd. (2008)	Sayısal (2-B) / Erime	RT-25 ($T_m = 23-25\text{ }^\circ\text{C}$)	10x34x24	25000 / 50000 / 75000 W/m^2	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Isıl güç, kanatçık kalınlığı ve yüksekliği, FDM kalınlığı
Kandasamy vd. (2008)	Deneysel ve sayısal (3-B) / Erime	Parafin wax ($T_m = 53-57\text{ }^\circ\text{C}$)	16x14x12.5 31x31x10 30x30x18	2-6 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) ve Eliptik kesitli	Kanatçık geometrisi ve ısıl yük

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Wang vd. (2008)	Sayısal (2-B) / Erime	Parafin wax ($T_m = 46-48\text{ }^\circ\text{C}$) N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$) Heneicosane ($T_m = 40.4\text{ }^\circ\text{C}$) Suntech P116 ($T_m = 47\text{ }^\circ\text{C}$)	12x22	Sabit yüzey sıcaklığı	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Sıcaklık farkı en/boy oranı, FDM miktarı, ve FDM türü
Saha vd. (2008)	Deneyisel ve sayısal (2-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	42x42x25	4/8 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) ve Kare kesitli (iğne form)	Kanatçık geometrisi ve kanatçık sayısı
Fok vd. (2010)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	78x65x14 84x65x14	3-5 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı ve ısıl yük ve açılmal konum
Setoh vd. (2010)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	78x65x14 84x65x14	3-5 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı ve ısıl yük
Parlak ve Etiz (2010)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	FDM-A95 ($T_m = 95\text{ }^\circ\text{C}$) FDM- S89 ($T_m = 89\text{ }^\circ\text{C}$)	264.504,0 mm ³	12,9 W	Kare kesitli (iğne form)	FDM türü
Saha ve Dutta (2010)	Sayısal (2-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	8x19,64	11337-34013 W/m ²	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Isıl yük ve en/boy oranı
Hosseinizadeh vd.(2011)	Deneyisel ve sayısal (2-B/3-B) / Erime	RT-80 ($T_m=81\text{ }^\circ\text{C}$)	56x36x36	25-45 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı/ kalınlığı/ yüksekliği ve ısıl yük

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Wang ve Yang (2011)	Sayısal (3-B) / Erime / Katılaşma	N-eicosane (T _m = 34-37 °C)	63x50x15	2-4 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı, ısıl yük, açılmal konum
Jaworski (2012)	Sayısal (2-B) / Erime	Laurik asit (T _m =43-48°C)	50x50x60	19,5/37,5 W	Dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık sayısı/ kesiti, ısı alıcı taban kalınlığı
Baby ve Balaji (2012)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane (T _m = 34-37 °C)	20x66x48	2-7 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) ve Kare kesitli (iğne form)	Kanatçık geometrisi, ısıl güç.
Saha ve Dutta (2012)	Deneyisel ve sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	N-eicosane (T _m = 34-37 °C)	22x36x36	4/6,5/12 W (periyodik)	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Isıl yük, ısı taşınım katsayısı, çevrim süreleri
Stupar vd. (2012)	Sayısal (2-B)	Octadecane (T _m = 28 °C) Eicosane (T _m = 34-37 °C) Heneicosane (T _m = 40 °C) Suntech P116 Metalik Alaşım (T _m = 42 °C) PG (katı-katı) (T _m = 83 °C)	100X58x110	330 W (periyodik)	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı/ kalınlığı ve FDM türü/ miktarı
Saha ve Dutta (2013)	Sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	N-eicosane (T _m = 34-37 °C)	25x42x42	3400 W/m ² (periyodik)	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı/ kalınlığı/ Yüksekliği ve ısı taşınım katsayısı
Baby ve Balaji (2013a)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane (T _m = 34-37 °C) Paraffin wax (T _m =53-57°C)	20x66x48	4-10 W	Kare kesitli (iğne form)	Isıl güç, FDM miktarı ve FDM türü

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Baby ve Balaji (2013b)	Deneyisel / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	20x66x48	2-7 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık kalınlığı ve Isıl yük
Mahmoud vd. (2013)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	FDM-HS29P ($T_m=29^\circ\text{C}$) FDM-HS34P FDM-OM37P FDM-HS58P RT-42 ($T_m=42^\circ\text{C}$)	46x46x23	3, 4, 5 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) / Çapraz / palpeteği	Kanatçık geometrisi, ısıl yük ve FDM türü
Levin vd. (2013)	Sayısal (2-B) / Erime	FDM ($T_m=53-57^\circ\text{C}$)	115x200x200	200 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı/ Kalınlığı/ yüksekliği ve FDM hacmi
Fan vd. (2013)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$) 1-hexdecanol ($T_m = 46,8^\circ\text{C}$)	16x74x70	60-120 W	Kesiştirilmiş (çapraz)	Isıl yük, FDM türü
Suresh vd. (2013)	Deneyisel / Erime	Parafin wax	38x56x56	20, 35, 45 W	Dikdörtgen kesitli (levha form) ve Kare / Dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık geometrisi ve ısıl yük
Kamkari ve Shokouhmand (2014b)	Deneyisel / Erime	Laurik asit ($T_m = 43-48^\circ\text{C}$)	120x50x120	Sabit yüzey sıcaklığı	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı ve sıcaklık farkı
Baby ve Balaji (2014)	Deneyisel / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	20x66x48	5-10 W (sabit ve zaman bağımlı)	Kesiştirilmiş (çapraz)	Isıl yük, FDM miktarı ve limit çalışma sıcaklığı

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Pakrough vd. (2015a)	Sayısal (3-B) / Erime	RT-44HC ($T_m = 41-45 \text{ }^\circ\text{C}$)	15x70x70	50 W	Kare kesitli (iğne form)	Kanatçık sayısı/ kalınlığı/ yüksekliği
Pakrough vd. (2015b)	Sayısal (3-B) / Erime	RT-44HC ($T_m = 41-45 \text{ }^\circ\text{C}$)	15x70x70	50 W	Kare kesitli (iğne form)	Kanatçık sayısı/ kalınlığı/ yüksekliği, ısıtıcı taban kalınlığı ve limit çalışma sıcaklığı
Gharbi vd. (2015)	Deneysel / Erime / Katılma	Plastik FDM ($T_m = 51,5 \text{ }^\circ\text{C}$) FDM/silicon ($T_m = 37 \text{ }^\circ\text{C}$) FDM/grafit ($T_m = 37 \text{ }^\circ\text{C}$)	51,5x25,5x16,5	4 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı, FDM türü ve katılma periyodu
Kalbasi ve Salimpour (2015a)	Analitik / Erime (2-B)	RT-27 ($T_m = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,25<en/boy<16	30 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı, en/boy oranı,
Kalbasi ve Salimpour (2015b)	Analitik (2-B) / Erime	RT-27 ($T_m = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	1<en/boy<26	30 W	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı/ uzunluğu ve en/boy oranı
Tiari vd. (2015)	Sayısal (2B) / Erime	FDM (KN03) ($T_m = 335 \text{ }^\circ\text{C}$)	254x254	40000	Dikdörtgen (levha form)	Isı borusu, Kanatçık sayısı, doğal taşınım
Alayil ve Balaji (2015)	Sayısal (3-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37 \text{ }^\circ\text{C}$)	21x67,1x58,4	5 W	Kesiştirilmiş (çapraz)	Kanatçık sayısı / kalınlığı

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Sahoo vd. (2016a)	Derleme çalışması					
Sahoo vd. (2016b)	Sayısal (2-B) / Erime	FDM	0,7x0,5	$Q^*=0,5$ (boyutsuz ısı akısı)	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Ortotropik kanatçık ve ısıl yük
Srikanth ve Balaji (2017)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37$ °C)	20x66x48	6 W	Kare kesitli (iğne form)	Isıtıcı düzeni (gömülü) ve ısıl yük
Arshad vd. (2017)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	Parafin wax ($T_m = 56-58$ °C)	20x100x100	1580-3174 (16-32W)	Kare kesitli (iğne form)	Kanatçık kalınlığı, ısıl yük ve FDM miktarı
Ali ve Arshad (2017)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37$ °C)	20x100x100	800-2800 W/m ²	Dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık kalınlığı, ısıl yük ve FDM miktarı
Ashraf vd. (2017)	Deneyisel / Erime	Paraffin wax ($T_m=56-58$ °C) N-eicosane ($T_m = 34-37$ °C) RT-54HC RT-44HC RT-35HC SP-1	20x56x57	2000-3200 W/m ²	Kare/dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık geometrisi/ yerleşimi, ısıl yük ve FDM türü
Arshad vd. (2018a)	Deneyisel / Erime / Katılaşma	Parafin wax ($T_m = 56-58$ °C)	20x100x100	1600-3200 W/m ²	Dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık çapı ısıl yük ve FDM miktarı

Tablo 1.6.'nın devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Kanatçık geometrisi	Araştırma parametreleri
Arshad vd. (2018b)	Deneysel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$)	20x100x100	790-3170 W/m^2	Kare kesitli (iğne form)	Isıl yük, kanatçık kalınlığı, FDM miktarı
Ali vd. (2018)	Deneysel / Erime	Parafin wax ($T_m=56-58\text{ }^\circ\text{C}$) N-eicosane ($T_m = 34-37\text{ }^\circ\text{C}$) RT-54HC RT-44HC ($T_m = 41-44\text{ }^\circ\text{C}$) RT-35HC SP-1	20x56x57	2000-3200 W/m^2	Üçgen/dikdörtgen/dairesel kesitli (iğne form)	Kanatçık kalınlığı, ısıl yük ve FDM ürü
Kamkari ve Groulx (2018)	Sayısal (2-B) / Erime	Laurik asit ($T_m=43-48\text{ }^\circ\text{C}$)	120x50	Sabit yüzey sıcaklığı, T_w	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı ve sıcaklık farkı
Ji vd. (2018)	Sayısal (2-B) / Erime	RT-42 ($T_m = 38-43\text{ }^\circ\text{C}$)	120x100	1500-3500 (3-7 W)	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık açısı/ uzunluğu ve ısıl yük
Karami ve Kamkari (2019)	Sayısal (2-B) / Erime	Laurik asit ($T_m=43-48\text{ }^\circ\text{C}$)	120x50	Sabit yüzey sıcaklığı, T_w	Dikdörtgen kesitli (levha form)	Kanatçık sayısı ve açılal konum

Akhilesh vd. (2005), FDM-ilaveli ve kanatçıklı bir ısı alıcısındaki ısı geçişini sayısal olarak incelemiştir. Skala analizi kullanılarak ısı alıcı kritik boyutları, kanatçık kalınlığı ve FDM miktarı arasında bir ilişki ortaya koymuşlardır. Yalnızca iletim mekanizmasının dikkate alındığı analizde, kanatçık kalınlığı ve FDM miktarı arasında uygun korelasyonlar geliştirmişlerdir.

Shatikain vd. (2005), kanatçıklı yüzeylere sahip ısı alıcı içerisindeki FDM'nin erime sürecini sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulu için sayısal olarak incelemiştir. FDM

içerisindeki iletim ve taşınım ısı transfer mekanizmaları, hacim değişimi, sıvı FDM içerisindeki yoğunluk ve viskozite değişimi ve ısı kayıpların birlikte ele alınması çalışmaya ilgili alanda öncü bir nitelik kazandırmaktadır. Isı alıcı yüksekliği, kanatçık kalınlığı ve FDM kalınlığını geniş bir çalışma aralığında parametrik olarak incelenmiştir. Kanatçık kalınlığındaki artış ile kanat üzerindeki sıcaklıkların üniforma yakın değerlere ulaştığı, kanatçık yüksekliğindeki artış (FDM miktarındaki artışa bağlı olarak) ile erime sürelerinin uzadığı belirlenmiştir. Doğal taşınım etkinliğinin, geometrik parametrelere ve sıvı FDM miktarına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Sonuçların genelleştirilmesi yönünden boyut analizi yapılmış ve Nusselt, Stefan ve Rayleigh sayıları arasındaki ilişkiler tanımlanmıştır. Aynı çalışma grubu (Shatikain vd., 2008) başka bir çalışmada problemi sabit ısı akısı sınır koşulu için incelemiştir.

Nayak vd. (2006), farklı kanatçık geometrilerine sahip (dairesel kesitli/içi boş, dikdörtgen ve kare kesitli iğne form) üç farklı ısı alıcı düzenlemesinin termal performansını farklı sınır koşulları altında sayısal olarak incelemiştir. İncelenen kanatçık geometrileri arasında en iyi performansı doğal taşınım mekanizmasına en fazla katkıyı sunan kare kesitli formun sağladığını ortaya koymuşlardır.

Wang vd. (2007), kanatçıklı forma sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal analizini sabit ısı akısı ve sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulları için sayısal olarak incelemiştir. Hacimsel genişlemenin dahil edildiği analizde konum açısı ve FDM miktarının ısı geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Artan FDM miktarları ile erime sürelerinin kısaldığı belirlenmiş ve bu durumun FDM içerisindeki baskın doğal taşınım mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. Konum açısının ise sistem performansı üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Wang vd. (2008), mevcut çalışmaya sıcaklık farkı, en/boy oranı ve FDM türünü dahil ederek analizi genişletmişlerdir. Sabit sıcaklık farkı için, artan sıcaklık farkı ile erime sürelerinin kısaldığını, değişken sıcaklık farkı uygulamalarında ise kare dalga formunun sinüsel forma kıyasla erime süresi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Düşük en/boy oranlarında erimenin daha hızlı gelişmesi ve kanat yüzeyi boyunca erimenin uniform karakterde olması çalışmanın önemli çıktıları arasındadır.

Kandasamy vd. (2008), FDM-ilaveli ve FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemelerinin termal kontrolünü deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel, üç farklı ısı alıcı düzenlemesi (dar levha kanatçık, geniş levha kanatçık ve eliptik kanatçık) farklı ısı yüklemeler altında (2-6W) kullanılmıştır. FDM kullanımının ısı alıcı termal performansını

iyileştirdiği ($>2W$) ortaya konmuştur. FDM'nin kullanılmadığı durum için ise eliptik ve geniş levha kanatçık formuna sahip ısı alıcı düzenlemelerinin dar levha kanatçık formuna kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir.

Saha vd. (2008), FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansı farklı kanatçık geometrileri (kare kesitli iğne/dikdörtgen levha form) ve kanatçık hacim oranları (kanatçık sayısı) için deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. İncelenen kanatçık formları arasında en düşük yüzey sıcaklıklarına % 8 kare kesitli iğne forma sahip kanatçık geometrisinin cevap verdiği belirlenmiştir. Aynı hacim oranı için ise kanatçık sayısının artışıyla termal performansın iyileştiği belirtilmiştir.

Saha ve Dutta (2010), levha form kanatçık geometrisine sahip bir ısı alıcı içerisindeki FDM'nin erime davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Isı alıcı boy/en oranının termal performans üzerindeki etkisi (Nusselt-Rayleigh) parametrik olarak araştırılmıştır. En/boy oranına bağlı olarak üç farklı ısı alıcı düzenlemesi test edilmiştir. Bunlar; sığ kapalı ortam ($boy/en \ll 1$), uzun kapalı ortam ($boy/en \gg 1$), dikdörtgen kapalı ortam ($1 \ll boy/en \ll 1$) şeklindedir.

Fok vd. (2010), taşınabilir elektronik cihazların soğutulmasına yönelik olarak genişletilmiş yüzey alanına sahip (levha form kanatçık) FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansı (erime/katılma) deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada FDM etkisi, kanatçık sayısı, açısal konum sabit ve değişken ısı yüklemeler altında incelenmiştir. FDM-ilaveli ısı alıcı içerisindeki kanatçık sayısının artırılması ile daha düşük yüzey sıcaklıkları elde edildiği ifade edilmiştir. Elektronik cihazın kullanım sıklığının az olduğu koşullarda FDM ve kanatçık ilavesinin gereksiz olduğu belirtilmiştir. Mevcut ısı yüklemeler için açısal konum etkisinin önemsiz olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, kanatçıklı yüzeye sahip FDM-ilaveli ısı alıcıların sürekli kullanımı olmayan koşullar için uygun bir soğutma yöntemi olmadığı belirtilmiştir. Benzer bir geometri, Wang ve Yang (2011) tarafından sayısal olarak incelenmiştir.

Parlak ve Etiz (2010), FDM-ilaveli bir ısı alıcı ile hava araçlarında kullanılan elektronik bir ekipmanın termal kontrolünü sabit ısı yük altında deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada ortalama ısı iletim katsayısının artırılmasına yönelik olarak kare kesitli iğne form kanatçık geometrisi kullanılmıştır. Isıl yük sekiz ısıtıcı yüzey üzerinden dağıtılmıştır. Farklı FDM türlerinin kullanıldığı çalışmada, ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının FDM kullanımı ile daha düşük değerler aldığı görülmüştür. İstenilen çalışma koşullarına en uygun erime aralığına sahip olması sebebiyle en iyi termal

performans inorganik FDM ile sağlanmıştır. FDM kullanımının zaman bağımlı problemler için uygun olduğu ifade edilmiştir.

Hosseinizadeh vd.(2011), FDM-ilaveli ısı alıcının termal performansını farklı kanatçık sayısı, kanatçık kalınlığı ve kanatçık yükseklikleri için altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Artan kanatçık sayısı ve yüksekliği ile birlikte sistem performansının iyileştiği ve yüzey sıcaklıklarının daha düşük seviyelere ötelendiği belirtilmiştir. Benzer bir çalışmada, Baby ve Balaji (2012), dikdörtgen (levha form) ve kare (iğne) kesitli kanatçık geometrilerine sahip FDM-ilaveli ısı alıcıların taşınabilir elektronik ekipmanların termal kontrolü için kullanımını farklı ısı yüklemeler altında deneysel olarak incelemiştir. Aynı hacimsel orandaki kanatçık geometrileri arasında en iyi performansı kare kesitli kanatçık geometrisinin sağladığı ortaya konmuştur.

Başka bir çalışmalarında Baby ve Balaji (2013 a), kare kesitli kanatçık geometrisine sahip bir ısı alıcının ısıl analizini kapsamlı olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yapay sinir ağları algoritması (YSA) kullanılarak ısı alıcının optimum geometrik düzeni belirlenmiştir. Baby and Balaji (2013 b), benzer bir çalışmalarında ise dikdörtgen levha form kanatçık geometrisi için YSA'yı kullanarak optimum kanatçık kalınlığını belirlemiştir.

Stupar vd. (2012), aktif ve pasif yöntemlerin birlikte kullanıldığı hibrid bir ısı alıcı sisteminin tasarımı için termal network modelini kullanarak bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Bu model metal matris uygulaması için genişletilmiştir. FDM ilaveli hibrid ısı alıcı kullanımının çalışma sıcaklıklarını azalttığı ifade edilmiştir. FDM'nin ısı depolama kapasitesinden sonsuz çevrim boyunca faydalanılmasının bir sonraki ısıl yüklemeye kadar tekrar katılması ile mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, en uygun ısı alıcı düzenlemesinin uygulamaya (atımlı veya periyodik) bağlı olduğu açıklanmıştır. Atımlı ısıl yük uygulama süresinin kısa olduğu durumlarda FDM'nin daha kısa sürede erime sürecine dahil olması amacıyla gözenekli metal matris kullanımı önerilmiştir. Metal matris ile termal performansın iyileştiği gösterilmiştir.

Jaworski (2012), yaptığı sayısal çalışmada içerisine FDM'nin ilave edildiği çapları 1,5-3 mm arasında değişen boruları ısı transfer yüzey alanı olarak kullanmıştır. Tasarlanan kanatçık geometrisi ile kanatçıklar arasında fan ile hava akışına izin verilmiştir. Nominal çalışma koşullarında, boru dış çapı, boru sayısı, borular arası mesafe ve ısı alıcı taban yüzey kalınlığı değişken parametreler olarak kullanılarak; termal direnç değişimleri ortaya konmuştur. Hava akışının nominal ve düşük olduğu durumlarda (fan arızası vb.) tasarlanan FDM-ilaveli ısı alıcı geometrisi ile termal performansın iyileştiği ortaya konmuştur.

Saha ve Dutta (2012), Yoo ve Joshi (2001)'nin inceledikleri problemi periyodik ısıl yüklenme altında sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmadan farklı olarak sonsuz çevrime cevap verebilecek bir sistem tasarımı hedeflenmiştir. FDM ilavesinin levha form kanatçık içerisinde oluşturulan gözenekli bir yapı içerisine yapıldığı ve kanatçıklar arasında ısı taşınımı ile ısı transferinin gerçekleştiği vurgulanmalıdır. Isı alıcı sisteminin sürekli olarak kullanılabilmesine imkân sağlamak amacıyla, katı/sıvı ve sıvı/katı dönüşümlerinin gerekliliği ve katılaşma sürelerinin erime çevrimlerinden daha uzun olduğu belirtilmiştir. Isı taşınım katsayısının ve çevrim sürelerinin FDM'nin katılaşma süreci üzerinde baskın bir role sahip olduğu ifade edilmiştir. Tasarlanan FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri ile katılaşma sürelerinin önemli ölçüde kısaldığı ortaya konmuştur. Diğer bir çalışmalarında, Saha ve Dutta (2013) periyodik ısıl yük altında çalışan levha form kanatçık geometrisine sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansını entalpi yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Isı taşınım katsayısı, kanatçık sayısı, kanatçık kalınlığı, kanatçık yüksekliği ve FDM içerisindeki doğal taşınım etkisi araştırma parametreleri olarak tanımlanmıştır. Ulaşılan kapsamlı sonuçlar, FDM-ilaveli ısı alıcının termal tasarımında geometrik parametrelerin sıvı faz içerisindeki doğal taşınımı ve buna bağlı olarak termal performansı önemli düzeyde etkilediği ortaya konmuştur.

Suresh vd. (2013), üç farklı kanatçık geometrisine (dikdörtgensel levha form, kare ve dairesel kesitli iğne form) sahip FDM-ilaveli ısı alıcıların ısı analizini sabit ısıl yüklemeler altında deneysel olarak incelenmişlerdir. Dairesel kesitli iğne form kanatçık geometrisinin en iyi soğutma performansını sağladığı belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin, kesintili çalışma koşulları ve düşük ısıl yüklemeler için daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Mahmoud vd. (2013), çapraz (kesiştirilmiş) kanatçık ve bal peteği düzenlemelerinin sistem performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. FDM türü ve ısıl yüklenme, değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Bal peteği düzenlemesinin düşük yüzey sıcaklıkları sağlanmasının yanı sıra hafiflik, kolay kullanım ve düşük maliyet açısından diğer kanatçık düzenlemesine kıyasla tercih edilebilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Levin vd. (2013), gizli ısı depolama ünitelerinin boyutlarının minimize edilmesine yönelik olarak iki-boyutlu sayısal model üzerinden optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen modelde taşınım etkileri ihmal edilmiş ve model iletim ile ısı transfer mekanizması üzerine kurulmuştur. Isı depolama ünitesinin optimizasyonunda, kanatçık sayısı, kalınlığı ve yüksekliği araştırma parametresi olarak

tanımlanmıştır. Kanatçık sayısındaki artışın kritik çalışma sürelerinin uzatılması üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ortaya konulmuştur.

Fan vd. (2013), kanatçıklı yüzeylere (çapraz) sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansını erime/katılma periyodu için yüksek ısı yükleri altında deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, benzer termofiziksel özelliklere sahip, ancak erime sıcaklıkları farklı olan iki farklı FDM kullanılmıştır. Yüksek erime sıcaklığına sahip FDM ile daha uzun çalışma süreleri sağlanmış olmasına rağmen, düşük erime sıcaklığına sahip FDM'nin erime sürecindeki performansının daha iyi olduğu görülmüştür. FDM seçiminin önemli ölçüde çalışma koşullarına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Kanatçık kullanımının erime sürecinde termal direncin ve bileşen sıcaklıklarını azalttığı ifade edilmiştir; ancak, FDM'nin katılma sürecinde hissedilir düzeyde bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Tan ve Fok (2012), FDM-ilaveli ısı depolama ünitesinin termal performansını taşınabilir elektronik bir ekipman için sayısal olarak incelemiştir. Üç farklı ısı depolama ünite geometrisi farklı ısı güç seviyeleri altında test edilmiştir. Yapılan çalışma ile ayrık ısı kaynağı ve depolama ünitesi düzenlemeleri için aynı ısı güç değeri altında depolama sürelerinin uzadığı, ısıtıcı sıcaklıklarının ise daha düşük değerler aldığı ifade edilmiştir. Düşük ısıtıcı güçlerinde erime oranı, boyutsuz sayı Fourier x Stefan'nın fonksiyonu olarak ifade edilebilirken, yüksek ısıtıcı güçlerinde doğal taşınımın baskın olması sebebiyle sürece Rayleigh sayısında eklenmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Kamkari vd. (2014 b), ısıtıcı yüzey üzerine yatay olarak konumlandırılan kanatçık düzenlemesinin FDM'nin erime davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Artan kanatçık sayısı ile erime sürelerinin kısaldığı ve toplam ısı transfer oranının arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, ortalama Nusselt sayısının ve erime oranının tahmini için iki farklı ampirik bağıntı geliştirmişlerdir. Kamkari ve Groulx (2018), mevcut probleme açısal konum etkisini dahil ederek çalışmayı genişletmişlerdir. Açısal konumun erime ara yüzeyinin ilerleme hızını ve formunu değiştirdiğini belirtmişlerdir. Karami ve Kamkari (2019), mevcut problemi sayısal olarak incelemiştir. Ji vd. (2018), benzer bir geometri (Kamkari vd., 2014 b) için kanatçık açısı, kanatçık uzunluğu ve ısı yükünün sistem performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. Aşağı yönlü kanatçık açısının erime hızlarını arttırdığı ve kanatçık uzunluğunun açılı kanatçık durumları için erime sürecinde önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

Baby ve Balaji (2014), çapraz kanatçık geometrisine sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının ısı transfer sürecini deneysel (erime/katılma) olarak incelemiştir. FDM

miktarı ve limit çalışma sıcaklıkları değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Sabit ısı yükü altında, kanatçık ilaveli durumun kanatçiksiz duruma kıyasla çalışma sürelerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Sabit çalışma süreleri için aralıklı ısı yüklemeye durumunda artan ısı güç seviyeleri ile kritik sıcaklık değerlerinin önemli ölçüde düştüğü belirtilmiştir. İlgili sistemlere ait optimizasyon çalışmalarında, ısı yüklemeye durumunun belirleyici bir rol üstlendiği ve dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Alayil ve Balaji (2015), benzer bir problemi sayısal olarak incelemişlerdir. YSA yaklaşımının kullanıldığı çalışmada en uzun çalışma süreleri için optimum kanatçık parametrelerini (kanatçık sayısı ve kalınlığı) belirlemişlerdir.

Pakrough vd. (2015 a), kare kesitli iğne form kanatçıklı yüzeylere sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal modelde faz dönüşümü sırasındaki hacimsel genleşme ve sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım etkileri dikkate alınmıştır. Kanatçık sayısı, kalınlığı ve yüksekliğini kapsayan farklı geometrik düzenlemeler sabit ısı akısı sınır koşulunda test edilmiştir. Artan kanatçık sayısı, kalınlığı ve yüksekliği için ısı alıcı taban sıcaklıklarının önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. Pakrough vd. (2015 b), başka bir çalışmada Baby ve Balaji (2013 b)'den farklı olarak tüm kritik geometrik parametreleri dikkate alarak kare kesitli iğne forma sahip ısı alıcı için optimizasyon çalışması (Taguchi yöntemi) gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon için kanatçık sayısı, kalınlığı, yüksekliği ve ısıtıcı yüzey kalınlığı farklı kritik çalışma sıcaklık değerlerinde test edilmiştir. Kritik çalışma sıcaklığa ulaşma süreleri dikkate alınarak yapılan karşılaştırmada, ısıtıcı taban kalınlığının diğer araştırma parametrelerine kıyasla düşük bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

Gharbi vd. (2015), FDM/silikon matris, FDM/grafit matris ve FDM/kanatçıklı yüzey düzenlemelerine sahip FDM-ilaveli ısı alıcıların termal performansını sabit ısı yükü altında deneysel olarak incelemişlerdir. FDM/grafit matris yapısının FDM/silikon matris düzenlemesine göre termal performans üzerinde daha fazla iyileşme sağladığı görülmüştür. Aynı bakır oranına sahip uzun ve geniş aralıklı kanatçık düzenlemesinin tüm durumlar içerisinde en uzun kritik süreyi sağladığı ifade edilmiştir. FDM'nin ısı iletiminin iyileştirilmesine yönelik yapılan düzenlemelerin FDM'nin katılma davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Kalbasi ve Salimpour (2015 a), düşey levha form kanatçık geometrisine sahip FDM ilaveli bir ısı alıcının termal davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Bejan (1997) tarafından ifade edilen Constructal Teori yaklaşımı ile FDM-ilaveli ısı alıcının

optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. En/boy oranı, kanatçık sayısı ve kalınlığı, FDM miktarı değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Kanatçık kalınlığı oranının güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu görülmüştür. FDM-kanatçık temas yüzey alanının aynı, ancak en/boy oranının fazla olduğu ısı alıcı düzenlemelerinde doğal taşınım etkisinin baskın bir rol aldığı ve termal performansı önemli düzeyde iyileştirdiği belirlenmiştir. Kanatçık sayısının yüksek olduğu durumda düşük en/boy oranlarının, düşük kanatçık sayılarında ise en/boy oranlarının daha yüksek olduğu ısı alıcı düzenlemelerinin daha yüksek termal performansa sahip olduğu belirtilmiştir. Kalbasi ve Salimpour (2015 b), başka bir çalışmada yatay olarak konumlandırılmış dikdörtgen levha şeklindeki kanatçık geometrisinin FDM-ilaveli ısı alıcının termal performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. En/boy oranı, kanatçık sayısı, kanatçık uzunluğu oranı ve sınırlanmış bölge sayısı araştırma parametreleri olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışma ile en uzun güvenilir çalışma süresinin belirli kanatçık sayısında elde edildiği gösterilmiştir. Sınırlanmış bölge sayısının az ve çok olduğu düzenlemeler için sırasıyla en/boy oranlarının yüksek ve düşük değerlerinde termal performansın iyileştiği belirlenmiştir.

Tiari vd. (2015), ısı boruları ile desteklenmiş ve genişletilmiş yüzey alanına sahip FDM-ilaveli bir ısı depolama ünitesinin termal davranışı sayısal olarak incelemiştir. Isı boruları arası mesafe, kanatçık sayısı ve uzunluğu ve doğal taşınım mekanizması gibi parametrelerin erime sürecine ve sistem performansına etkisi test edilmiştir. Yapılan çalışma ile sıvı FDM içerisindeki etkin doğal taşınım mekanizmasının erime sürecini hızlandırdığı ve daha düşük taban sıcaklıklarının elde edildiği ifade edilmiştir. Artan ısı borusu ve kanatçık sayısına bağlı olarak benzer değişimler elde edilmiştir.

Sahoo vd. (2016 a), yatay ve düşey eksenlerde farklı ısı iletim katsayılarına sahip (ortotropik) kompozit malzemedeki yapılmış kanatçıklara (levha form) sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının performansını sayısal olarak incelemiştir. Sayısal model ile yatay ve düşey eksenler üzerindeki ısı iletimi oranları ve kanatçık kullanım oranı değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Ortotropik davranış, isotropik ısı iletimi ifadesine harici bir kaynak teriminin ilave edilmesi modellenmiştir. Ortotropik kanatçık düzenlemesi ile taban sıcaklıklarının önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. Ortotropik kanatçık düzenlemesi ile kanatçık sayısının azaltılabileceği ve böylelikle, malzeme ve ağırlık yönünden kazanım sağlanacağı, ayrıca daha stabil çalışma sıcaklıkları elde edileceği vurgulanmıştır.

Sahoo vd. (2016 b), yaptıkları derleme çalışması ile FDM içerisindeki ısı iletimin iyileştirilmesine yönelik olarak farklı düzenlemelere (kanatçık, metal matris, nanopartikül) sahip FDM ilaveli ısı alıcı sistemlerinin termal karakteristiklerini konu alan çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelemiş ve sunmuştur.

Srikanth ve Balaji (2017), kare kesitli iğne form kanatçık geometrisi için ayrık ısıtıcı ve ısı yük dağılımı etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Isıl yük dağılımı için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük dağılımının uniform olduğu durumda uniform olmayan duruma kıyasla çalışma sürelerinin daha uzun olduğu belirlenmiştir. Uniform olmayan ısı yüklemesi durumu için ayrık ısıtıcı düzenlemelerinin termal performans üzerinde önemli değişimlere neden olduğu ortaya konmuştur.

Arshad vd. (2017 ve 2018 a), kare kesitli iğne form kanatçık düzenlemesine sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal analizini deneysel olarak yapmışlardır. Çalışmada, farklı tasarım parametreleri (ısı gücü, kanatçık kalınlığı ve FDM oranı) dikkate alınarak elektronik bir ekipmanın güvenilir çalışma süresinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Deneysel farklı kritik çalışma sıcaklıkları için sabit ısı yük altında yapılmıştır. Yapılan çalışma ile FDM-ilaveli ısı alıcı performansının kanatçık kalınlığı ve FDM miktarı arasında güçlü bir ilişkinin olduğu belirtilmiştir. Bu analiz, dairesel kesitli iğne form kanatçık geometrisi için Ali ve Arshad (2017) ve Arshad vd. (2018 b) tarafından genişletilmiştir. Aynı çalışma ekibi Ashraf vd. (2017), kare ve dairesel kesitli iğne form kanatçık geometrilerinin sıralı ve çapraz yerleşiminin ısı alıcı termal performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Benzer çalışma koşulları altında farklı FDM'ler için deneyler tekrarlanmıştır. Dairesel kesitli iğne form kanatçık geometrisine ait sıralı yerleşim ile en uzun çalışma sürelerinin sağlandığı belirlenmiştir. Başka bir çalışmada ise Ali vd. (2018), üçgen, dikdörtgen ve dairesel kesitli iğne tip kanatçık geometrilerini mevcut analize dahil etmiş ve güvenli çalışma süresi üzerinden yapılan karşılaştırmada üçgen kesitli kanatçık geometrisinin en iyi termal performansı sağladığını ortaya koymuşlardır.

1.4.3. FDM / Metal Matris Düzenlemesinin İncelendiği Çalışmalar

Önceki bölümlerde de vurgulandığı üzere, FDM-ilaveli ısı alıcıların termal performansını kısıtlayan en önemli etken FDM'lerin sahip oldukları düşük ısı iletim katsayılarıdır. Bu durum, ısı geçişine karşı yüksek bir direncin oluşmasına ve FDM'nin

sınırlı düzeyde ısı depolama sürecine katılmasına (ölü bölge oluşumuna) neden olmaktadır. Son on yılda yapılan çalışmalar, farklı formlara sahip metal matris kullanımıyla FDM'nin ısı iletim davranışının önemli düzeyde iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Metal matrisler sahip oldukları kılcal iletim yolları ve yüksek yüzey alanı/hacim oranlarıyla ısıyı FDM'nin tüm hacmine yayabilmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar özet formunda Tablo 1.7'de ve bunlardan bazıları açık formda aşağıda verilmiştir.

Alawadhi ve Amon (2003), metal gözenekli ortam (metal köpük / metal matris) içerisine ilave edilen FDM düzenlemesine (FDM/metal matris) sahip bir ısı depolama ünitesinin termal performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Isıl güç (sabit ve değişken) ve Stefan sayısı araştırma parametreleri olarak tanımlanmıştır. Her iki ısıl güç uygulamasında artan ısıl yük için FDM'nin erime sürelerinin kısaldığı ve değişken ısıl yüklemeler için sıcaklık dalgalanmalarının azaldığı belirlenmiştir. Stefan sayısının artışına bağlı olarak ise erime sürelerinin önemli düzeyde uzadığı ortaya konmuştur.

Krishnan ve Garimella (2004), farklı ısı alıcı sistemlerinin (bakır blok, ısı alıcı ve metal matris) ve FDM'lerin (parafin wax ve metalik alaşımlar) termal performanslarını farklı ısıl yükler altında analitik ve sayısal olarak incelemiştir. Erime ve katılma süreçleri birlikte dikkate alınmıştır. Yapılan çalışma ile bakır blok ve metal matris/organik FDM düzenlemesine kıyasla metalik FDM'lerin daha düşük yüzey sıcaklıklarına cevap verdiği belirtilmiştir. Metalik FDM'nin yüksek ısı iletim katsayısına bağlı olarak termal performans üzerinde daha yüksek oranda bir iyileşme sağladığı ifade edilmiştir. Metalik FDM'nin yoğunluğunu yüksek olmasının termal kontrol sistemi için önemli bir kriter olarak belirtilmiştir. FDM ile çevre ortam arasındaki termal direncin yüksek olmasına bağlı olarak katılma sürelerinin uzun sürdüğü görülmüştür.

Krishnan vd. (2007), dikdörtgen kapalı bir ortam içerisindeki metal matrise emdirilen FDM'nin erime davranışını, atımlı ısıl yük altında sayısal olarak incelemiştir. Atımlı ısıl yük genişliği, Stefan sayısı ve Rayleigh sayılarının mevcut mekanizma üzerindeki etkileri test edilmiştir. Uygulanan atımlı güç genişliğinin ve sıvı FDM içerisindeki doğal taşınımın belirleyici bir etkiye sahip olduğu ve mevcut düzenlemede etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, FDM-ilaveli duruma kıyasla metal matris düzenlemesinde tepki sürelerinin daha hızlı olduğu ortaya konmuştur.

Lafdi vd. (2007), FDM/metal matris düzenlemesine sahip bir ısı depolama ünitesinin termal davranışını farklı gözenek oranları ve çapları için sabit ısıl yük altında deneysel olarak incelemiştir. Yüksek gözeneklilik değerleri ve büyük gözenek boyutlarına

kıyasla düşük gözeneklilik ve küçük gözenek boyutlarında daha düşük ısıtıcı yüzey sıcaklıklarına ulaşıldığı gösterilmiştir. Bu durum, düşük gözeneklilik değerlerinde metal matrisin iletim davranışındaki iyileşme ile ilişkilendirilmiştir. Mevcut problem Lafdi vd. (2008) tarafından, ısı güç, ısı alıcı geometrisi, açısal konum, kanatçık etkisi ve FDM özellikleri dahil edilerek sayısal olarak modellenmiştir. Açısal konum ve ısı alıcı geometrisinin FDM/metal matris ısı alıcı termal performansı üzerinde etkisinin önemli olduğu görülmüş ve ısı alıcı geometrisinin üste doğru genişlediği düzenlemede daha düşük yüzey sıcaklıklarının olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, periyodik ısı yüklemeler altında sistem performansının iyi sonuçlar sağladığı vurgulanmıştır. Benzer bir çalışma, Zhao vd. (2010) tarafından deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Katılma süreci çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Metal matris kullanımı ile FDM'nin katılma süresinin kısaldığı ifade edilmiştir. Oluşturulan sayısal modelin deneysel verileri yüksek doğrulukla temsil ettiği belirtilmiştir.

Qu vd. (2012), farklı metal matris geometrik düzenlemelerine sahip FDM-ilaveli ısı alıcının termal performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük gözeneklilik ve gözenek boyutu değerlerinde daha uzun çalışma sürelerinin elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım mekanizmasının etkinliği, FDM/metal matris ve sadece FDM ilaveli düzenlemeler için matematiksel bir eşitlik ile ortaya konulmuştur. Metal matris kullanımı ile katılma sürelerinin kısaldığı gözlenmiştir.

Zhao (2012), yaptığı derleme çalışması ile yüksek gözenek yoğunluğuna sahip (açık hücreli) metal matrislerin termal iletimini konu alan çalışmaları incelemiştir.

Baby ve Balaji (2013) yapmış oldukları çalışma ile açısal konum etkisini, FDM/metal matris ilaveli bir ısı alıcı düzenlemesi için deneysel olarak incelemişlerdir. Isı alıcı termal performansı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Sundarram ve Li (2014), FDM/metal matris ısı alıcı sistemindeki gözeneklilik ve gözenek boyutunun termal performans üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Gözenek boyutunun 100 mikrometrenin (mikro hücreli metal matris) altında olduğu durumlar için mevcut çalışmalarla benzer bulgular elde edilmiştir.

Tablo 1.7. FDM / metal matris düzenlemesine ait çalışmalar

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Matris malzemesi	Araştırma parametreleri
Alawadhi ve Amon (2003)	Deneysel/ Sayısal (3-B) / Erime	Octadecane ($T_m = 28^\circ\text{C}$) N-Eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$) Capric ($T_m = 31,5^\circ\text{C}$) Caprilic ($T_m = 16,3^\circ\text{C}$) Zn(NO ₃) ₆ H ₂ O	90x78x12	5-10 W	Alüminyum (Al)	Isıl yük, FDM ve Stefan sayısı
Krishnan ve Garimella (2004)	Sayısal (2-B) / Erime	Triacontane, Bi/Sn/In ($T_m = 0^\circ\text{C}$) Bi/Pb/Sn/In ($T_m = 57^\circ\text{C}$)	70x10	600/300 W	Alüminyum (Al)	FDM türü ve metal köpük
Krishnan vd. (2007)	Sayısal (2-B) / Erime	FDM	-	Sabit yüzey sıcaklığı (periyodik)	Alüminyum (Al)	Isıl yük, Stefan Sayısı ve Rayleigh sayısı
Lafdi vd. (2007)	Deneysel / Erime	Parafin wax ($T_m = 25,5^\circ\text{C}$)	102x51x102	28,9 W	Alüminyum (Al)	Gözenek yoğunluğu ve gözenek boyutu
Lafdi vd. (2008)	Sayısal (2-B) / Erime	N-eicosane ($T_m = 34-37^\circ\text{C}$)	100x50	100 W (Sabit) / 75W (periyodik)	Alüminyum (Al)	Gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu, kanatçık, ısıl yük ve açılal konum
Zhao vd. (2010)	Deneysel / Sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	RT58 ($T_m = 58^\circ\text{C}$)	25x200x120	38,4 W	Bakır (Cu)	Gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu ve ısıl yük
Dukhan ve Bodke (2010)	Deneysel / Erime / Katılaşma	Parafin wax ($T_m = 60^\circ\text{C}$)	101,6x101,6x101,6	82,3 W	Alüminyum (Al)	Gözenek boyutu
Qu vd. (2012)	Deneysel/ Erime/ Katılaşma	Parafin wax ($T_m = 53,46^\circ\text{C}$)	100x100x40	300.000 W/m ²	Bakır (Cu)	Gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu ve doğal taşınım
Li vd. (2012)	Deneysel / Sayısal/ Erime	Parafin ($T_m = 46,5-60,4^\circ\text{C}$)	100x45x100	4000 W/m ²	Bakır (Cu)	Gözenek yoğunluğu ve gözenek boyutu

Tablo 1.7.'nin devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Matris malzemesi	Araştırma parametreleri
Zhao (2012)	Derleme çalışması					
Baby ve Balaji (2013c)	Deneysel / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34-37$ °C)	20x66x48	5-10 W	Bakır (Cu)	Isıl yük ve açılal konum
Sundarram ve Li (2014)	Sayısal (3-B) / Erime	Parafin wax ($T_m = 48-62$ °C)	-	2,5 - 12,5 x 10 ⁸ W/m ³	Alüminyum (Al)	Gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu, ısıl yük ve ısı taşınım katsayısı
Chen vd. (2014)	Deneysel (2-B) / Sayısal / Erime	Parafin wax ($T_m = 55-60$ °C)	22x60x60	7,5 W	Alüminyum (Al)	Gözenekli ortam ve Rayleigh sayısı
Chen vd. (2014)	Derleme çalışması					
Yang vd. (2015)	Sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	FDM ($T_m = 306$ °C)	300x100	Sabit yüzey sıcaklığı	Bakır (Cu)	Değişken gözenek yoğunluğu
Zhu vd. (2016)	Sayısal (2-B) / Erime	RT-58 ($T_m = 48-52$ °C)	90x50	3800/5700 W/m ²	Alüminyum (Al)	Gözenek boyutu, ısı alıcı geometrisi ve ısıtıcı düzeni
Zhang ve He (2017)	Sayısal (3-B) / Erime	Parafin ($T_m = 52$ °C)	66x25,4x5,08	3000 W/m ²	Alüminyum (Al)	Değişken gözenek yoğunluğu

Chen vd. (2014), metal gözenekli ortam içerisindeki FDM'nin erime davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma ile metal matris kullanımının ısı transferini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Bu davranış, FDM içerisinde baskın role sahip olan iletim mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. Rayleigh sayısındaki artışın erime davranışı üzerindeki etkisinin ise yüksek sürtünme nedeniyle sınırlı olduğu belirtilmiştir.

Chen vd. (2014), metal matris içerisine emdirilen FDM düzenlemelerini kapsayan çalışmaları konu alan bir derleme çalışması yapmışlardır.

Yang vd. (2015), metal matris içerisindeki gözenek yoğunluğunun değişken olduğu ısı alıcı düzenlemesi için FDM'nin erime davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Metal matris gözenek yoğunluğunun alt bölgeden üst bölgelere doğru artışının ısı transferini iyileştirdiği ve erime sürelerini kısalttığını belirtmişlerdir. Değişken gözenek yoğunluğunun katılma süreci üzerinde etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Benzer bir çalışma, Zhang ve He (2017) tarafından sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Zhu vd. (2016), metal matris gözenek boyutu, ısı alıcı geometrisi ve ayrık ısıtıcı parametrelerinin FDM/metal matris kompozit ısı alıcı termal performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Isı transferinin iyileştirilmesine yönelik olarak sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım etkisi dikkate alınarak optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Düşük gözenek boyutlarındaki erime hızlarının daha yüksek olduğu belirtilmesine rağmen yüksek gözenek boyutu, yukarı doğru genişleyen soğuk duvar formu ve iki adet ayrık ısıtıcı düzenlemesi ile optimum erime süreleri elde edilmiştir.

1.4.4. FDM / Nano Partikül Düzenlemelerinin İncelendiği Çalışmalar

FDM'ye yüksek ısı iletkenliğe sahip nano partiküllerin ilave edildiği ısı alıcı düzenlemeleri önemli araştırma konularından birisi haline gelmiştir. FDM/nano partikül düzenlemeleri; hafiflik, yüksek ısı iletim, FDM miktarı, doğal taşınım etkisi, metal matrislerin üretimindeki zorluklar, vb. sebepler dolayısıyla kanatçık ve metal matris düzenlemelerine önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Ancak, çökme ve viskozite artışına bağlı olarak doğal taşınım mekanizmasının baskılanması gibi olumsuzluklar ilgili düzenlemeler için çözülmeyi bekleyen problemler arasındadır. FDM/nano partikül düzenlemesini konu alan çalışmalar özet formunda Tablo 1.8.'de ve bunlardan bazıları açık formda aşağıda verilmiştir.

Khodadadi ve Hossinzadeh (2007), dikdörtgen kapalı bir ortam içerisindeki nano-partikül (Cu) ilaveli faz değiştiren maddenin (FDM/nano partikül) katılma davranışını iki-boyutlu sayısal bir model üzerinden incelenmişlerdir. Nano partikül miktarındaki artışa bağlı olarak katılma sürelerinin kısaltıldığı belirtilmiştir. Bu durum, gizli ısı değerinin (J/kg) azalması ve FDM'nin ısı iletkenliğinin artışı ile ilişkilendirilmiştir. Nano partikül ile elde edilen yüksek katılma hızlarının elektronik ekipmanların soğutulmasında önemli bir avantaj olduğu vurgulanmıştır.

Weinstein vd. (2008), kübik forma sahip kapalı bir ortam içerisindeki FDM/grafit nanofiber karışımının termal performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, grafit nanofiber oranının ve geometrisinin etkisi farklı sabit ısı yüklemeler altında test edilmiştir. Yapılan çalışma ile belirli bir değere kadar artan grafit nanofiber oranları ile daha düşük ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının elde edildiği belirtilmiştir. Nanofiber miktarındaki aşırı artışların doğal taşınımı baskılaması ve ısı geçişini olumsuz yönde etkilemesi çalışmanın diğer önemli bulguları arasındadır. Ayrıca, termal performansın nanofiber geometrisine bağlı olarak önemli değişimler gösterdiği ifade edilmiştir.

Benzer bir ısı depolama ünitesi için farklı boy/en oranları ve katılma süreci Sanusi vd. (2011) tarafından çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Nano partikül ilavesi ile daha düşük yüzey sıcaklıkları elde edilirken; erime sürelerinin uzadığı ifade edilmiştir. Bu davranış, ısı depolama ünitesi içerisindeki ısı yayılımının iyileşmesi ile ilişkilendirilmiştir. Katılma sürelerinin ise tüm düzenlemeler için önemli ölçüde kısaldığı belirtilmiştir. FDM/grafit nano partikül düzenlemesinin taşınabilir elektronik ekipmanlar için uygun bir alternatif olduğu ifade edilmiştir.

Zhao ve Wu (2011), metal matris ve genişletilmiş grafit düzenlemelerine sahip FDM ilaveli bir ısı depolama ünitesinin termal performansını (erime/katılma) karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Metal matris düzenlemesi için farklı gözenek yoğunluğu ve gözenek boyutu değerleri incelenirken, grafit düzenlemesinde sabit bir oran için çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma ile her iki düzenleme için ısı transferinin iyileştiği bir başka ifade ile erime ve katılma sürelerinin kısaldığı belirtilirken ortalama performans yönünden FDM/metal matris uygulamasının daha iyi sonuç verdiği vurgulanmıştır. Ayrıca, her iki düzenleme için doğal taşınım mekanizmasının baskılandığı ifade edilmiştir.

Termal performans iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırıldığı benzer bir çalışmada Chintakrinda vd. (2011), FDM/grafit matris, FDM/metal matris ve FDM/grafit nanofiber (GNF) düzenlemelerinin ısı geçişi üzerindeki etkisini yüksek ısı yükleri altında deneysel olarak incelemiştir. FDM/GNF düzenlemesinde erime sürecinin önemli ölçüde geciktirildiği ifade edilmiştir. Yüksek ısı yükleri için FDM/GNF düzenlemesinde katı bölgelerin varlığı görülmüştür. FDM/grafit matris uygulamasının taban yüzey sıcaklığının kontrolünde en iyi performansı sağladığı belirtilmiştir. Her bir düzenleme için etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olduğu gözlenmiştir. Chintakrinda vd. (2012), başka bir çalışmada, nano partikül oranı (grafit nano fiber), ısı güç ve FDM miktarı değişiminin

FDM/nano partikül ısı alıcı termal performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak test etmişlerdir. Artan grafit nanofiber miktarları ile erime sıcaklığına ulaşma sürelerinin uzadığı ve daha düşük yüzey sıcaklıklarının elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, yüksek grafit nano fiber oranlarında doğal taşınımın baskılandığı ifade edilmiş ve artan FDM miktarları ile çalışma sürelerinin uzadığı belirtilmiştir.

Dhaidan vd. (2013), FDM/nanopartikül düzenlemesine sahip ısı depolama ünitesi için nano partikül oranı, ısıl yükleme ve aşırı soğuma etkilerini sabit ısıl yük altında deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Nano partikül oranındaki artış ile erime sürecinin hızlandığı ve ısı transferinin iyileştiği belirtilmiştir. Nano partikül artış oranında topaklaşma ve viskozite artışı gibi kısıtlamaların dikkate alınması gerekliliği ifade edilmiştir. Aşırı soğumanın depolama sürecini uzattığı ve erime sürecinin başlangıcında etkili olduğu görülmüştür.

Khodadadi vd. (2013), FDM'nin termal performansının artırılmasına yönelik olarak nano partikül kullanımını kapsayan çalışmaları derlemişlerdir.

Saha ve Dutta (2015) periyodik ısıl yükleme altındaki FDM/nano partikül (kanatçık veya metal matris) düzenlemesine sahip bir ısı alıcının termal davranışını analitik olarak incelemişlerdir. Önerilen model ile erime ve katılma süreçleri için farklı eşitlikler elde edilmiştir. FDM içerisindeki taşınım etkisi efektif ısıl iletim katsayısı ile tanımlanmış ve ısı taşınım katsayısı, FDM termofiziksel özellikleri ve ısı depolama ünitesi sistem boyutları araştırma parametreleri olarak belirlenmiştir. Efektif ısı taşınım katsayısının FDM'nin katılma sürecindeki etki mertebesi ortaya konmuş ve nano-partikül kullanımı ile artan ısıl performans ısıtıcı yüzey sıcaklıkları üzerinden tartışılmıştır.

Fan vd. (2015), FDM/nano partikül ilaveli bir ısı alıcının termal performansı atımlı yüksek ısıl yükler altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, nano partikül malzemesi (karbon nanotüp, grafen), partikül oranı ve güç seviyesi araştırma parametresi olarak tanımlanmıştır. Nano partikül kullanımı ile kritik sıcaklığa ulaşma sürelerinin önemli düzeyde kısaldığı belirtilmiştir. Bu durum, nano partikül ilavesinin viskozite değerlerini arttırmasına bağlı olarak doğal taşınımın baskılanması ve erime sürecinin geciktirilmesi ile açıklanmıştır. Artan güç seviyeleri ile termal performansın iyileştiği belirtilmiştir. Grafen nano partikül malzemesinin diğer nano partiküllere kıyasla daha yüksek termal performans sağladığı belirtilmiştir. Katılma sürecinin nano partikül ilavesi ile hızlandığı belirtilmiştir.

Benzer bir çalışma Motahar vd. (2017) tarafından titanyum oksit kullanılarak yapılmıştır. Nano partikül ilavesinin ilavesiz duruma kıyasla doğal taşınımı baskıladığı ve, erime sürecini kötüleştirdiği ortaya konmuştur. Ayrıca, Nusselt sayısı ve sıvı FDM oranları için korelasyon geliştirilmiştir.

Tablo 1.8. FDM / nano partikül düzenlemesine ait çalışmalar

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Nano partikül malzemesi	Araştırma parametreleri
Khodadadi ve Hosseinizadeh (2007)	Sayısal (2-B) / Katılma	Su	Kare kapalı ortam	Sabit yüzey sıcaklığı	Bakır (Cu)	Nano partikül oranı
Weinstein vd. (2008)	Deneyisel / Erime	Parafin ($T_m = 52\text{ }^\circ\text{C}$)	50,8x50,8x50,8	3 - 7 W	Grafit nanofiber, (GNF)	Nano partikül oranı/ geometrisi ve ısıl yük
Yin vd. (2008)	Deneyisel / Erime / Katılma	Parafin ($T_m = 57\text{-}61\text{ }^\circ\text{C}$)	-	21000 - 50000 W/m^2	Genişletilmiş grafit	Nano partikül oranı ve ısıl yük
Yin vd. (2010)	Deneyisel/ Erime / Katılma	Parafin ($T_m = 51,5\text{ }^\circ\text{C}$)	50x60x100	3 - 30 W	Genişletilmiş grafit	Nano partikül oranı ve ısıl yük
Sanusi vd. (2011)	Sayısal (2-B) / Erime / Katılma	N-tricosane ($T_m = 56\text{ }^\circ\text{C}$)	101,6x101,6x101,6	100 - 1000 W	Grafit nanofiber, (GNF)	Nano partikül oranı/geometrisi, en/boy oranı, ısıl yük
Zhao vd. (2011)	Deneyisel / Erime	NaNO_3 ($T_m = 308\text{ }^\circ\text{C}$)	76x100 (çapxboy)	60 W	Genişletilmiş grafit	Nano-partikül Gözenek yoğunluğu, gözenek boyutu,
Chintakrinda vd. (2011)	Deneyisel / Erime	Parafin ($T_m = 54\text{ }^\circ\text{C}$)	50,8x50,8x50,8	19300 - 193000 W/m^2	Grafit nanofiber (GNF)	Nano partikül, gözenekli ortam ve ısıl yük
Chintakrinda vd. (2012)	Deneyisel / Erime	Parafin ($T_m = 54\text{ }^\circ\text{C}$)	50,8x50,8x50,8 101,6x101,6x101,6 1,6 vd.	193000 - 290000 W/m^2	Grafit nanofiber (GNF)	Nanopartikül oranı, ısı alıcı geometrisi ve ısıl yük
Sebti vd. (2013)	Sayısal / Erime	Parafin ($T_m = 18\text{ }^\circ\text{C}$)	10x10	Sabit yüzey sıcaklığı	Bakır (Cu)	Nano partikül oranı

Tablo 1.8'in devamı

Araştırmacı	Kapsam	FDM	Isı alıcı boyutları (mm)	Isıl yük	Nano partikül malzemesi	Araştırma parametreleri
Dhaidan vd. (2013)	Deneysel / Sayısal (2-B) / Erime	Octadecane ($T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$)	25,4x25,4x25,4	1829/4185	Bakır Oksit (CuO)	Nano partikül oranı, ısıl yük aşırı soğuma
Khodadadi vd. (2013)	Derleme					
Saha ve Dutta (2015)	Analitik / Sayısal (2-B) / Erime / Katılaşma	N-eicosane ($T_m = 34\text{-}37\text{ }^\circ\text{C}$) Parafin wax	10x400	700/1000/ 7000/70000 (periyodik)	Nanopartikül / Metal matris / Kanatçık	Isı taşınım katsayısı, FDM termofiziksel özellikleri, FDM kalınlığı
Fan vd. (2015)	Deneysel/ Erime/ Katılaşma	Hexadecanol ($T_m=50^\circ\text{C}$)	24x74x74	40-120 W	Karbon nano tüp / Grafen nano levhacık	Karbon nano partikül türü/oranı, ısıl yük
Motahar vd. (2017)	Deneysel/ Erime	Octadecane ($T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$)	40x40x60	2500-10000	Titanyumoksit (TiO_2)	Nano partikül oranı, ısıl yük
Kant vd. (2017)	Sayısal (2-B)	Caprik asit ($T_m=32^\circ\text{C}$) CaCl ₂ .6H ₂ O n-Octadecan ($T_m = 28\text{ }^\circ\text{C}$)e	30x30	Sabit yüzey sıcaklığı	Grafen	Nano partikül oranı, FDM türü

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Elektronik ekipmanlar, tüketici elektroniğinden haberleşme endüstrisine, savunma sanayinden uzay-havacılık endüstrisine kadar modern dünyanın tamamlayıcı bir unsuru haline almıştır. Elektronik endüstrisindeki gelişmeler daha ileri teknoloji ve yoğunlaştırılmış minyatürize bileşenlerin üretimini beraberinde getirmektedir. Yüksek ısı üretiminin minyatürize bileşenler üzerinden gerçekleşmesi güç yoğunluğunu ve elektronik bileşen üstündeki sıcaklıklarını arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıklara bağlı olarak güvenilirlik, yüksek soğutma maliyetleri ve performans kötüleşmesi gibi birçok kritik problem ortaya çıkmaktadır. Konvansiyonel pasif ve aktif termal kontrol yöntemlerinin elektronik cihazların gelişim süreci göz önüne alındığında yetersiz kaldığı görülmektedir. Son dönemde, FDM ilaveli ısı alıcıların kullanıldığı pasif termal kontrol yönteminin, sürekli kullanımı olmayan zaman bağımlı (periyodik, atımlı vb.), kısa süreli veya tek kullanım olarak çalışan yüksek güç yoğunluğuna sahip elektronik bileşen/cihazların (savunma sanayi, uzay-havacılık vb.) termal yönetiminde önemli bir potansiyel olarak görülmektedir. FDM-ilaveli ısı alıcı sistemleri, birincil soğutma sistemi olabileceği gibi ikincil bir soğutma sistemi olarak da kullanılabilenliği ifade edilmelidir.

Literatürde, FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinde kanatçık etkisinin incelendiği çalışmaların; kanatçık geometrisi / sayısı, FDM türü / miktarı, güç seviyesi gibi temel araştırma parametreleri ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Ayrıca, kanatçık etkisinin incelendiği çalışmaların, % 70'nin sabit kesitli levha form, % 15'nin iğne form ve % 15'nin de her iki kanatçık geometrisine sahip olduğu ifade edilmelidir. FDM içerisindeki iletimle ısı geçişi mekanizmasına odaklanan bu çalışmaların ana hedefi, düşük ısı iletim katsayısına sahip FDM'nin yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzeme ile olan ısı transfer yüzey alanının artırılarak ısı geçiş karakteristiklerinin iyileştirilmesi olmuştur. Bir başka ifade ile tasarlanan kanatçık geometrilerinde FDM'nin erime sürecinde oldukça önemli bir rol oynayan doğal taşınım mekanizması dikkate alınmamıştır.

Yapılan çalışma, FDM-ilaveli ısı alıcıların optimum termal tasarımına yönelik parametrik kapsamlı deneysel bir araştırmadır. Erime karakteristiği üzerinde etkili olan iletim ve doğal taşınım ısı transfer mekanizmaları birlikte analiz edilerek; kanatçık geometrisinin erime davranışına uygun bir biçimde aynı ısı transfer yüzey alanına sahip olacak şekilde değişken kesitli (S) tasarımının, FDM-ilaveli termal kontrol sisteminin termal performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmayla literatürde, termal

performansın iyileştirilmesine yönelik kanatçık geometrisi tasarımında iletim ve doğal taşınım etkilerinin birlikte ilk kez dikkate alındığı vurgulanmalıdır. Erime davranışını esas alan bu tasarım yaklaşımı, çalışmaya önemli derecede bir özgünlük katmaktadır. Önerilen kanatçık geometrisi ile problemde etkin olan iletim ve taşınım ısı transfer mekanizmalarının iyileştirilmesi, güvenilir çalışma sürelerinin arttırılması ve ısıtıcı yüzey üzerinde üniform bir sıcaklık dağılımı hedeflenmiştir. Ayrıca, erime davranışı üzerinde etkili olan açısal konum değişiminin incelendiği çalışmaların oldukça kısıtlı ve kapsamlarının dar olduğu ifade edilmelidir. Bu doğrultuda, açısal konum değişimi geniş bir aralık içerisinde incelenerek mevcut literatüre önemli bir veri sağlandığı vurgulanmalıdır.

Çalışma kapsamında, sabit bir ısı yük altında açısal konum ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$), kanatçık sayısı ($n = 1 - 5$) ve kanatçık geometrisi (sabit ve değişken kesitli) etkileri parametrik olarak incelenmiştir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin termal performansı iç ortam ve ısıtıcı yüzey üzerinden elde edilen sıcaklık dağılımları ile karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Erime sürecindeki fiziksel mekanizmanın net olarak anlaşılabilmesi, sıcaklık ölçümlerine eş zamanlı erime (katı/sıvı) ara yüzey görüntüleri ile sağlanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları, çalışmanın özgün değerini kuvvetlendirmektedir. Elde edilen verilerin bundan sonraki sayısal çalışmalar için bir referans teşkil edeceği de belirtilmelidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal davranışı açısal konum, kanatçık sayısı ve kanatçık geometrisi olmak üzere üç farklı tasarım parametresi için deneysel olarak incelenmiştir. Yedi farklı açısal konum değeri ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°), 6 farklı kanatçık sayısı ($n = 0, 1, 2, 3, 4$ ve 5) ve iki farklı kanatçık geometrisi (sabit, $S = 1$ ve değişken kesitli, $S = 0,5, 0,2$ ve 0) dikkate alınmıştır. Deneysel sabit ısı yük altında (16 Watt) ve sabit FDM miktarı (107 gram) için gerçekleştirilmiştir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin termal davranışı, iç ortam ve ısıtıcı yüzey sıcaklık dağılımı, güvenilir çalışma süreleri ve erime ara yüzey görüntüleri üzerinden tartışılmıştır. Ayrıca, incelenen belirli geometrik düzenlemeler FDM-ilavesiz ısı alıcı durumu ile karşılaştırılmış ve FDM ilavesinin termal performans üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

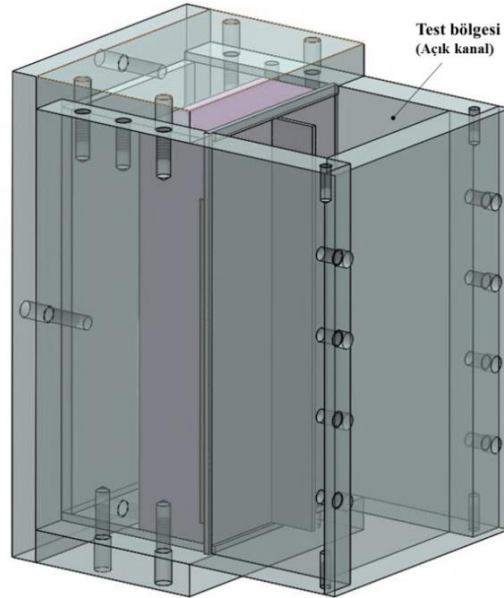
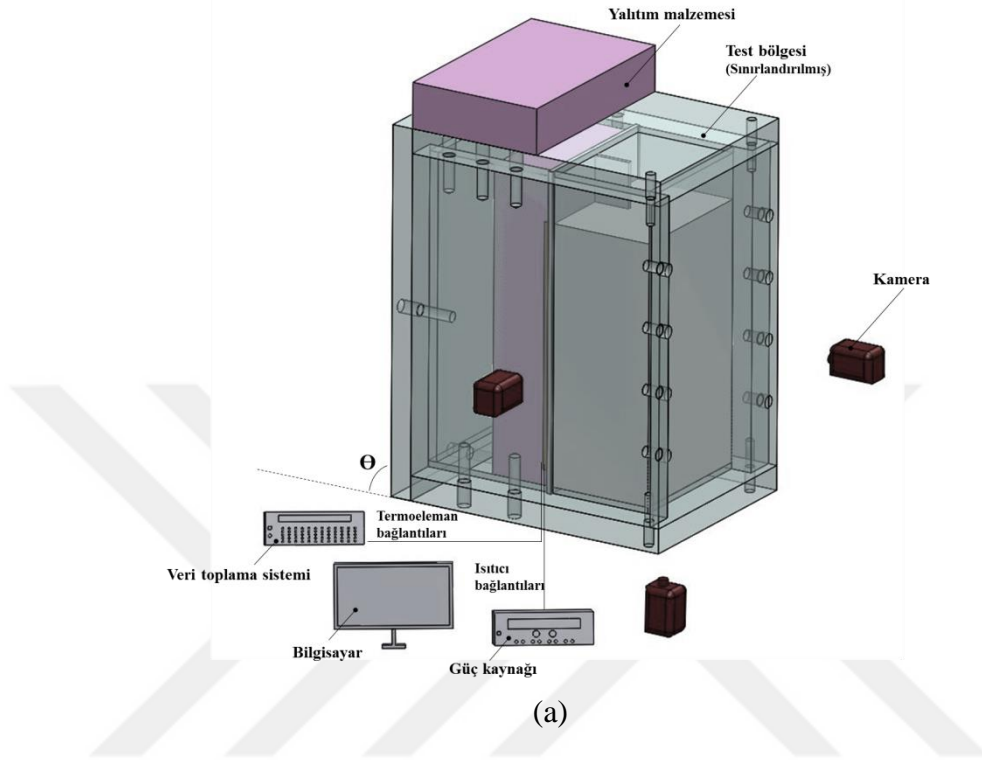
2.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Prensipleri

2.1.1. Deney Düzenegi

Isı alıcı termal davranışının araştırılmasına yönelik tasarlanan deney düzeneginin şematik resmi ve test bölgesine ait detaylı fotoğraf Şekil 2.1'de sunulmuştur. Deney düzenegi; veri toplama sistemi, ısı yük besleme ünitesi (DC güç kaynağı), akış görüntüleme sistemi, açısal konum ayar platformu ve test bölgesi olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Test bölgesi üzerindeki sıcaklık ölçümleri Keithly marka veri toplama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin çevreden etkilenmemesi / en aza indirgenmesi için veri toplama sistemi üzerinden filtreleme işlemi uygulanmıştır.

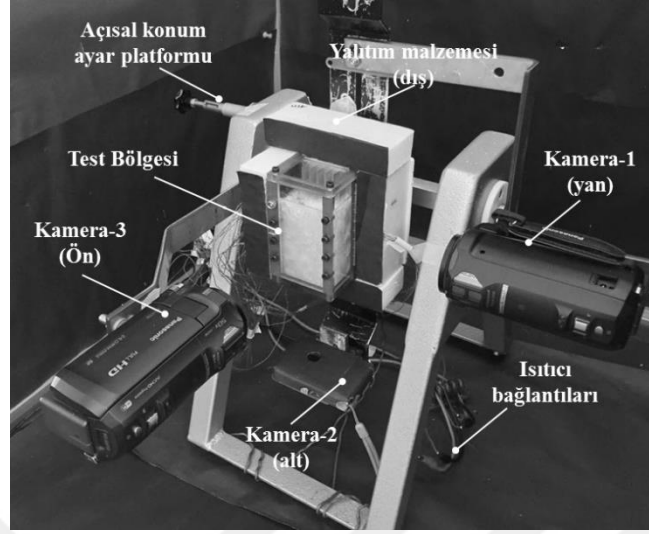
Isıtıcı elemana uygulanacak olan ısı yüküne ait gerilim ve akım değerleri GW Instek DC güç kaynağı (ısı yük besleme ünitesi) kullanılarak kontrol edilmiştir. Faz değişim sürecindeki etkin ısı transfer mekanizmasının net olarak anlaşılabilmesi amacıyla erime ara yüzey gelişimi akış görüntüleme sistemi ile anlık olarak fotoğraflanmıştır. Erime ara yüzey gelişimi test bölgesinin yan, ön ve alt yüzeylerinden 3 adet yüksek çözünürlüğe sahip CCD kamera (Panasonic HC-V750) ile kayıt altına alınmıştır. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan ölçüm aletlerinden kaynaklanan

sıcaklık okumalarındaki toplam hata oranı \pm % 2,1 olarak hesaplanmıştır (Kline ve McClintock, 1953).



Şekil 2.1. Deney düzeneği: şematik resim, FDM-ilaveli ve ilavesiz (kapalı ortam) (a) ; FDM-ilavesiz (açık kanal) (b) ve test bölgesi (c).

Şekil 2.1'in devamı



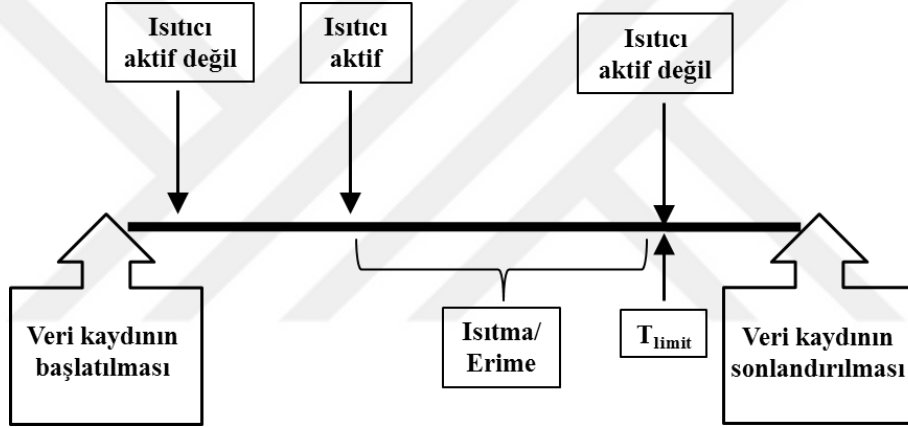
(c)

Tablo 2.1. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler

Ölçüm cihazı	Cihaz kodu/ürün	Ölçüm aralığı	Hata oranı
Veri toplama sistemi	Keithly 2700 integra serisi ve 7708 kart modülü	-200 – 1820 °C	±1 °C (% 1)
Isıl yük besleme ünitesi (DC güç kaynağı)	GW Instek GPS-4303S	0 – 90 W	± %0,03+10 (mV)
Akış görüntüleme sistemi	Panasonic HC-V750 SONY DSC-S730	6528 x 3672 3264 x 2448	-
Termoeleman çifti	Omega / TFCC ve TFCP (T tipi)	-200 – 350 °C	± 0,5 °C (% 0,75)
Sabit sıcaklık banyosu	LABO DX-300 (PID kontrol)	-20 – 100 °C	0,03 °C (Kesinlik)

Açısal konum değişiminin (θ) sıcaklık dağılımı ve erime yüzeyi gelişimi üzerindeki etkisinin incelenbilmesi amacıyla taşıyıcı bir platform tasarlanmıştır. Platform, $0^\circ - 90^\circ$ arasındaki bölge içerisinde 15° 'lik ilerleme adımlarına imkan sağlamaktadır. Burada, düşey ve yatay konumlar, sırasıyla, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ açısal konumlarını ifade etmektedir. Test bölgesi ve akış görüntüleme sistemi bu platform üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 1 c).

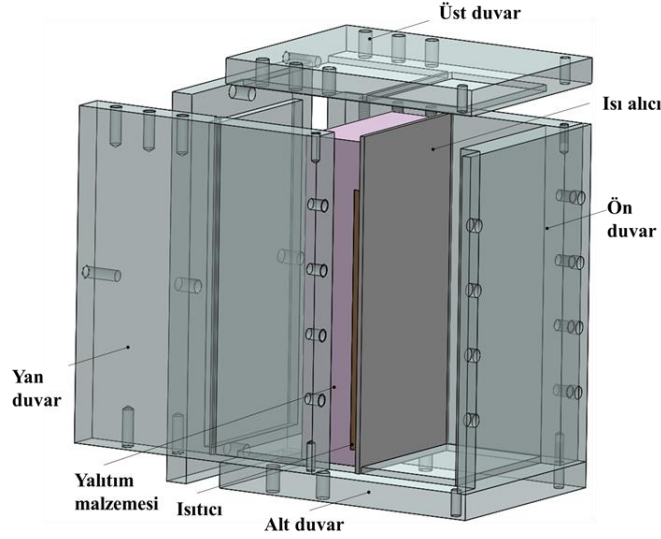
Deney düzeneğinin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir; yerel nokta sıcaklıklarının $t=0$ dk. anında aynı sıcaklık değerine ulaşmaları (ortam sıcaklığı, $T_o = 25$ °C) sağlanır. Isıl denge sağlandıktan sonra ısı yük ısıtıcı eleman üzerinden sisteme uygulanarak deney başlatılmıştır. Test bölgesi üzerinde yer alan termoeleman çiftlerinin sıcaklık ölçümleri on saniye aralıklarla veri toplama sistemi üzerinden kayıt altına alınır. Deney süresince, test bölgesinin alt, üst, yanal duvarlarına ait ısı yalıtım malzemeleri üçer dakikalık periyodlar içerisinde eş zamanlı olarak yaklaşık 20 saniye süre ile kaldırılır ve erime yüzey görüntüleri fotoğraflanır. Deney, ısıtıcı elemanın yüzey sıcaklığı 70 °C olarak belirlenen limit çalışma sıcaklığına ulaştığı anda sonlandırılır. Farklı ısı alıcı düzenlemeleri için işlemler tekrar edilir.



Şekil 2.2. Deney düzeneğinin çalışma prensibi

2.1.2. Test Bölgesi

Test bölgesine ait temel bileşenler Şekil 2.3'te şematik olarak verilmiştir. Ölçüm bölgesi, 100 x 48 x 34 mm (boy x en x genişlik) iç boyutlarına sahip dikdörtgen kapalı bir ortamdır.



Şekil 2.3. Test bölgesine ait bileşenler

Sabit ısı yük altındaki ölçüm bölgesinin sol duvarı (ısı alıcı) 1,5 mm kalınlığında ve 100 x 50 (boy x en) mm² taban alanına sahip Al 6082 (k = 172 W/m.K) malzemeden üretilmiştir. Alüminyum esaslı malzemelerin ısı alıcı tasarımında yaygın olarak kullanıldığı ifade edilmelidir. Burada, düşük yoğunluk, yüksek ısı iletim katsayısı ve yüksek korozyon direnci gibi özellikler belirleyici rol oynamaktadır. Bakır malzeme ile karşılaştırıldığında, bakırın ısı iletim katsayısının alüminyumunkinin iki katı olmasına rağmen, yoğunluğunun alüminyuma kıyasla üç kat fazla olması ağırlık problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, ısı alıcı tasarımında alüminyum malzemelerin uygunluğunu ortaya koymaktadır. Çalışma kapsamında, sabit (S = 1) ve değişken kesitli (S = 0,5, 0,2 ve 0) kanatçık geometrilerine sahip farklı ısı alıcı düzenlemeleri test edilmiştir. Isı alıcı düzenlemelerine ait ana boyutlar ve kanatçık yerleşimi Şekil 2.4 ve 2.5'te verilmiştir. Sabit kesitli kanatçık geometrisi için kanatçık hacim oranı (γ), kanatçık sayısının n = 0, 1, 2, 3, 4 ve 5 değerleri için, sırasıyla, $\gamma = \% 0, \% 0,9, \% 1,8, \% 2,7, \% 3,6$ ve $\% 4,5$ değerlerine karşılık gelmektedir. Değişken kesitli kanatçık geometrisi için ise aynı ısı transfer yüzey alanına sahip üç farklı kanatçık genişlik oranı (S = 0,5, 0,2 ve 0) tanımlanmıştır. Kanatçık genişlik oranı,

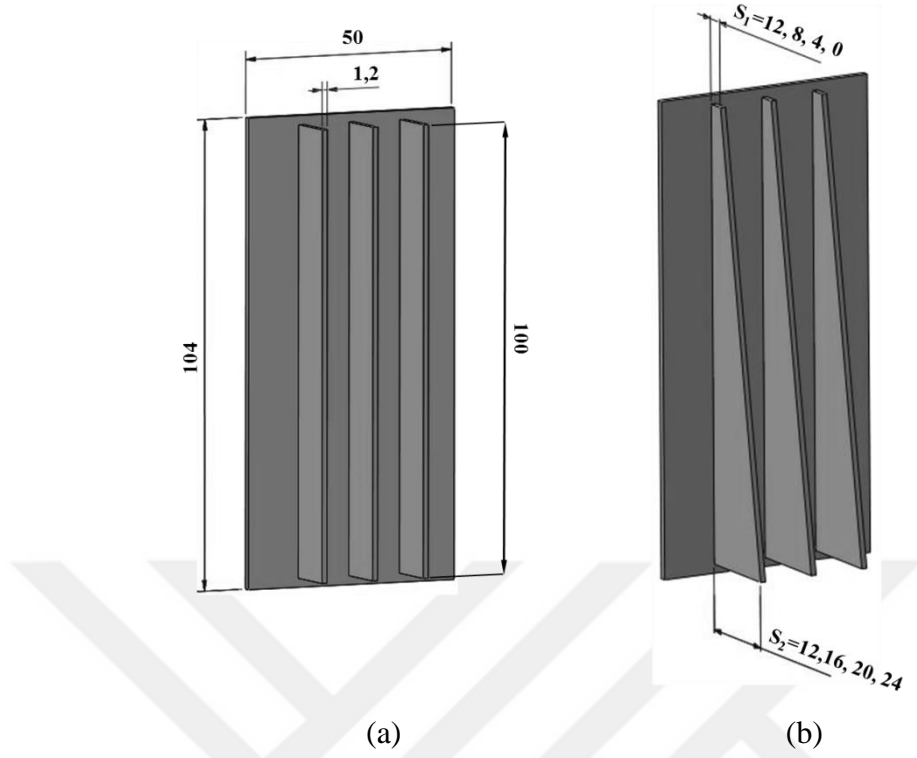
$$S = \frac{S_2}{S_1} \quad (1)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Burada, S_1 ve S_2 ifadeleri sırasıyla kanatçık üst ve alt taban genişliklerini ifade etmektedir. Kanatçık hacim oranı ise,

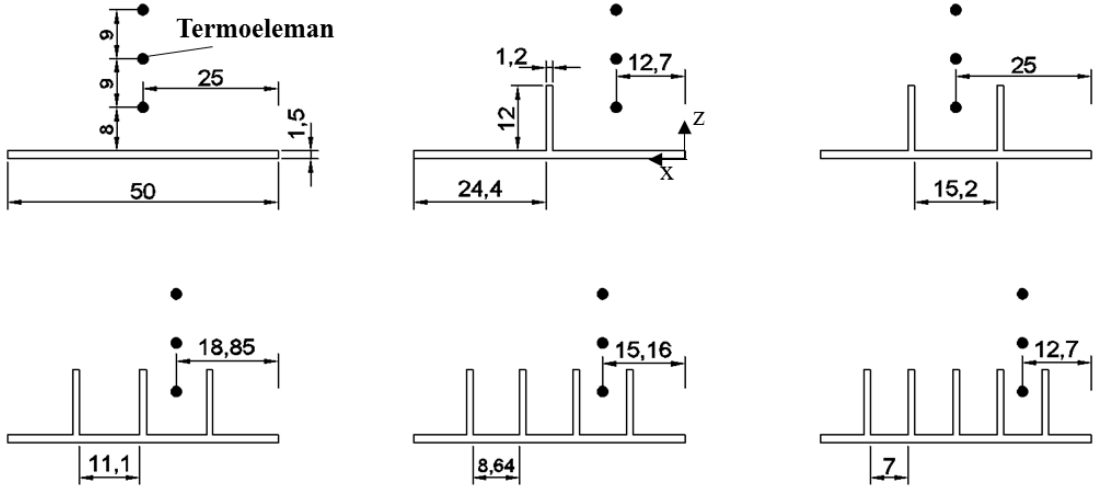
$$\gamma = \frac{V_{\text{kanatçık}}}{V_{\text{iç ortam}}} \quad (2)$$

şeklindedir. Burada, $V_{\text{kanatçık}}$ ve $V_{\text{iç ortam}}$, sırasıyla, kanatçık hacmini (ısı alıcı tabanı hariç) ve iç ortam hacmini belirtmektedir. Kanatçık ve ısı alıcı taban yüzey arasında bir termal direncin oluşmaması için tüm ısı alıcı düzenlemeleri dört eksenli CNC Tel Erozyon tezgâhında üretilmiştir. İlgili yöntemle % 0,1 oranında yüksek boyut hassasiyeti sağlanmaktadır. Tasarlanan ısı alıcıların boyut aralığı ve kullanılan malzeme itibarıyla uygulamada yer aldığı ifade edilmelidir.

Ölçüm bölgesine ait diğer duvarlar hem akış görüntüleme için hem de ısı kayıpların en aza indirgenmesi amacıyla yüksek ışık geçirgenliğine, düşük ısı iletim katsayısı değerine ($k = 0,21 \text{ W/m.K}$) ve yüksek termal dayanıma sahip ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) 10 mm kalınlığında polikarbon levhalar kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.3). Test bölgesi üzerinde yer alan tüm bileşenlerin birbirine olan montajı hem şekil bağılı olarak hem de vidalı bağlantılar kullanılarak sağlanmıştır. Sızdırmazlığı sağlamak için bileşenlerin birleşme yüzeylerinde yüksek sıcaklığa dayanımlı sıvı conta kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Kanatçık geometrisi: sabit kesitli kanatçık (a), değişken kesitli kanatçık (b)

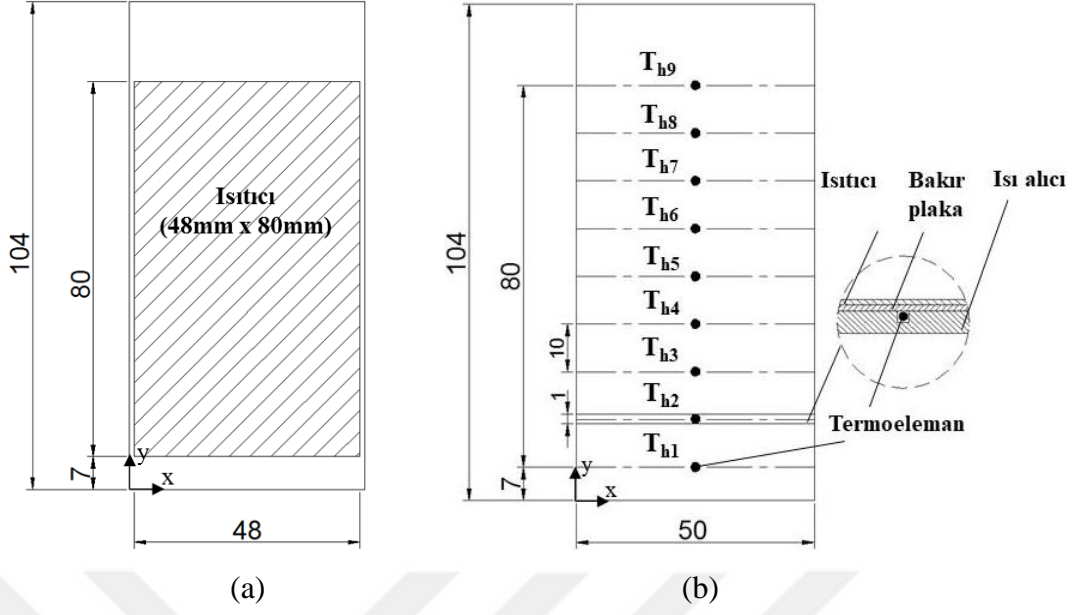


Şekil 2.5. Farklı kanatçık sayılarına sahip ısı alıcılara ait geometrik parametreler

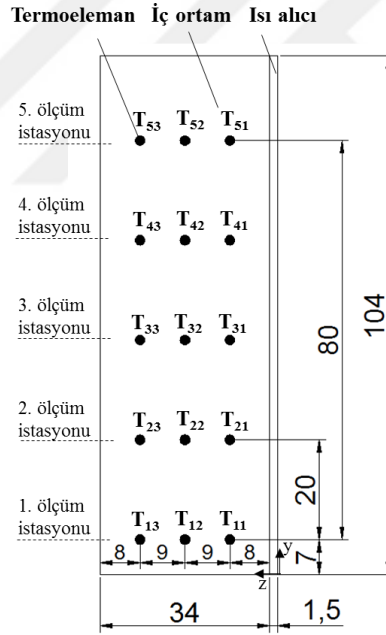
Elektronik bileşenin ürettiği ısı, ince bir bakır levha ($50 \times 80 \times 0,2$ mm³) üzerine yerleştirilen kapton esnek ısıtıcı (50×80 mm², Omega KHLV) ile temsil edilmiştir. Bakır-ısıtıcı çiftinin ısı alıcı arka yüzüne yerleşimi ince bir tabaka termal macun (Omegatherm 201) kullanılarak sağlanmıştır. Burada, bakır levha ile ısı alıcı yüzey

üzerinde uniform bir ısı yayılımının sağlandığı vurgulanmalıdır. Isıtıcı boyutları ve yerleşim düzeni Şekil 2.6 a' da şematik olarak verilmiştir. Isıtıcıya yapılacak olan güç girişi uygulamaya ve literatüre uygun şekilde 16 W ($4000\text{W}/\text{m}^2$) olarak belirlenmiştir. Çevreye olan ısı kayıplarının en aza indirgenmesi amacıyla hem ısıtıcı arka yüzeyi hem de sınırlayıcı duvarlar (alt, üst ve yanal duvarlar) 30 mm kalınlığındaki ısı yalıtım malzemesi (foamboard, xps, $k = 0,0035\text{W}/\text{m.K}$) ile kaplanmıştır.

Isı alıcıların termal tasarımında ana kontrol mekanizmasını sıcaklık ölçümlerinin oluşturduğu ifade edilmelidir. Tüm ısı alıcı düzenlemelerine ait yerel sıcaklıklar ısıtıcı yüzey (ısı alıcı arka yüzey) üzerinde ve iç ortam içerisinde T tipi teflon izoleli termoeleman çiftleri ile ölçülmüştür (Tablo 2.1). Isıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı orta eksen boyunca 10 mm aralıklar ile yerleştirilen dokuz termoeleman çifti kullanılarak elde edilmiştir. Termoeleman çiftleri, ısı alıcı arka yüzeyi üzerine açılmış 0,6 mm derinliğinde ve 1 mm genişliğindeki kanallara yerleştirilmiştir. Bu durum, kapton ısıtıcı ve ısı alıcı yüzeyinin birbirine tam olarak temasını sağlamıştır. Isı alıcı arka yüzeyindeki termoeleman çiftlerinin konumu ve yerleşim planı Şekil 2.6 b'de şematik olarak verilmiştir. Burada, termoeleman çiftleri arasındaki elektriksel iletkenlik açık uçlarda reçine tabakası (Omegabond) kullanımıyla giderilmiştir. Hazırlanan termoeleman çiftlerinin termoeleman kanallarına yerleşimi termal macun (Omegatherm 201) ile sağlanarak termal direnç minimize edilmiştir. Kapalı ortam içerisindeki yerel sıcaklık ölçümleri ise simetri düzlemi üzerinden 20 mm aralıklarla beş farklı sıcaklık ölçüm istasyonu ile toplamda on beş yerel noktadan zaman bağımlı olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Her bir sıcaklık ölçüm istasyonu üzerinden üç yerel noktadan sıcaklık ölçümü alınarak; iç ortam içerisindeki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. FDM'nin elektriksel iletkenliği olmadığı için kapalı ortam içerisine yerleştirilen termoeleman çiftlerine reçine uygulaması yapılmamıştır. Farklı kanatçık sayıları için değişen simetri düzlemine bağlı olarak termoeleman konumları Şekil 2.5'de sunulmuştur. Burada, tüm termoeleman çiftlerinin sabit sıcaklık banyosu kullanılarak; 0 - 100 °C arasında 0,2 °C doğruluk ile kalibre edildikten yerel noktalara olan montajlarının yapıldığı ifade edilmelidir. Termoeleman çiftlerinin kaynağı "OMEGA TL-WELD" kaynak makinası kullanılarak yapılmıştır.



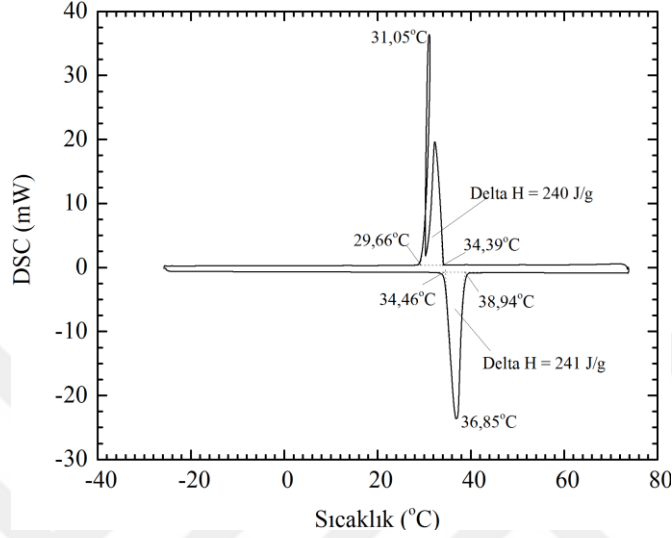
Şekil 2.6. Isı değiştirici arka yüzeyi, ısıtıcı (a) ve termoeleman yerleşimi (b)



Şekil 2.7. Kapalı ortam içerisindeki termoeleman yerleşimi

Faz değıştiren madde (FDM) olarak, taşınabilir elektronik cihazların soğutulmasında yaygın olarak kullanılan ve düşük erime sıcaklık aralığına ($T_m = 34 - 37 \text{ }^\circ\text{C}$) sahip n-icosane (Merck kimyasal) kullanılmıştır. N-icosane'ye ait DSC analizi (Hitachi-DSC 7020) Şekil 2.8'de verilmiştir. FDM'ye ait termofiziksel özellikler ise Tablo 2.2'de sunulmuştur. FDM'nin katı-sıvı faz dönüşümü sırasındaki hacimsel genişleme miktarı (25 -

80 °C) ve maksimum kanatçık sayısı ($n = 5$) dikkate alınarak deneylerde kullanılacak olan FDM miktarı 107 gram olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, kapalı hacmin % 20'si boş (hava boşluğu) bırakılmıştır.



Şekil 2.8. N-eicosane ait DSC analizi

Tablo 2.2. N-eicosane'ye ait termofiziksel özellikler (Nayak vd., 2006; Saha ve Dutta, 2013, Baby ve Balaji, 2013b).

Kimyasal Formül (Kapalı)	$C_{20}H_{42}$
Erime aralığı, °C	34-37 (Merck kimyasal)
Yoğunluk, kg/m^3	810 (katı), 770 (sıvı)
Özgül ısı, $kJ/kg.K$	1,9 (katı), 2,2 (sıvı)
Gizli ısı, kJ/kg	241
Isı iletim katsayısı ($W/m.K$)	0,39 (katı), 0,157 (sıvı)

Tüm deneyler sıcaklığı şartlandırılmış bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyin doğruluğunu etkileyebilecek dış etkilerin (insan faktörü, elektronik gürültü vb.) en aza indirilmesi amacıyla tüm deneyler harici bir kapalı hacim ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$) içerisinde gerçekleştirilmiştir.

2.1.3. Deneysel Yöntem

Tez kapsamında, açısal konum (θ), kanatçık sayısı (n) ve kanatçık geometrisi (S) ısı alıcı tasarım parametreleri olarak tanımlanmıştır.

Çalışma, sistematik deneyler üzerinden üç aşama halinde yürütülmüştür. Bu aşamalar aşağıda detaylı olarak verilmektedir;

Aşama-1. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin etki düzeyini belirlemeye yönelik olarak FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemelerine ait referans verilerin oluşturulduğu aşamadır. “Kapalı ortam (Şekil 2.1 a)” ve “Açık kanal (Şekil 2.1 b)” olmak üzere iki farklı FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemeleri yedi farklı konum açısı ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°) ve beş farklı kanatçık sayısı ($S = 1$ ve $n = 0, 1, 2, 3, 4$, ve 5) için sabit ısı yük altında ($Q = 16$ W) test edilmiştir.

Aşama-2. Bir önceki aşama için tanımlanan parametrelerin etkisi FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesi için tekrar edilmiştir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerine ait termal performans karakteristikleri değerlendirilerek optimum kanatçık sayısı (kanatçık hacim oranı) belirlenmiştir.

Burada, Aşama-1 ve -2'nin sabit kesitli kanatçık durumunu kapsadığı vurgulanmalıdır (Şekil 2.4 a).

Aşama-3. Kanatçık geometrisi etkisine ait verilerin oluşturulduğu aşamadır. Termal performans açısından optimum kanatçık sayısına sahip ($n = 3$, $\gamma = \% 3,6$) FDM ilaveli ısı alıcı düzenlemesi ($\theta = 0^\circ$) dört farklı kanatçık genişlik ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0) oranı için test edilmiştir (Şekil 2.4 b). Burada, her bir kanatçık genişlik oranı için toplam ısı transfer yüzey alanlarının aynı olduğu ifade edilmelidir.

Isı alıcı düzenlemelerinin termal performans değerlendirmesinde üç farklı ölçüt kullanılmıştır. Bunlar, limit güvenilir çalışma sıcaklığına ulaşma süresi (t), güvenilir çalışma sürelerinin ve iç ortama transfer edilen ısı miktarının değerlendirildiği iyileşme oranı (ϵ) ve ısı iletkenlik ($G, W/K$)'tir. İyileşme oranı (ϵ) açık formda;

$$\epsilon = \frac{t_{\text{kanatçık}}}{t_{\text{kanatçiksız}}} \quad (2.3)$$

bağıntısı ile temsil edilir. Burada, t kanatçıklı ve kanatçiksız ısı alıcı düzenlemelerine ait limit güvenilir sıcaklığa çalışma süreleri ifade etmektedir. Isıl iletkenlik (G,W/K) ise;

$$G = \frac{P - P_{\text{kayıp}}}{T_{\text{limit}} - T_{\text{iç ortam}}} \quad (2.4)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada eşitlikte, P ısı alıcıya uygulanan toplam gücü, $P_{\text{kayıp}}$ iletimden kaynaklanan ısı kaybını, T_{limit} ve $T_{\text{iç ortam}}$ terimleri ise, sırasıyla, elektronik ekipmanın güvenilir maksimum çalışma sıcaklığını ($T_{\text{limit}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve ortalama iç ortam sıcaklıklarını (hava/FDM) ifade etmektedir. İletim ile olan ısı kayıpları, ısıtıcı ve sınırlayıcı duvarlar ile yalıtım malzemesi (İZOCAM-xps) arasına yerleştirilmiş termoeleman çiftleri kullanılarak hesaplanmıştır. Isı alıcı düzenlemesine bağlı olarak çevre ortama olan ısı kaybı 0,2 - 0,5 W ($P_{\text{kayıp}}$) seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Burada, iletimle olan ısı kaybının toplam ısı girdisine oranla % 1-3 düzeyinde olduğu ifade edilmelidir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışma kapsamında, FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansı farklı açısız konum ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°), kanatçık sayısı ($n = 0, 1, 2, 3, 4$ ve 5) ve kanatçık geometrisi ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0) düzenlemeleri için deneysel olarak incelenmiştir. Isı alıcı boyutu ve ısıl yük seçiminde, sırasıyla, $100 \times 48 \times 34$ ve 16 W olmak üzere pratik uygulamalara bağlı kalınmış ve FDM olarak elektronik ekipmanların termal kontrolünde yaygın kullanıma sahip n-eicosane tercih edilmiştir. Her bir geometrik düzenlemeye ait performans değerlendirmesi, FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesi (kapalı ortam ve açık kanal) referans alınarak iç ortam ve ısıtıcı yüzey yerel sıcaklık değişimleri ve erime yüzeyi görüntüleri üzerinden tartışılmıştır.

3.1. Kanatçiksız ($n = 0$) Isı Alıcı Düzenlemesi: FDM ve Açısız Konum Etkisi (θ)

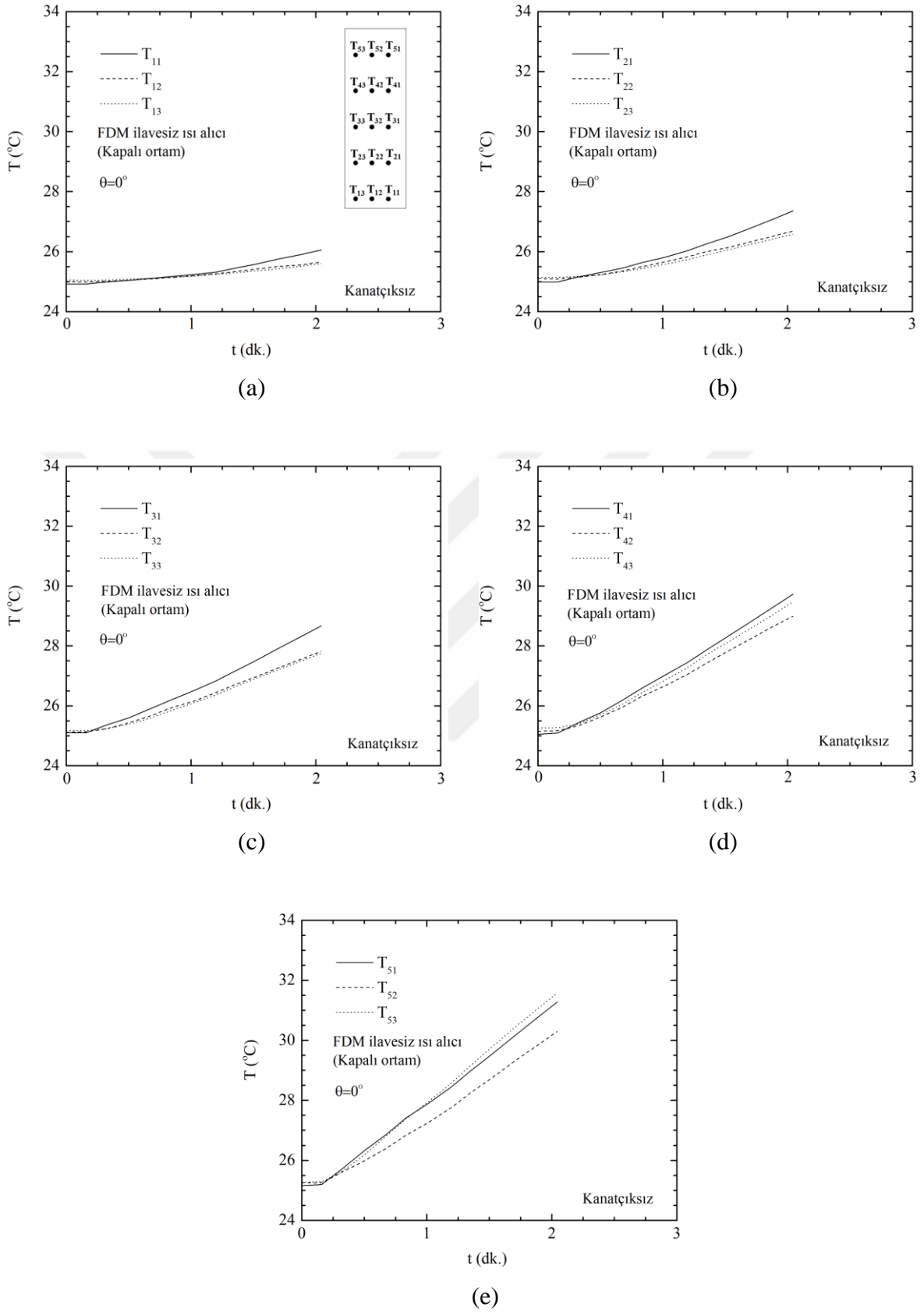
Bu bölümde, FDM-ilavesiz ve FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerinin farklı konum açılara ait termal bulgular sırasıyla, Şekil 1-6 ve Şekil 7-13'te sunulmuştur. Tezin yapısal sadeliğinin korunması amacıyla bu bölümde sadece üç farklı konum açısı için ($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90°) sıcaklık profilleri ve FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesi için sadece kapalı ortam durumuna ait yerel sıcaklık değişimleri detaylı olarak verilmiştir. Açık kanal ve farklı konum açıları için elde edilen sıcaklık profilleri karşılaştırma grafiklerinde sunulmuştur.

3.1.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi

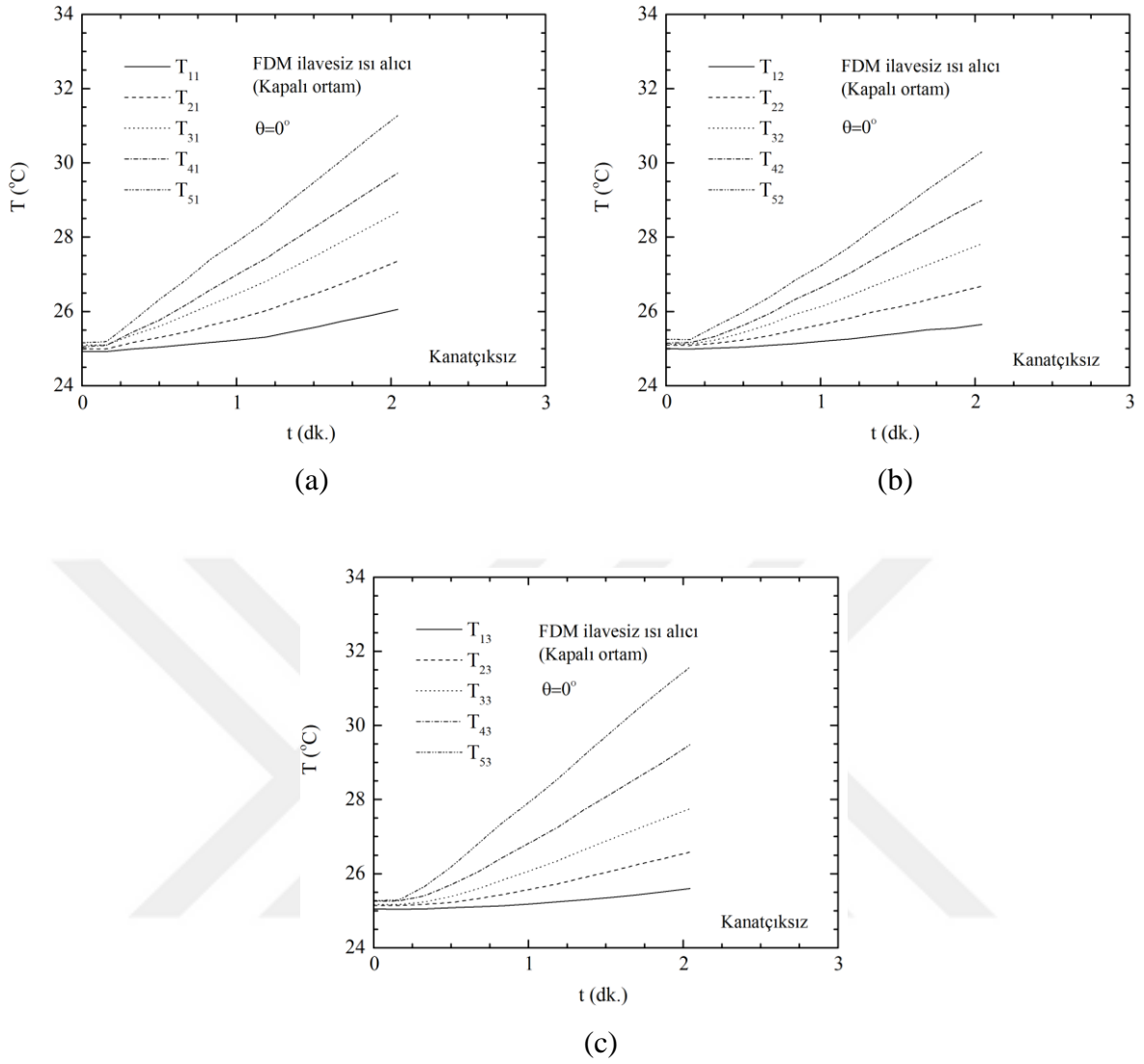
Açısız konumun (θ) $0^\circ, 45^\circ$ ve 90° değerleri için FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ait iç ortam sıcaklıklarının zaman bağımlı değişimleri Şekil 3.1 - 3.6'da sunulmuştur. İlgili açısız düzenlemelere ait $\theta = 0^\circ, \theta = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ 'ye ait sıcaklık dağılımları incelendiğinde, genel karakter olarak yerel sıcaklıkların ısıtma sürecinin ilk periyodunda ($t < 20$ saniye) ihmal edilebilir mertebede bir değişim sergilediği görülmektedir. Bu davranış, ısı alıcı yüzey tarafından duyulur formda depolanan ısının neden olduğu düşük ısı alıcı yüzey sıcaklıkları ile açıklanabilir. Burada, ısı alıcının alüminyum malzemeden yapıldığı ve yüksek ısı sığasına sahip olduğu ifade edilmelidir. İlgili zaman dilimi içerisinde ($0 \leq t < 20$ saniye), ortam (hava) ve ısı alıcı yüzey arasında

ulaşılan düşük sıcaklık farkları ($< 1 \text{ }^\circ\text{C}$), doğal taşınım mekanizmasına yeterli katkıyı sunamamakta ve ortama olan ısı geçişini zayıflatmaktadır. İlerleyen süreçte ($t > 20$ saniye), ısı alıcı bünyesinde depolanan ısı miktarının artışıyla doğal taşınım mekanizması etkin bir hal almakta ve iç ortam sıcaklıkları durağandan sürekli artış formuna dönüşmektedir. İç ortam sıcaklıklarındaki bu artış, ısı alıcı yüzey üzerindeki termal sınır tabakanın gelişimine bağlı olarak yatay ve düşey doğrultularda farklı hızlar sergilemektedir. Isı alıcının düşey konumu için ($\theta = 0^\circ$), iç ortam sıcaklıklarının ısıtıcıya göre yatay ve düşey doğrultulardaki yerel değişimleri Şekil 3.1 ve 3.2’de verilmektedir. Yatay doğrultu üzerindeki değişimler dikkatle incelendiğinde, genel karakter olarak ısıtıcı komşuluğundaki yerel istasyonların (T_{a1}) yüksek sıcaklıklara sahip olduğu ve ısıtıcı yüzeyinden uzaklaştıkça sıcaklıkların azalarak düşük sıcaklık farkları içerecek şekilde ($< 1 \text{ }^\circ\text{C}$) aynı değere yakınsadıkları görülmektedir. İlgili davranış, güvenilir çalışma süresi içerisinde ulaşılan ince termal sınır tabaka kalınlığının sonucudur. Bu duruma örnek olarak $t = 2$ dk. için 2 nolu (T_{2a} : T_{21} , T_{22} , T_{23}) ve 3 nolu (T_{3a} : T_{31} , T_{32} , T_{33}) yatay ölçüm hattından ölçülen sıcaklık değerleri verilebilir. İlgili ölçüm istasyonuna ait yerel sıcaklıklar T_{21} , T_{22} , T_{23} , sırasıyla, $27,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $26,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ve T_{31} , T_{32} , T_{33} için sırasıyla $28,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$ şeklindedir. Isı alıcıya göre düşey doğrultudaki sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise yerel sıcaklıkların kapalı hacmin taban komşuluğunda minimum değere sahip olduğunu ve tabandan uzaklaştıkça önemli düzeyde artışlar sergilediği görülmektedir. Bu davranış, ısınan havanın yükselmesi ve kapalı hacmin üst yarı bölgesinde aktif karışıma katkı sunan sirkülasyon bölgelerinin varlığı ile açıklanabilir. 2 nolu düşey ölçüm hattında (T_{a2} : T_{12} , T_{22} , T_{32} , T_{42}) $t = 2$ dk. için ulaşılan değerler ($25,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $29 \text{ }^\circ\text{C}$, $31,3 \text{ }^\circ\text{C}$) örnek olarak verilebilir.

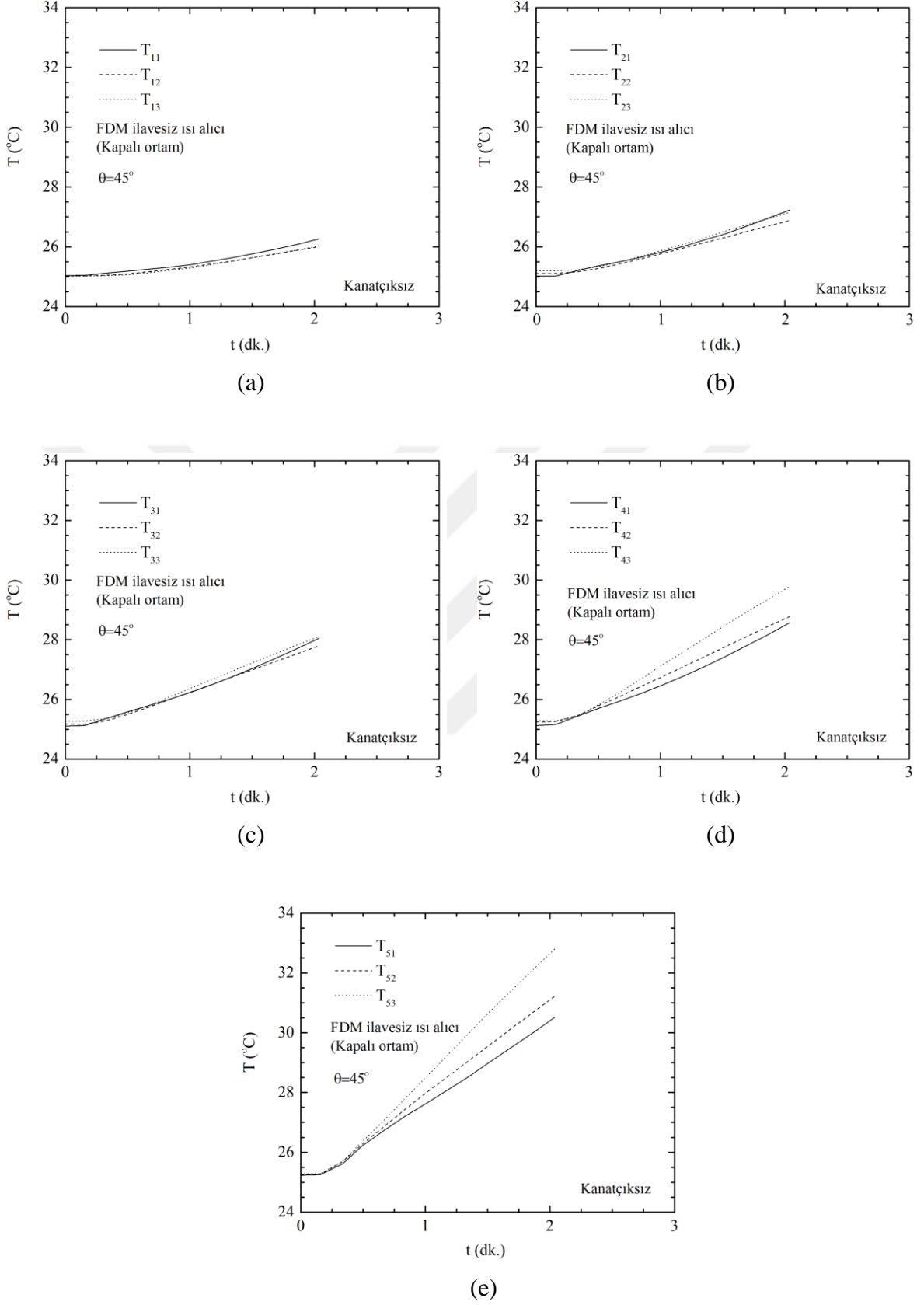
Açısal konumun (θ) 45° ve 90° (yatay konum) değerleri için, yatay ve düşey doğrultulara ait sıcaklık dağılımları (Şekil 3-4 ve Şekil 5-6) $\theta = 0^\circ$ durumu ile benzer davranışlar sergilemektedir. Burada, konum açısının artışına bağlı olarak, yerel sıcaklıklar arasındaki farkın azaldığı ve eş dağılılı forma yakın bir sıcaklık dağılımına geçildiği not edilmelidir. Bu davranış, ısı alıcıya paralel olarak yükselen sıcak hava hareketinin konum açısının artışına bağlı olarak kapalı hacmin sağ cidarına doğru yönlenmesiyle açıklanabilir. İlgili yönelim, doğal taşınım hücrelerinin genişlemesine ve homojen bir hava karışımının oluşmasına katkı sunmaktadır.



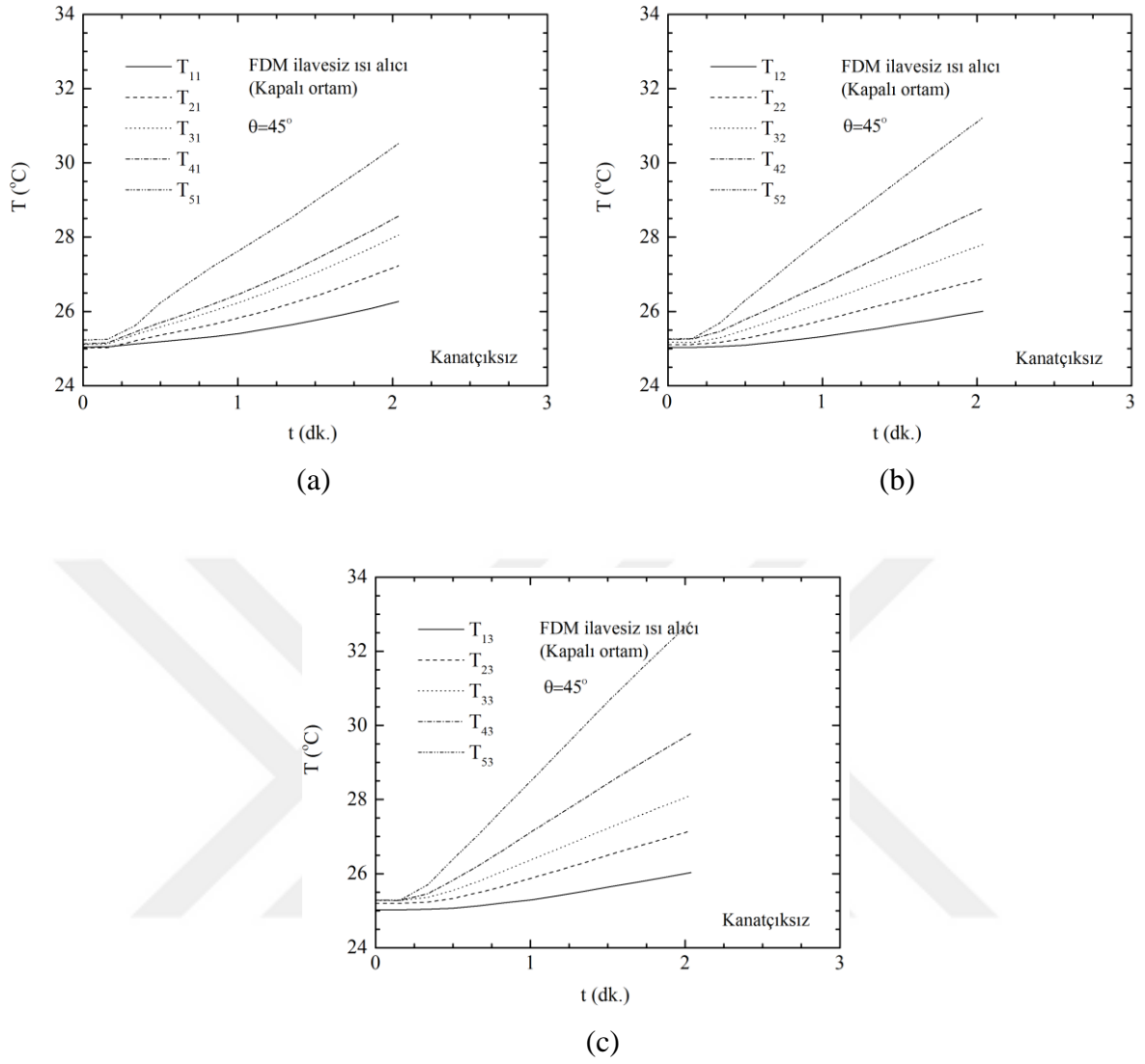
Şekil 3.1. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d) ve T_{5a} (e)



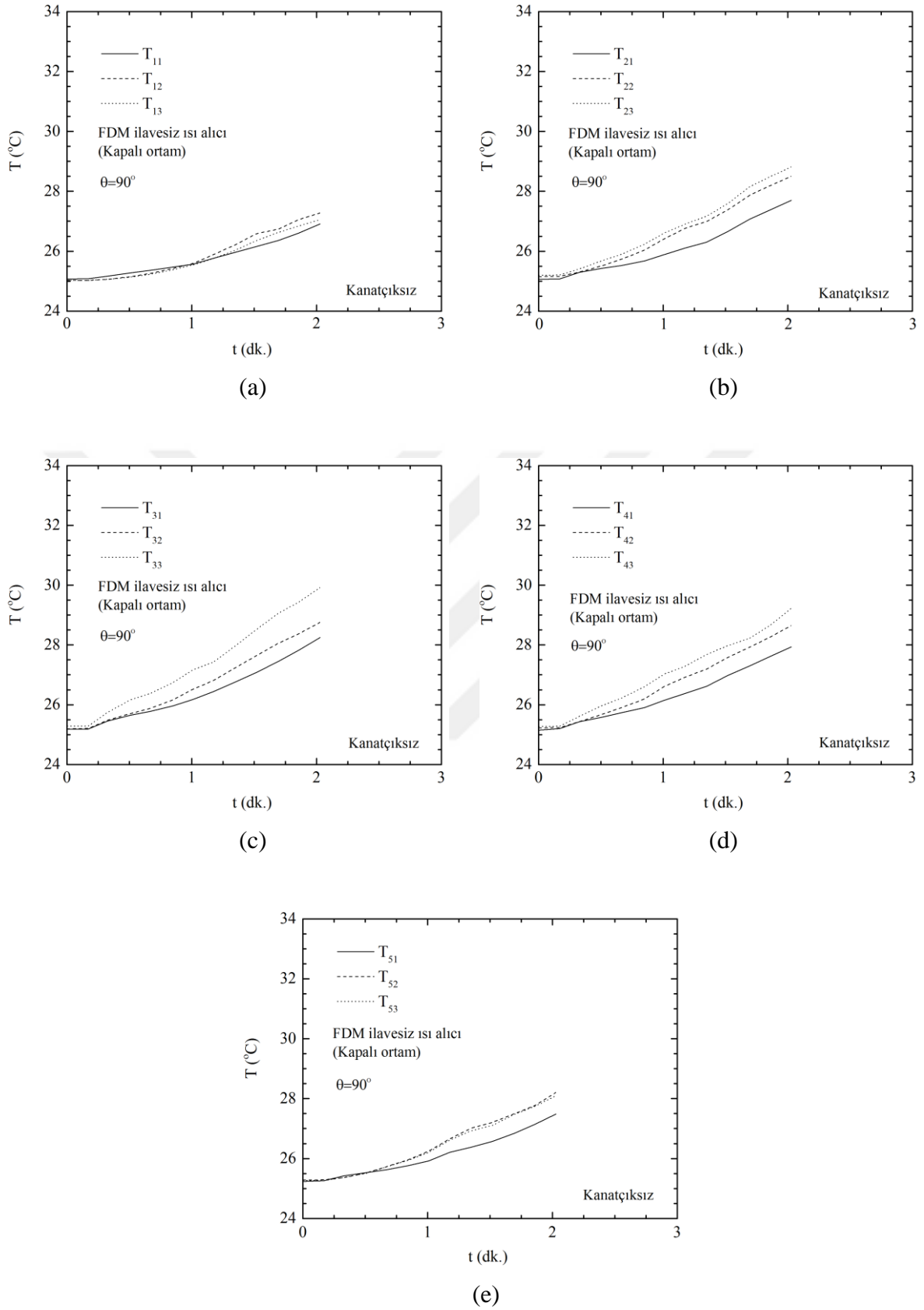
Şekil 3.2. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b) ve T_{a3} (c).



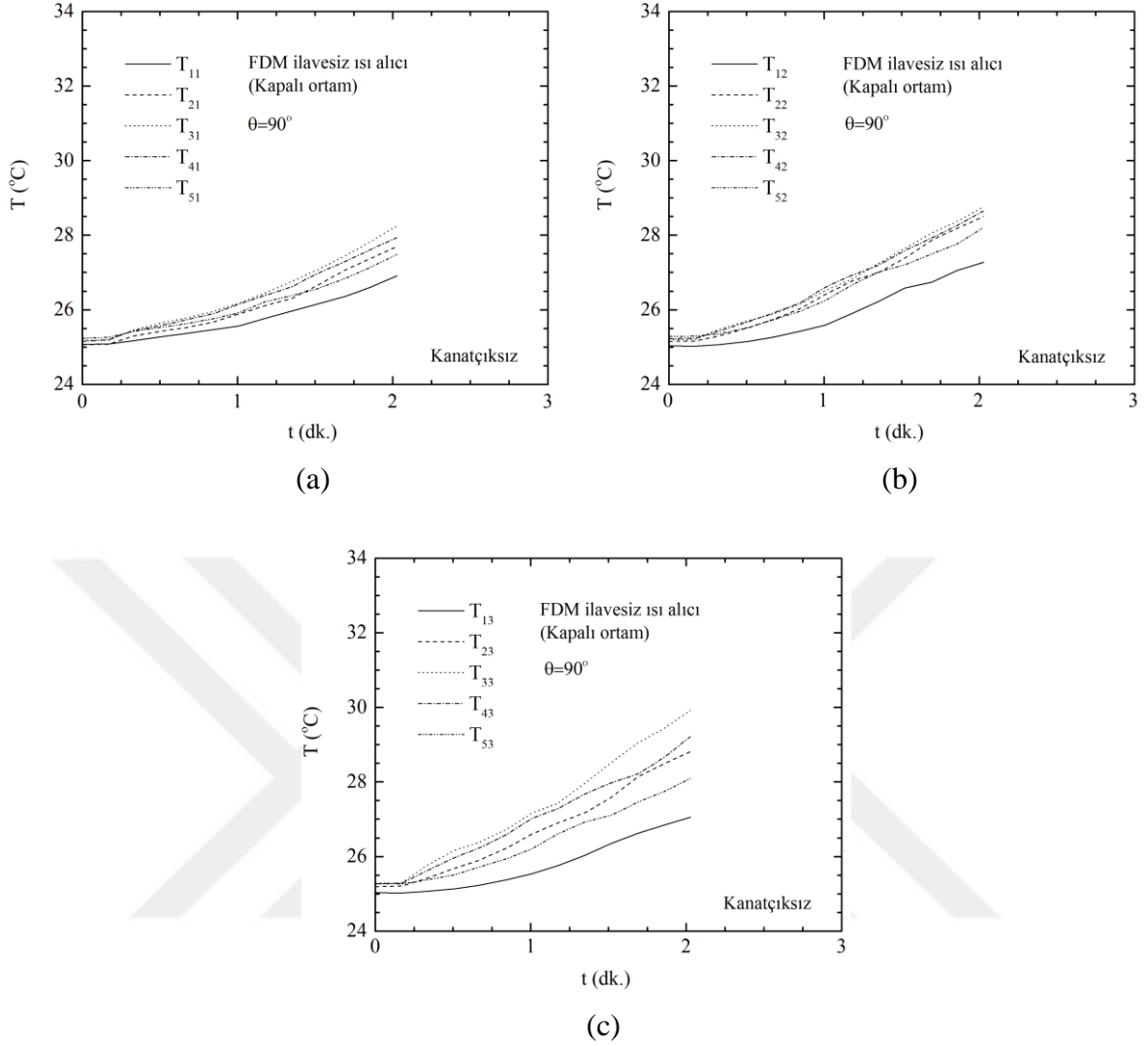
Şekil 3.3. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d) ve T_{5a} (e)



Şekil 3.4. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



Şekil 3.5. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



Şekil 3.6. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).

FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesi için, konum açısının iç ortam sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 3.7 - 3.12'de sunulmuştur. $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° için ısıtıcıya göre düşey doğrultudaki yerel istasyonlar değerlendirildiğinde, genel karakter olarak, sıcaklıklarının artış eğilimi sergilediği ve ısı alıcı yüzeyinden iç ortama doğru daha düşük değerler aldığı görülmektedir (Şekil 3.7, 3.9 ve 3.11). Bu davranış, ısı geçiş yönünün ısı alıcı yüzeyinden (sıcak yüzey) dış cidara (soğuk yüzey) doğru olmasının bir sonucudur. Tüm açısız konumlar için ısıl yükleme sürecinin başlangıcında ($t < 1$ dk.) yerel noktadaki sıcaklıkların değişmediği, $t > 1$ dk. anından itibaren sıcak yüzeye yakın yerel nokta ($T_{a1} : T_{11}, T_{21}, T_{31}, T_{41}$) sıcaklıklarının arttığı görülmektedir.

Isı alıcının düşey konumu ($\theta = 0^\circ$) için FDM bölgesine ait yerel sıcaklık değişimleri eşit aralıklara sahip 5 farklı düşey doğrultu üzerinden Şekil 3.7’de verilmektedir. Sıcaklık artışlarının ilk 1 dakikalık periyod haricinde lineer bir artış sergilediği görülmektedir. Ulaşılan maksimum sıcaklık değerleri dikkate alındığında ($< 34^\circ\text{C}$), ilgili ölçüm noktalarında faz geçişinin (katı-sıvı) tamamlanmadığı bir başka ifade ile ısı enerjisinin FDM içerisinde duyulur formda depolandığı söylenebilir. Bu davranış, incelenen bölge dahilinde iletim mekanizmasının ısı geçişi üzerindeki baskın rolünü ortaya koymaktadır. Grafikler incelendiğinde $t > 4$ dk.’dan itibaren birinci yerel noktalara ait sıcaklık artış oranlarında zayıf bir azalmanın sergilendiği görülmektedir. Bu davranış, ilgili yerel noktaların katı/sıvı geçiş başlama sıcaklığına ulaşması ($T_g = 29^\circ\text{C}$) ve gizli ısı depolamanın sürece dahil olmasının bir sonucudur. Burada, 1 nolu (T_{a1} : T_{11} , T_{21} , T_{31} , T_{41} , T_{51}) yerel istasyonların alıcı yüzeyinden 8 mm uzaklıkta olduğu ve ara bölgenin (ısı alıcı- T_{a1} arası) davranışı hakkında bilgi veremeyeceği not edilmelidir. İç ortam sıcaklığının ısı alıcıya göre farklı yatay doğrultulardaki değişimi Şekil 3.8’de verilmektedir. İlgili grafikler incelendiğinde, 5 nolu istasyon (T_{5a} : T_{51} , T_{52} , T_{53}) haricinde iç ortam sıcaklıklarının üst yarı bölgeye doğru, düşük sıcaklık farkları verecek şekilde ($< 1^\circ\text{C}$) bir artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Nicel olarak, $t = 7$ dk.’da, 2 nolu hat (T_{a2} : T_{12} , T_{22} , T_{32} , T_{42}) boyunca ölçülen sıcaklıklar ($26,4^\circ\text{C}$, $26,7^\circ\text{C}$, $26,7^\circ\text{C}$, $27,6^\circ\text{C}$), bu davranışa örnek olarak verilebilir. Üst bölgelerde ortaya çıkan sıcaklık farkı, ısı alıcı komşuluğundaki sıvı FDM bölgesinin varlığı ile açıklanabilir. Oldukça dar olan bu bölge içerisinde, doğal taşınım etkisiyle sıcak akışkan yukarı yönlü hareket etmekte ve bünyesinde barındırdığı ısı enerjisi katı FDM’ye aktarmaktadır. Burada 5 nolu sıcaklık ölçüm istasyonunun (T_{5a} : T_{51} , T_{52} , T_{53}) katı FDM bölgesinin dışında kaldığı ve ısı geçiş süresinin ilerleyen periyotlarında hacimsel genişlemeye bağlı olarak sıvı FDM ile buluştuğu not edilmelidir.

$\theta = 45^\circ$ ve 90° ye ait yerel sıcaklık profilleri incelendiğinde, yerel sıcaklıklardaki artış hızlarının düşey konuma kıyasla ($\theta = 0^\circ$) farklı davranışlar sergilediği görülmektedir (Şekil 3.9 - 3.12). Genel karakter olarak, yerel nokta sıcaklıkları sırasıyla katı/sıvı faz dönüşüm sıcaklığının üst limitine ulaşıncaya kadar pozitif azalan bir eğilim, ani hızlı bir artış ve tekrar pozitif azalan bir eğilim sergileyerek artmaktadır.

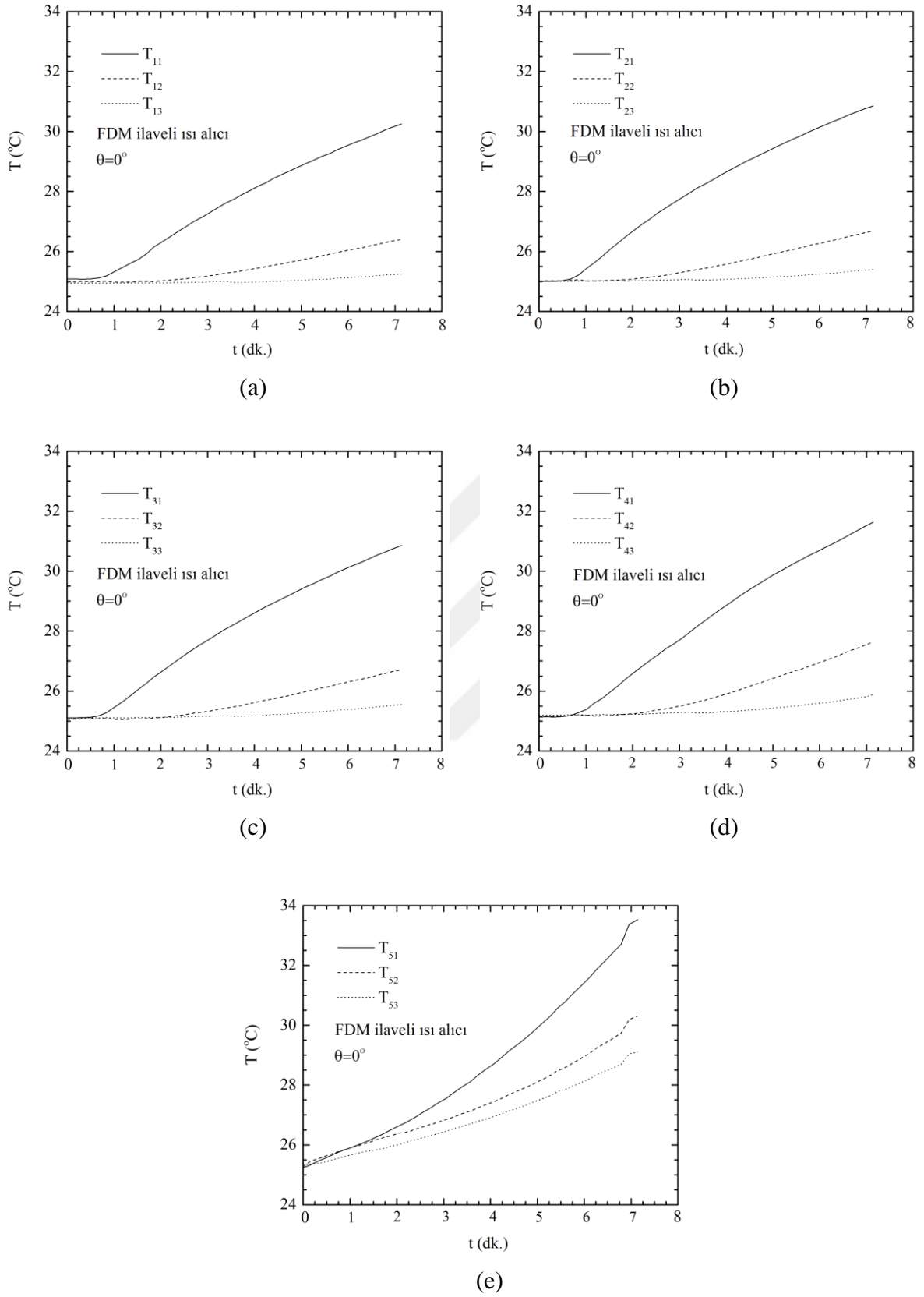
$\theta = 45^\circ$ konumuna ait iç ortam sıcaklıklarının farklı yatay ve düşey hatlardaki yerel değişimleri, sırasıyla, Şekil 3.9 – 3.10’da verilmektedir. Isıtma sürecinin başlangıcında ($t < 7$ dk.), her iki doğrultudaki yerel sıcaklıklar benzer değişimler (pozitif azalan eğilim) sergilemektedir. Bu davranış, FDM içerisindeki ısı geçişinde, iletim mekanizmasının

baskın rolünü ortaya koymaktadır. İlerleyen süreçte ($t = 20$ dk.) ise katı/sıvı faz dönüşüm sıcaklığının aşılmasıyla, kapalı hacmin üst yarı bölgesindeki hızlı sıcaklık artışları meydana gelmektedir. Bu davranış, iletim mekanizmasının ilgili bölgedeki baskın rolünü doğal taşınım mekanizmasına terk etmesiyle açıklanabilir. Diğer bir ifadeyle, yoğunluk farkının neden olduğu yukarı yönlü sıcak FDM hareketi yüksek nitelikli ısı enerjisi kapalı hacmin üst yarı bölgesine etkin bir şekilde taşımakta ve komşuluğundaki katı FDM'ye geçişini hızlandırmaktadır. Aynı zaman adımı için ($t = 20$ dk.), 2 ($T_{2a}: T_{21} = 38$ °C, $T_{22} = 31$ °C, $T_{23} = 28$ °C), 3 ($T_{3a}: T_{31} = 43$ °C, $T_{32} = 32$ °C, $T_{33} = 29$ °C) ve 4 ($T_{4a}: T_{41} = 50,3$ °C, $T_{42} = 38,2$ °C, $T_{43} = 34$ °) nolu istasyonlardaki sıcaklıklar karşılaştırıldığında 4 nolu istasyon için katı/sıvı faz dönüşümünün, güvenilir çalışma süreci içerisinde bütünüyle, 2 ve 3 nolu sıcaklık ölçüm istasyonları için ise kısmi düzeyde tamamlandığı görülmektedir. Bu davranış, katı/sıvı erime arayüzünün yukarı yönlü ve dışa doğru genişlediğinin bir göstergesidir. İlerleyen bölümlerde mevcut mekanizma erime fotoğrafları üzerinden detaylı olarak tartışılacaktır. Burada, 5 nolu sıcaklık ölçüm istasyonunun erime sürecinin başlangıcında FDM içerisinde yer almadığı, genişleyen FDM'nin üst bölgeye taşınmasıyla sıcaklık değişimlerinin şekillendiği not edilmelidir. Grafiklerden çıkarılacak diğer önemli bir sonuç ise, güvenilir çalışma süresi sonunda faz dönüşümünün bütünüyle tamamlanmamasıdır. Bu durum, ısı alıcıya paralel hatlardaki sıcaklık değişimlerinden net bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.10). Dikkat edilecek olursa, T_{21} noktası hariç 1 ve 2 nolu ölçüm hatlarındaki sıcaklıkların katı/sıvı faz dönüşüm sıcaklığının altında (< 34 °C) değerlere sahiptir. Bu bölgenin büyüklüğü, ısı alıcıdan geçen ısının daha düşük FDM sıcaklıklarında depolanmasını kısıtlamakta ve buna bağlı olarak ısı alıcı performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

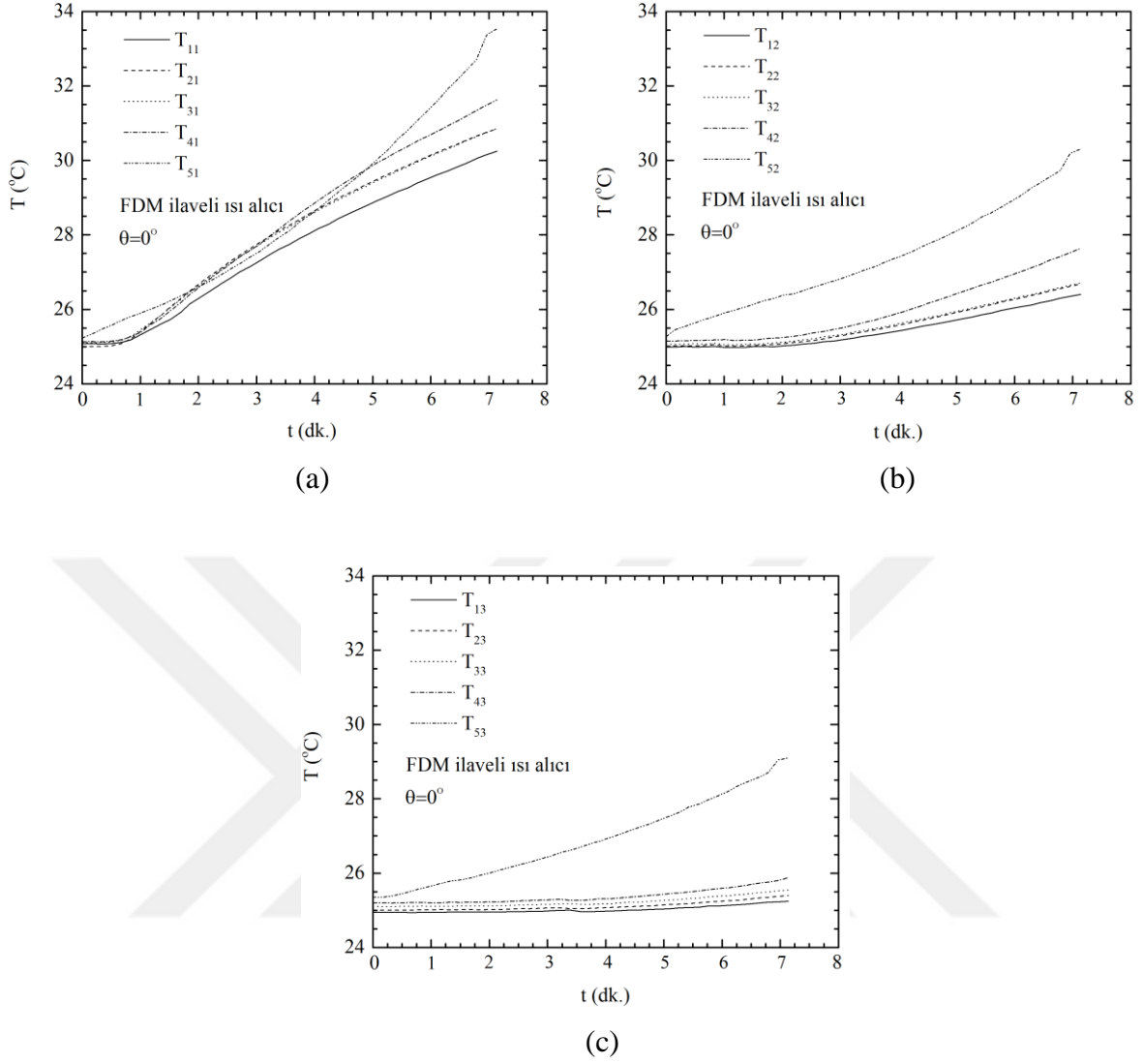
Yatay konuma ($\theta = 90^\circ$) ait yerel sıcaklık değişimleri farklı yatay ve düşey doğrultular için Şekil 3.11 – 3.12'de verilmiştir. Genel karakter olarak, her bir doğrultu için, farklı hatlara ait sıcaklık değişimlerinin kendi içinde benzer eğilimler sergilediği görülmektedir. Nicel olarak, $t = 20$ dk. için 1 nolu (T_{11}, T_{12}, T_{13}) ve 3 nolu (T_{31}, T_{32}, T_{33}) hatlarda ölçülen sıcaklıklar sırasıyla $41,5$ °C, $31,6$ °C, $28,2$ °C; $42,7$ °C, $32,2$ °C, $29,8$ °C bu davranışa örnek olarak verilebilir. Dikkat edilecek olursa, ısı alıcı yüzeye eşit mesafede bulunan istasyonlar arasındaki sıcaklık farkının oldukça küçük olduğu ($< 1,6$ °C) görülebilir. Bu durum, mevcut açsal düzenleme için ısı geçiş hızının ısı alıcı boyunca değişmediğini ortaya koymaktadır. Bu davranışın, ısı geçişinin ilk periyodunda etkin olan iletim ve sonrasında baskın hale geçen taşınım mekanizmalarını kapsaması, ilgili sıcaklık

değişimlerinin diğer önemli bir sonucudur. $t = 27,4$ dk. anında ikinci yerel istasyonlara ait (T_{a2} : T_{12} , T_{22} , T_{32} , T_{42}) sıcaklık değerleri (sırasıyla, $32,8$ °C, $34,7$ °C, $34,9$ °C, $33,7$ °C) bu davranışa örnek olarak verilebilir (Şekil 3.12 b). Benzer şekilde, erime sürecinin sonunda ($t = 47$ dk.) ise ilgili yerel nokta sıcaklıkları sırasıyla $54,3$ °C, $54,8$ °C, $54,9$ °C, $54,5$ °C değerlerini almaktadır. Bu davranış, ısı alıcı yüzey boyunca uniform bir erime davranışının gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, ulaşılan minimum sıcaklıklar dikkate alındığında, kapalı hacim içerisindeki FDM'nin tamamının katı/sıvı faz dönüşümünü tamamladığı görülmektedir. Bu durum, ısıtıcıdan aktarılan ısının daha düşük FDM sıcaklıklarında depolanmasına ve düşük ısı alıcı yüzey sıcaklıklarına ulaşılmasına imkan sağlamaktadır.

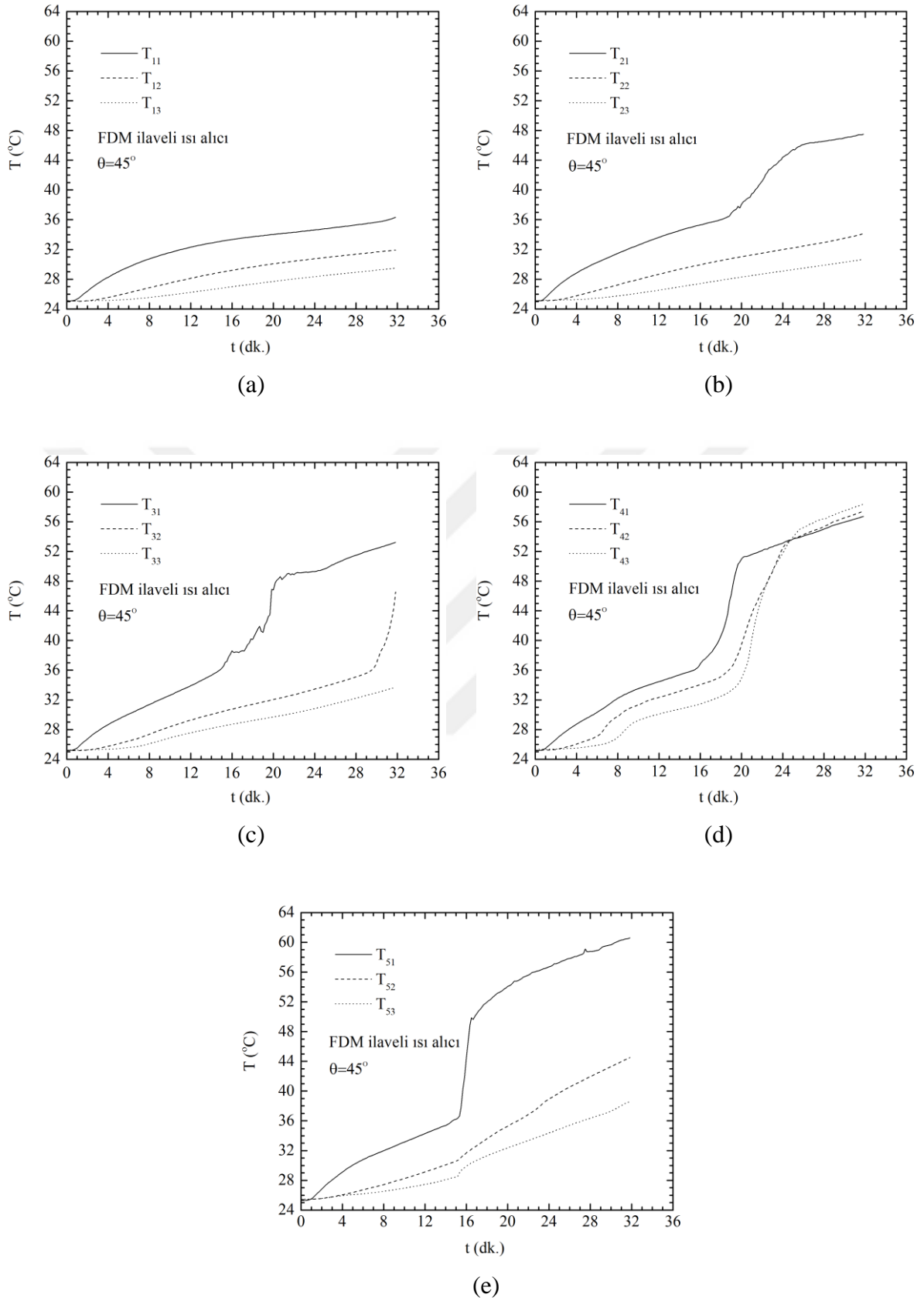




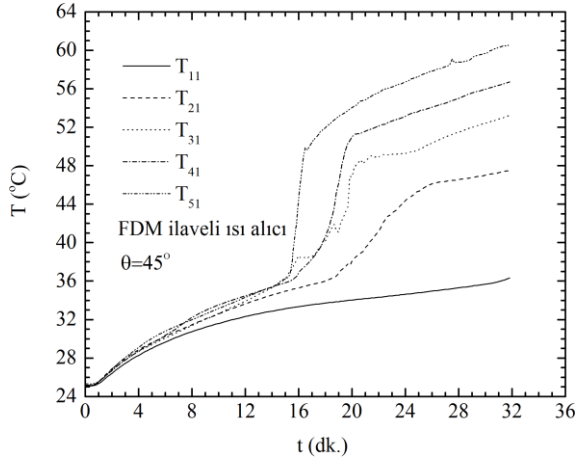
Şekil 3.7. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



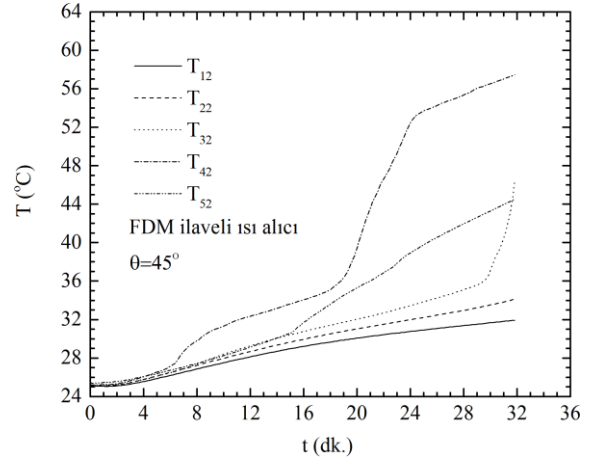
Şekil 3.8. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



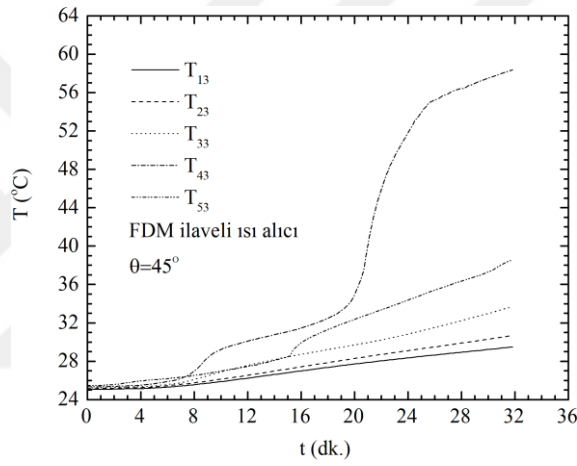
Şekil 3.9. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



(a)

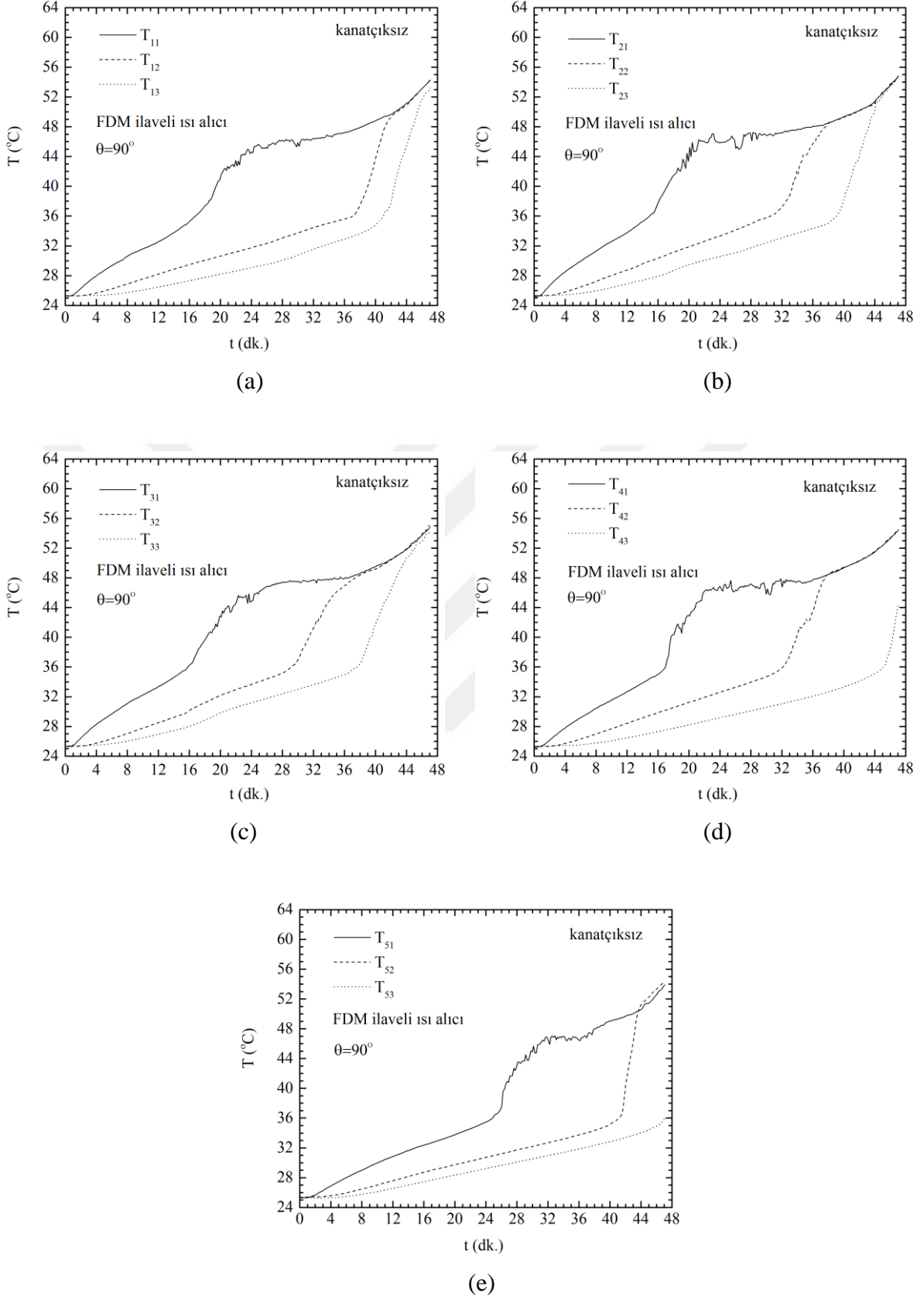


(b)

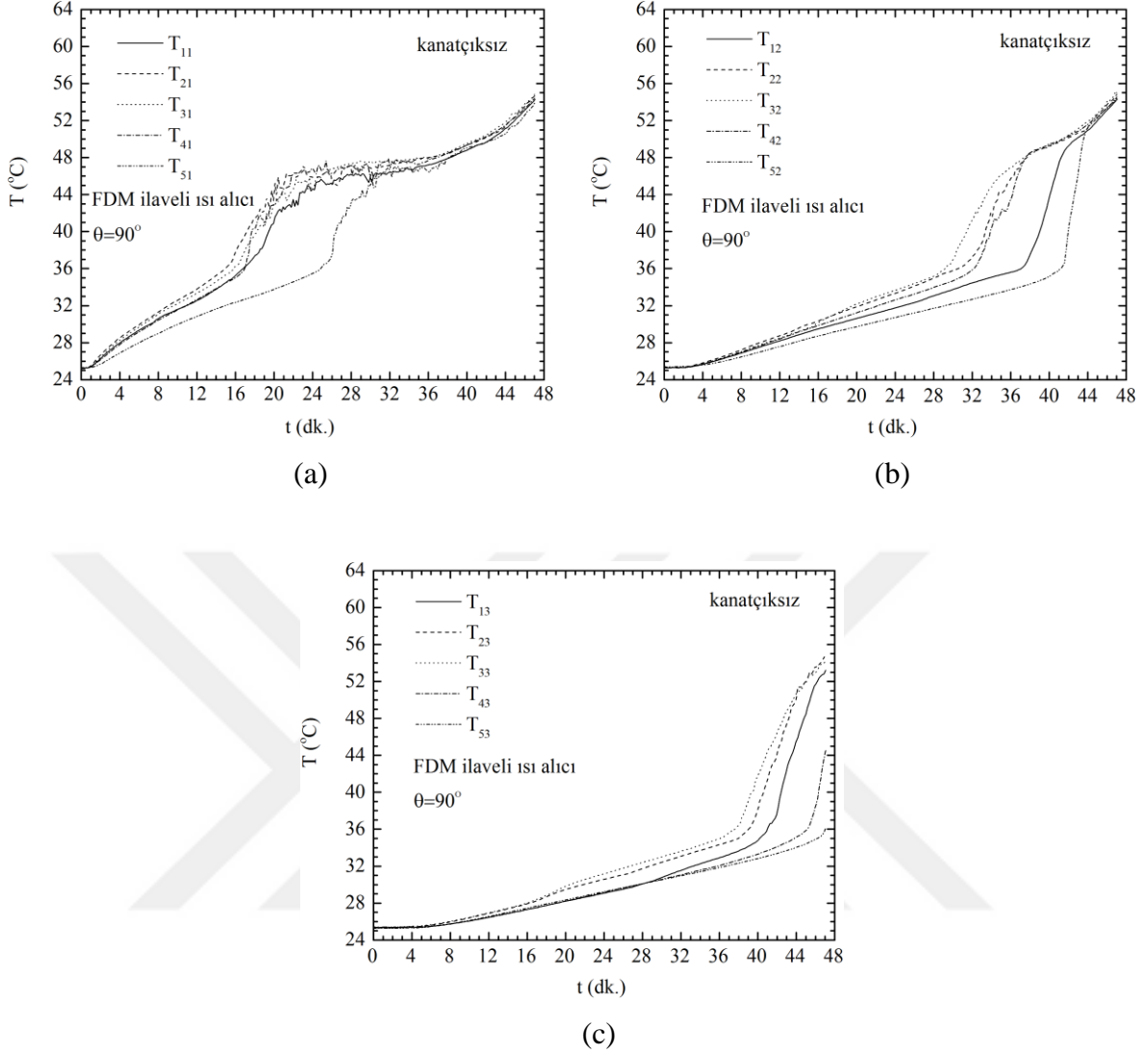


(c)

Şekil 3.10. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



Şekil 3.11. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



Şekil 3.12. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).

3.1.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi

Isı alıcı termal performansının belirlenmesinde temel kriter olan ısıtıcı yüzey sıcaklığının zaman bağımlı değişimi $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° için Şekil 3.13'de verilmiştir. Sınırlandırılmış bölge içerisindeki ortamın (hava / FDM) ısıl davranışına bağlı olarak ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık profili önemli değişimler göstermektedir. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesi için, genel karakter olarak, yerel sıcaklıkların açısız konumdan bağımsız olarak birbirine yakın değerler aldığı ve lineere yakın bir artış sergilediği Şekil 3.13a,c ve e' de görülmektedir. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere, havanın düşük ısı iletim katsayısına sahip olması ve ısı alıcı-hava arasındaki düşük düzeyli doğal taşınım bu

davranışın temel nedenidir. Bu durum, elektronik ekipmanın güvenilir çalışma sürelerini önemli düzeyde kısaltmaktadır. Şekil 3.13 a, c ve e’de $\theta = 0^\circ$, 45° ve 90° için güvenilir kullanım sürelerinin yaklaşık 2 dk. düzeylerinde olduğu görülmektedir.

FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ait yerel sıcaklık değişimleri $\theta = 0^\circ$, 45° ve 90° için, sırasıyla, Şekil 3.13 b, d ve f’de sunulmuştur. Görüleceği üzere ısıtıcı yüzey sıcaklık profili konum açısına bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir. Bu durum, daha önceki bölümlerde de ifade edildiği üzere, FDM bünyesinde depolanan gizli ısı miktarı ve sıvı FDM içerisindeki doğal taşınım mekanizmasının etkinliği ile ilişkilidir. Genel karakter olarak, ısıtma sürecinin başlangıcında ($t < 1$ dk.), ısıtıcı yüzey üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımının olduğu ve yerel sıcaklıkların hızlı bir artış sergilediği görülmektedir. İlgili zaman dilimi için Şekil 3.7, 3.9 ve 3.11’deki iç ortam sıcaklıkları dikkate alındığında, üretilen ısının yüksek ısı iletim katsayısı ve ısıl sığaya sahip ısı alıcı tarafından duyulur ısı formunda depolandığı ve düşük ısı iletime sahip olması nedeniyle depolanan ısınının FDM’ye hızlı bir şekilde aktarılamadığı görülebilir. $1 < t < 5$ dk. periyodunda, ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının faz dönüşüm sıcaklıklarını aşmasıyla, ısı alıcı komşuluğunda dar bir sıvı FDM tabakası oluşmaktadır. İlgili tabaka içerisinde ısının gizli formda depolanmasıyla, Şekil 3.13 b, d ve f görüldüğü üzere, sıcaklık artış hızlarının eğimi bir miktar azalmaktadır. Bu zaman diliminde, doğal taşınım hücrelerinin oluşumu için yeterli alanın oluşmadığı bir başka ifade ile ısı geçişinde iletim mekanizmasının geçerli olduğu not edilmelidir. İlerleyen süreçte ($t > 5$ dk.), sıvı FDM tabakasının kalınlaşmasıyla ısı alıcı komşuluğunda ayrık formda, küçük boyutlu doğal taşınım hücreleri meydana gelmekte ve sınırlı düzeyde yukarı yönlü FDM hareketi gerçekleşmektedir. Bu akışkan hareketi, ısı alıcı-FDM arasındaki ısı geçişini hızlandırmakta ve Şekil 3.13’de görüldüğü gibi ısıtıcı yüzey sıcaklığının artış eğiliminin azalmasına katkı sağlamaktadır. İlgili azalım düzeyleri konum açısının artışına bağlı olarak farklı eğilimler sergilemektedir.

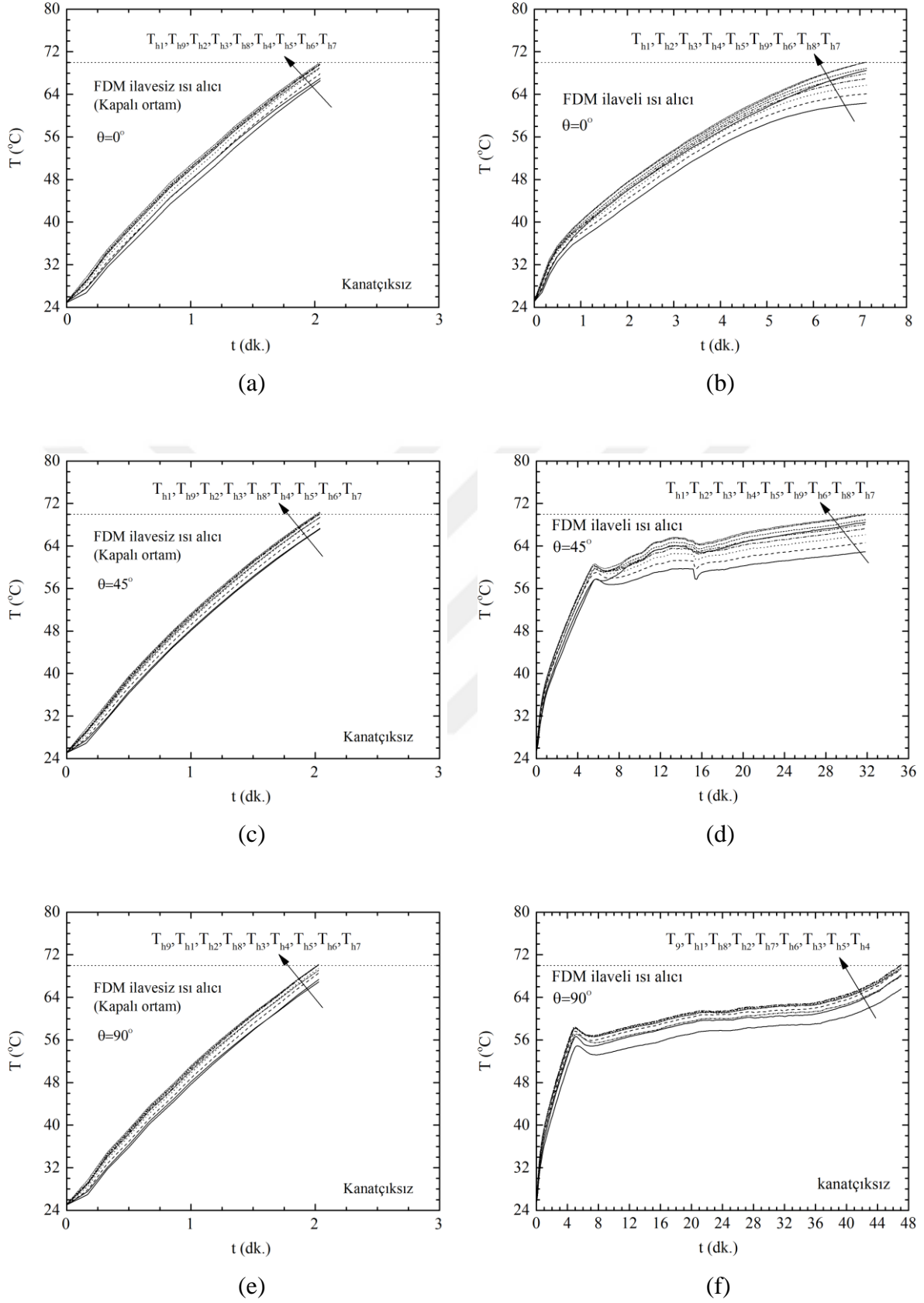
Şekil 3.13 incelendiğinde, $\theta = 0^\circ$ (düşey konum) için yüzey sıcaklıklarının $\theta = 45^\circ$ ve 90° ’ye göre daha yüksek değerler aldığı ve ısı geçiş sürecinin sonuna kadar sürekli artan bir karaktere sahip olduğu görülmektedir. Maksimum kritik yüzey sıcaklığı (70°C) referans alındığında, $\theta = 0^\circ$ için 7 nolu ölçüm istasyonunun (T_{h7}) $t = 7$ dk. gibi kısa bir sürede limit sıcaklık değerine ulaştığı görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ ’ye ait iç ortam sıcaklık değişimleri hatırlanacak olursa (Şekil 3.7 ve 3.8), mevcut geometrik düzenlemenin etkin bir doğal taşınım mekanizmasına imkan sunmadığı söylenebilir. Bir başka ifadeyle, güvenilir çalışma süresi sonunda kapalı hacmin içerisinde halen katı/sıvı faz dönüşümünü

tamamlanmamış ve gizli ısı depolama sürecine katkı sunmamış FDM bölgesinin varlığı söz konusudur. $\theta = 45^\circ$ ve 90° için ise yerel sıcaklıklar $\theta = 0^\circ$ 'den farklı olarak $t > 5$ dk. sonrasında sürekli olmayan bir artış eğilimi sergilemektedir.

$\theta = 45^\circ$ 'ye ait yerel sıcaklık değişimleri Şekil 3.13 d'de verilmiştir. Görüleceği üzere, ısıtıcı yüzey sıcaklıkları, sırasıyla, 5,5 dk. $< t < 6,5$ dk. aralığında $0,5^\circ\text{C}$ düzeyinde bir azalma, 7 dk. $< t < 8$ dk. aralığında yerel sıcaklık değerlerinin sabit kalması, 8 dk. $< t < 13,5$ dk. aralığında 1°C düzeyinde bir artış, 13,5 dk. $< t < 16$ dk. aralığında 1°C 'luk ikinci bir azalma ve $t > 16$ dk. için düşük hızlarda sürekli bir artış sergilemektedir. Sıcaklıklardaki bu süreksiz değişim, ısı geçişinde belirleyici rol oynayan doğal taşınım hücrelerinin gelişimi ile ilişkilendirilebilir. Isı geçiş sürecinin 5 dk. $< t < 16$ dk. zaman diliminde, iç ortam içerisindeki sıcak yüzeye yakın birinci yerel istasyonların (T_{a1} : T_{11} , T_{21} , T_{31} , T_{41}) katı/sıvı faz dönüşüm sürecini tamamladıkları, diğer yerel istasyonların (T_{a2} , T_{a3}) ise kısmi düzeyde faz geçiş sürecine dahil oldukları; iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimleri üzerinden görülebilir (Şekil 3.9 ve 3.10). İlerleyen süreçte ise ($t > 16$ dk.), 2 nolu (T_{a2}) ve 3 (T_{a3}) nolu yerel istasyonların faz dönüşüm sürecine dahil olmakta ve doğal taşınım kapalı hacmin sol alt köşesi hariç tüm hacmi kontrol altına almaktadır. Bu durum, mevcut düzenleme için aynı zaman adımında $\theta = 0^\circ$ 'ye kıyasla daha düşük ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının elde edilmesine imkan sunmaktadır. Örnek olarak, $t = 7$ dk. için kritik yerel nokta sıcaklığı $\theta = 0^\circ$ 'da 70°C değerini alırken; $\theta = 45^\circ$ 'de 60°C olduğu görülmektedir.

Yatay konuma ($\theta = 90^\circ$) ait yerel sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise $t = 4,5-7$ dk. aralığında sıcaklık değerlerinde $1,5^\circ\text{C}$ seviyesinde ani bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3.13 f). Burada, $\theta = 45^\circ$ ile karşılaştırıldığında sıcaklık azalım miktarının daha fazla ve daha erken bir zaman adımında gerçekleştiği vurgulanmalıdır. İlerleyen süreçte (7 dk. $< t < 36$ dk.), yerel nokta sıcaklık artış hızlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu davranış, iç ortamdaki 1 nolu (T_{a1} : T_{11} , T_{21} , T_{31} , T_{41}) ve 2 nolu (T_{a2} : T_{12} , T_{22} , T_{32} , T_{42}) yerel istasyonların faz dönüşüm sürecini tamamlamaları ile açıklanabilir. Isıtma sürecinin devamında ise ($t > 36$ dk.), yerel nokta sıcaklıklarındaki artışın hızlandığı görülmektedir. Bu durum, iç ortamdaki FDM'nin duyulur ısı depolama sürecine geçtiğini göstermektedir. Aynı zaman adımı için $\theta = 90^\circ$ 'nin $\theta = 45^\circ$ 'ye kıyasla daha düşük yüzey sıcaklıklarına cevap verdiği görülmektedir. Bu durumun, daha önce belirtildiği üzere, açılmal konum artışına bağlı olarak taşınım hücrelerinin daha geniş bir hacme yayılması ve buna bağlı olarak FDM'ye olan ısı transferinin iyileştirilmesi ile ilişkili olduğu hatırlanmalıdır. Örnek olarak, ısı geçişinin başlangıcında ($t = 7$ dk.) $\theta = 0^\circ$, 45° ve

90° için ölçülen maksimum sıcaklıkların sırasıyla 70 °C, 60 °C ve 56 °C değerlerini aldığı görülmektedir. Bu durum, düşey konuma kıyasla, 45° ve 90° için ısıtıcı yüzey sıcaklıklarında sırasıyla % 14 ve % 20 oranında bir azalma sağlandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, konum açısının güvenilir kullanım süreleri üzerinde de önemli iyileşmeler sağladığı ilgili grafiklerden görülmektedir. Limit çalışma sıcaklığı 70 °C referans alınarak $\theta = 0^\circ$, 45° ve 90° için bu sürelerin sırasıyla 7,2 dk., 32,5 dk. ve 47 dk. olduğu görülmektedir. Konum açısının artmasına bağlı olarak ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının daha üniform bir dağılıma sahip olması diğer bir önemli çıktı olarak ilgili grafiklerden görülebilir. Bu davranış, ısı alıcı komşuluğundaki FDM'nin üniform erime davranışı ile ilişkilidir. $\theta = 0^\circ$, 45° ve 90° için ısıtıcı yüzey üzerinde en yüksek sıcaklığın elde edildiği yerel nokta (T_h) ve ısıtıcı yüzey üzerindeki maksimum sıcaklık farkı ($T_{h,maximum}-T_{h,minimum}$) sırasıyla T_{h7} , T_{h7} , T_{h4} ; 6 °C, 5 °C ve 2 °C olarak elde edilmiştir. Burada, artan konum açısı ile ısıtıcı yüzey üzerinde daha üniform bir soğutmanın sağlandığı ifade edilmelidir. Bu sonuç, yüksek sıcaklık gradyanı ile ortaya çıkabilecek termal gerilmelerin en aza indirgenmesi açısından çok önemlidir. Maksimum yerel sıcaklık noktaları incelendiğinde açısal konuma bağlı olarak farklı istasyonların varlığı göze çarpmaktadır. Bu farklılık, üniform olmayan erime davranışı ve eksenel ısı kayıpları ile ilişkilidir.



Şekil 3.13. Isı alıcı düzenlemeleri için ($n = 0$) ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı: FDM-ilavesiz ısı alıcı, $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=45^\circ$ (c), $\theta=90^\circ$ (e); FDM-ilaveli ısı alıcı, $\theta=0^\circ$ (b), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=90^\circ$ (f)

3.1.3. Erime Arayüzey Gelişimi

Erime arayüzey gelişimi, faz değişim süreçlerindeki FDM hareketi ve etkin ısı transfer mekanizmalarının yorumlanmasında kullanılan önemli bir göstergedir. Şekil 3.14 ve 3.15’de sırasıyla FDM bölgesinin yanal ve alt yüzeylerine ait erime arayüzey, fotoğrafları yedi açısız konum ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) için farklı zaman adımlarında sunulmuştur.

Fotoğrafların yorumlanmasına geçmeden önce çalışmada kullanılan FDM’ye ait renk skalasının tanımlanması faydalı olacaktır. N-icosane katı fazda mat beyaz bir renge sahipken sıvı faza geçiş süreci ile birlikte şeffaf bir renge dönüşmektedir. Tez bütününde arayüz gelişimi için siyah-beyaz renk skalası tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, erime arayüzey fotoğraflarında beyaz ve siyah renkler sırasıyla katı ve sıvı faz bölgelerini temsil etmektedir. Burada, fotoğraflardaki son görüntünün limit çalışma sıcaklığına ($T_{\text{limit}} = 70^\circ\text{C}$) ulaşıldığı andaki erime arayüzeyine ait olduğu not edilmelidir.

Tüm açısız konumlar için, ısı geçiş sürecinin ilk periyodunda ($t < 6$ dk.), ısı alıcı yüzeyi komşuluğunda uniform yapıya sahip ince bir sıvı FDM tabakası meydana gelmektedir (Şekil 3.14 a-f). Doğal taşınım hücrelerinin oluşması için yeterli sıvı bölge kalınlığına ulaşamayan bu periyotta, ısı geçişi iletim mekanizması ile gerçekleştirilmektedir. Diğer bir ifadeyle, mevcut sıvı hacmi içerisindeki kaldırma kuvvetleri viskoz kuvvetler karşısında ihmal edilebilir düzeydedir. Sıvı FDM’nin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle, ilgili periyotta ısı alıcı yüzeyinden FDM’ye ısı geçişi sınırlanmakta ve bu durum, ısı alıcı yüzey sıcaklıklarının hızlı bir artış sergilemesine neden olmaktadır (Şekil 3.13). Bununla birlikte, FDM’nin erime sürecindeki hacimsel genişlemesine bağlı olarak katı-sıvı ara yüzeyin en üst bölgesinde hafif bir eğimin olduğu da ifade edilmelidir (Şekil 3.14a, $t = 6$ dk.).

İlerleyen süreçte ($t > 6$ dk.), sıvı FDM bölgesinin genişlemesiyle, kaldırma kuvvetleri viskoz kuvvetlere üstün gelmekte ve bu durum, sıvı FDM içerisindeki taşınım hücrelerinin oluşumuna neden olmaktadır. Düşey konum ($\theta = 0^\circ$) için doğal taşınım etkisinin görüldüğü zaman dilimine ait erime arayüzey gelişimi Şekil 3.14a’da ($t > 6$ dk.) sunulmuştur. Kaldırma kuvvetinin etkisiyle yüksek sıcaklığa sahip sıvı FDM ısı alıcı yüzeyi boyunca yukarı yönlü bir akış hareketi sergilemekte ve bu esnada komşuluğundaki daha soğuk FDM bölgelerine taşınım ile ısı aktarmaktadır. Isı aktarımı sonucu sıcaklığı azalan sıvı FDM bir sonraki adımda akış yönünü değiştirerek aşağı yönlü hareket

etmektedir. Saat yönünün tersi yönde olan bu sirkülasyon hareketi erime arayüzey ilerleme hızını arttırmaktadır. Sınırlandırılmış bölgenin üst kısımlarında daha yüksek sıcaklıklara ulaşılması ve arayüzey ilerleme hızının daha yüksek olması bu mekanizmanın bir sonucudur. Şekil 14a'da görüldüğü üzere, $t = 7,2$ dk. için, erime yüzeyinin üst bölgelerde hafif dışa eğimli (konveks), alt bölgelerde ise linear bir erime arayüzüne sahiptir. Bu süreçte, etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olduğu, taşınım etkilerinin ise üst bölgelerde hafif eğimli bir katı/sıvı ara yüzey oluşumuna bağlı olarak zayıf olduğu belirtilmelidir. Düşük ısı transfer miktarları nedeniyle, önemli miktarda katı FDM'nin erime sürecine katılmadığı Şekil 3.14 a'da net olarak görülmektedir. Erime arayüzeyinin uniform olmayan gelişimi, iç ortam içerisindeki yerel sıcaklık dağılımını doğrulamaktadır.

Erime arayüzeyinin farklı konum açıları ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) altındaki gelişimi, yanal yüzeyler üzerinden Şekil 3.14 b-f'de sunulmuştur. Genel karakter olarak, konum açısının artmasına bağlı olarak, erime arayüzeyinin uniform karakterini değiştirerek ilerleme hızını arttırdığı ve aynı zaman adımı için $\theta = 0^\circ$ 'ye kıyasla daha fazla sıvı FDM düzeylerine ulaşıldığı ilgili arayüzey fotoğraflarından görülmektedir. Bu davranış, doğal taşınım mekanizmasında sürücü potansiyel olan kaldırma kuvvetlerinin ısı alıcı yüzeye göre paralel olan konumunun değişmesiyle açıklanabilir. Bir başka ifade ile konum açısının artmasına bağlı olarak, sıvı FDM'nin ısı alıcıya göre paralel olan hareketi bozulmakta ve daha fazla miktarda sıcak FDM ısı alıcı yüzeyinden ayrılarak katı FDM'yle buluşmaktadır. Yüksek düzeydeki bu etkileşim faz dönüşümünü hızlandırmakta ve doğal taşınım hücrelerinin daha yeni alanlara nüfuz etmesine katkı sunmaktadır. Şekil 3.14 b-f'de görüldüğü üzere, bu etkileşimin bir sonucu olarak, iç ortamın üst kısımlarında etkin olan doğal taşınım hareketi alt bölgelere doğru genişlemekte ve bu bölgelerdeki erime arayüzey ilerleme hızı artmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.14 b-f incelendiğinde ($t > 6$ dk.), alt bölgelerdeki erime arayüzey şeklinin konum açısının artışıyla içe eğimli (konkav) bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Yapısal formdaki bu değişim, $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 75° için oldukça belirgindir. Erime sürecinin devamında ise ($t \geq 12$ dk.), $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 75° için uniform olmayan (düzensiz) erime arayüzeylerinin oluştuğu ve bu düzensizliklerin (dalgalı ara yüzey-kubbemsi) açısal konumdaki artışa bağlı olarak ($\theta = 60^\circ$ ve 75°) arttığı ilgili erime fotoğraflarında görülmektedir. Bu durum, sıvı FDM içerisindeki taşınım hücrelerinin kompleks üç boyutlu hareketi ile açıklanmaktadır (Webb and Viskanta, 1986). Bu akış hareketinin, iç ortam yerel sıcaklık profilleri üzerindeki düzensizliklere sebep olduğu vurgulanmalıdır (Şekil 3.9 ve 3.11). Açısal konumdaki artışa bağlı olarak taşınım

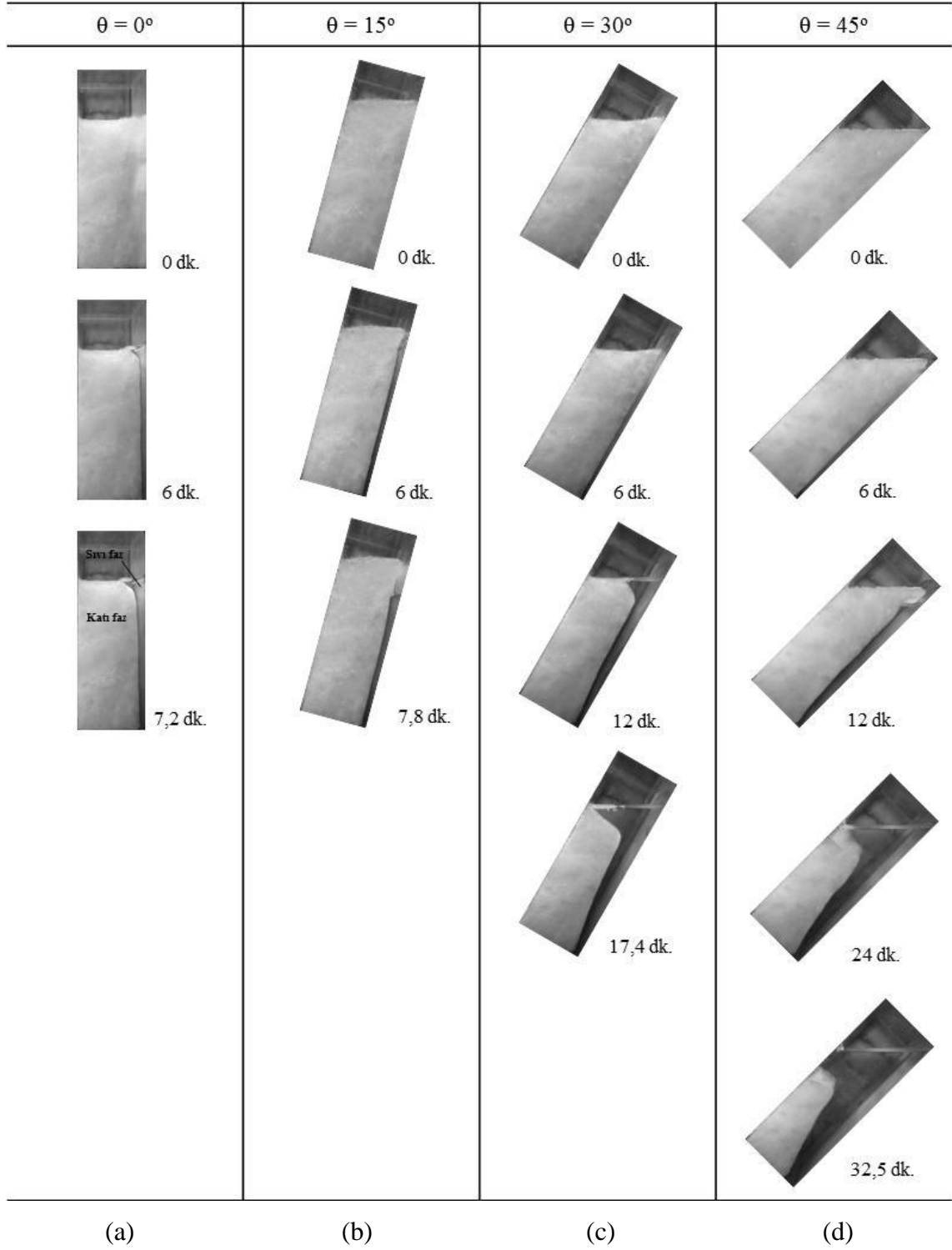
hücrelerinin birleşmesi ve daha büyük taşınım hücrelerinin oluşumuna katkı sunması beklenen bir durumdur. Bu yapısal değişim, iç ortama olan ısı transferini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yukarıda ifade edilen üç boyutlu akış yapısı ve buna bağlı olarak artan ısı transfer miktarı ile daha yüksek erime hızlarına ve belirli bir konum açısından sonra ($\theta > 75^\circ$) daha uniform erime hızlarının elde edildiği Şekil 3.14 e ve f açıkça görülmektedir. Isıtıcı yüzey sıcaklığının limit değere ulaştığı zaman adımına ait erime fotoğrafları karşılaştırıldığında, artan konum açısı ile katı/sıvı faz dönüşümünü tamamlayan bölgenin önemli düzeyde arttığı görülmektedir.

Yatay konuma ($\theta = 90^\circ$) ait yanal düzlem katı/sıvı ara yüzey gelişimi Şekil 3.14 g'de verilmiştir. Erime sürecinin başlangıcında ($t < 6$ dk.), etkin iletim mekanizması nedeniyle erime arayüzeyi uniform bir ilerleme hızı ve kısmen düz bir forma sahiptir. İlerleyen süreçte ($t > 6$ dk.) ise, erime ara yüzey şekli bozulmakta ve dalgalı bir form (kubbeli) ortaya çıkmaktadır. İlgili form değişikliği, yukarıda ifade edildiği üzere sıvı FDM içerisindeki kompleks üç-boyutlu akış yapısı ile ilişkilidir. Erime sürecinin devamında ise erime arayüzü, uniform ve hexagonal formda kubbemsi bir yapıya dönüşmektedir. Erime arayüzündeki bu değişim sıvı FDM içerisindeki üç-boyutlu Benard taşınım hücrelerinin varlığı ile açıklanmaktadır (Diaz ve Viskanta, 1984). İlk aşamada birbirinden bağımsız olan bu hücreler erime bölgesinin genişlemesi ile birlikte ($t > 12$ dk.), Benard taşınım hücreleri komşu hücreler ile birleşmekte ve etki alanı daha büyük boyutlara kavuşmaktadır. Burada, mevcut açisal düzenleme için ($\theta = 90^\circ$) taşınım hücrelerinin katı FDM'yi hedef aldığı not edilmelidir. İlerleyen süreçte ($t = 24$ dk.), sıcaklığın artmasına bağlı olarak taşınım hücrelerinde türbülansın arttığı ve bunun bir sonucu olarak erime arayüzey ilerlemesinin hızlandığı Şekil 3.14 g'de görülmektedir. Bu mekanizma, iç ortam ve ısıtıcı yüzey sıcaklık değişimlerini doğrulamaktadır. Şekil 3.14 g incelendiğinde, faz dönüşümüne katılan son bölgelerin sağ ve sol üst köşeler olduğu görülmektedir. Bu davranış, ilgili bölgelerdeki aksenal ısı kayıplarının bir sonucudur. Isı geçiş sürecinin sonunda ($t = 47$ dk.), $\theta = 90^\circ$ için tüm FDM'nin faz dönüşümünü tamamladığı görülmektedir. Bu durum, mevcut açisal düzende diğer konum açılara kıyasla ısı transfer oranlarının daha yüksek olmasının bir sonucudur.

Konum açısındaki artışa bağlı olarak ortaya çıkan üç boyutlu kompleks akış yapısını Şekil 3.15'de verilen alt düzlem (x-z) görüntüleri desteklemektedir. $t < 12$ dk. zaman adımında, alt bölgelerdeki katı/sıvı ara yüzey ilerleme hızlarının aynı mertebede olduğu, $t > 12$ dk.'dan sonra artan konum açısı ile ilerleme hızlarının önemli düzeyde arttığı Şekil

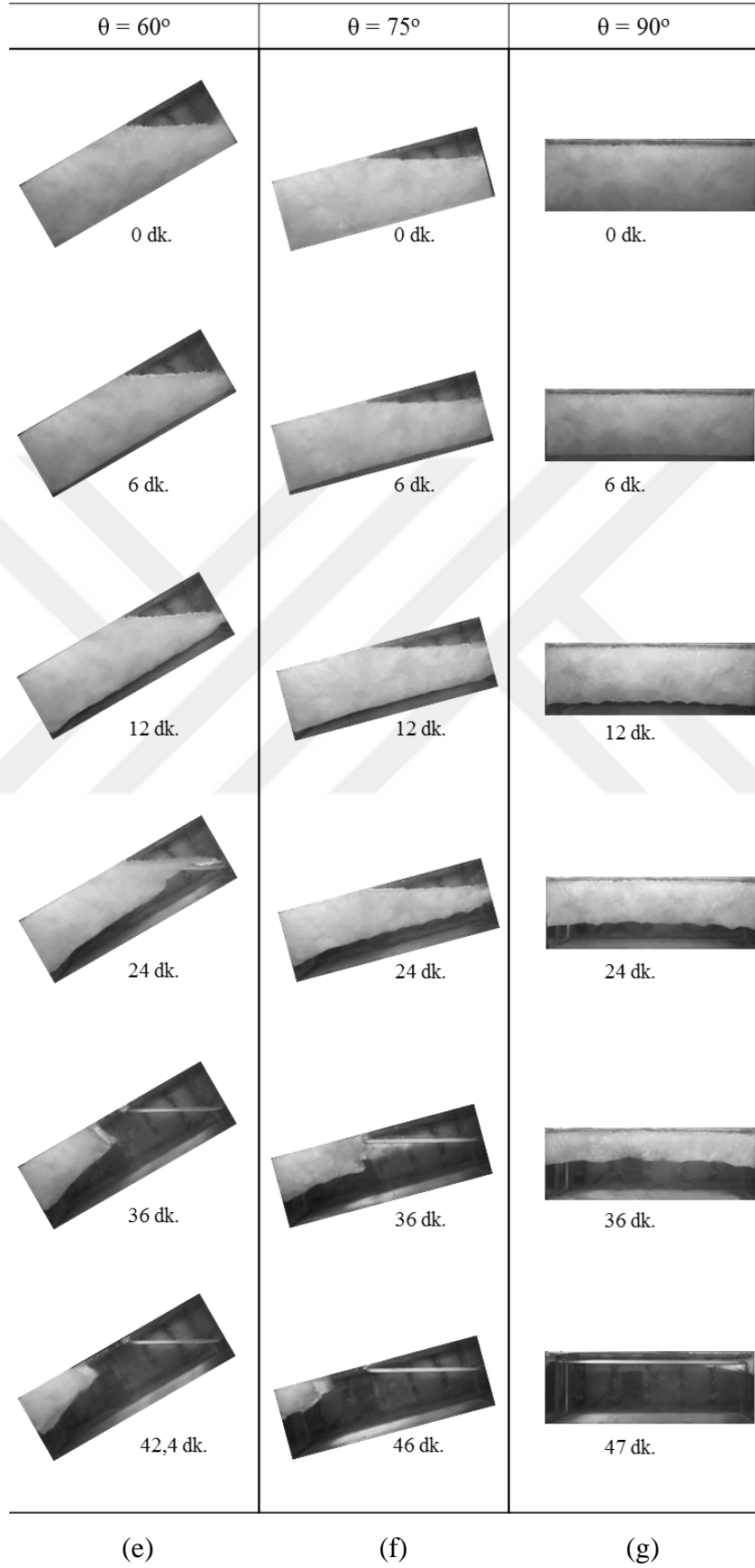
3.15 a-f'de açık bir şekilde görülmektedir. Bu davranış, açısal konumun artışına bağlı olarak doğal taşınım hareketinin kapalı hacmin alt bölgelerine doğru kaydığını doğrulamaktadır. Burada, ayrıca, üç boyutlu akış yapısının $\theta = 45^\circ$ 'den sonra etkili olduğu ve kubbemsi bir yapının oluştuğu (x-z düzlemi) net olarak görülmektedir (Şekil 3.15 b-g).

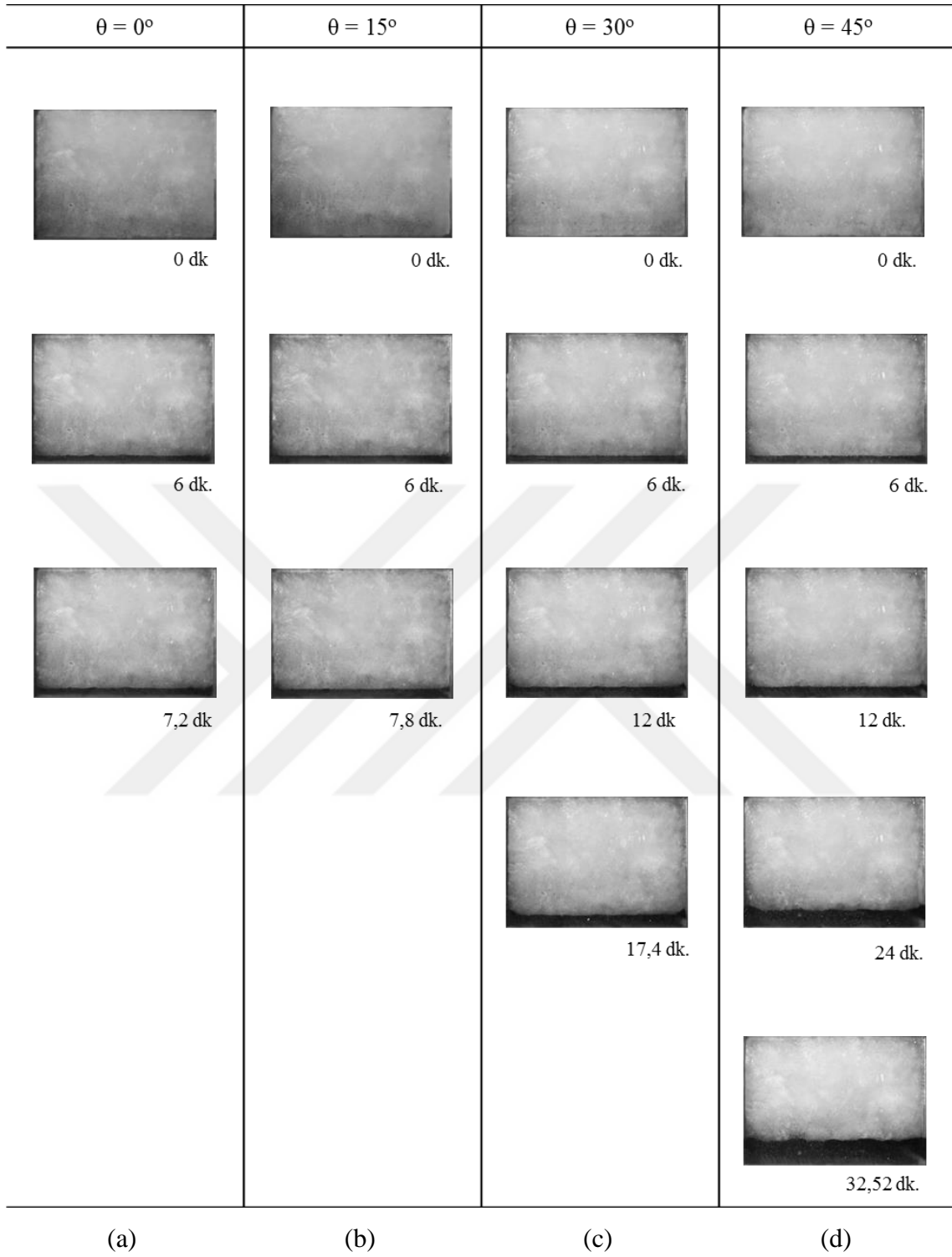




Şekil 3.14. Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g)

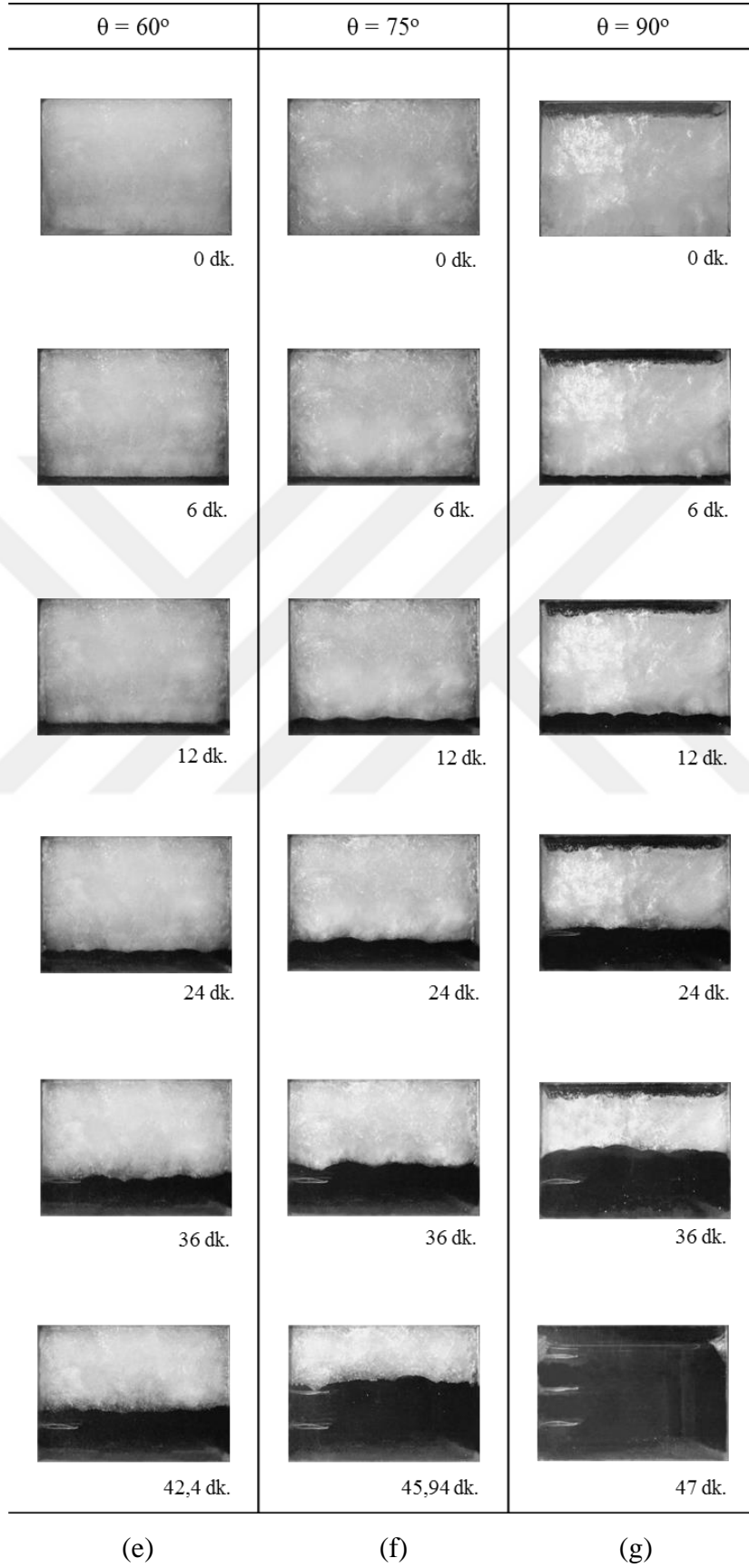
Şekil 3.14'ün devamı





Şekil 3.15. Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g)

Şekil 3.15'in devamı

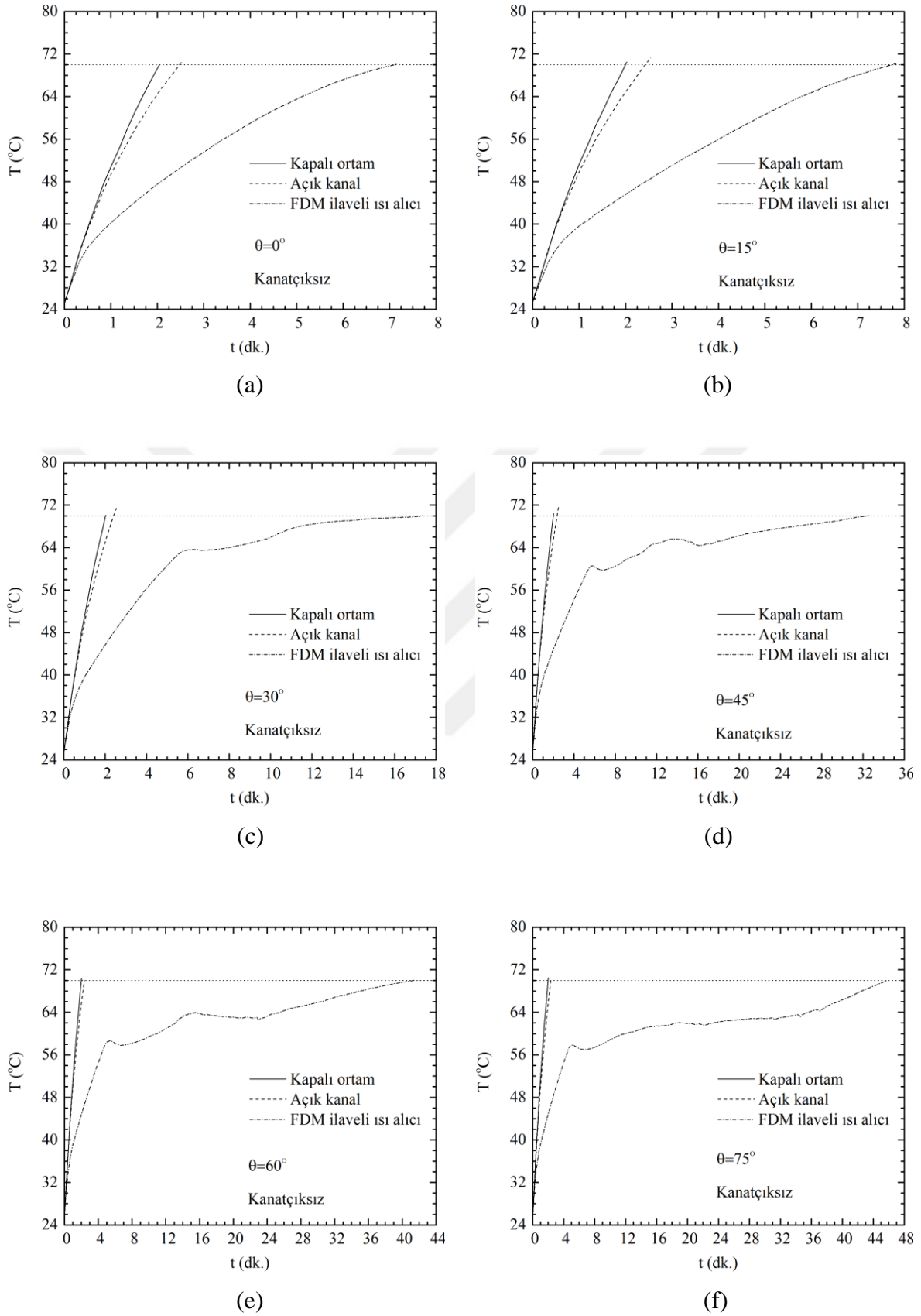


3.1.4. Isı Alıcı Termal Performansı ($n = 0$)

FDM-ilavesiz ve FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerine ait termal performans karakteristikleri, Şekil 3.16 - 3.18'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Isıtıcı yüzey üzerindeki kritik yerel noktalara ait sıcaklık profili Şekil 16'da sunulmuştur. Tüm açısız konumlar için FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının FDM-ilavesiz duruma kıyasla, aynı zaman adımı için daha düşük değerler aldığı ve artan konum açısıyla limit sıcaklığa ulaşma sürelerinin önemli ölçüde iyileştiği (uzadığı) görülmektedir. Bu davranış, sıvı FDM içerisindeki etkin doğal taşınım mekanizmasının bir sonucudur. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemeleri (kapalı ortam ve açık kanal) için ise sıcaklık profillerinin benzer bir değişim sergilediği ve yaklaşık aynı zaman adımında limit sıcaklığa ulaştıkları görülmektedir.

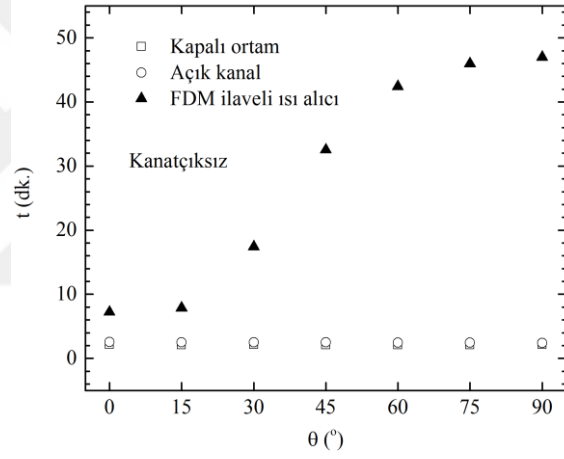
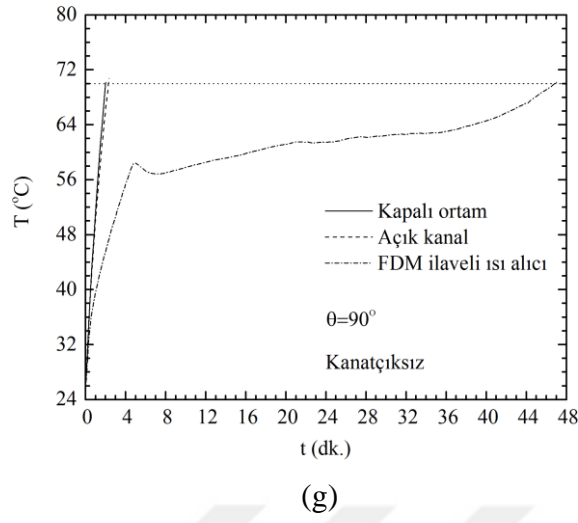
Isı alıcı termal performansının belirlenmesinde limit sıcaklığa ulaşma süreleri temel değerlendirme parametresi olarak dikkate alınmaktadır. Bu doğrultuda, farklı ısı alıcı düzenlemelerine ait konum-zaman grafikleri Şekil 3.17'de sunulmuştur. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemelerine ait güvenilir çalışma sürelerinin açısız konumdan bağımsız olduğu; buna karşın, FDM-ilaveli ısı alıcı durumu için açısız konumun güvenilir çalışma süreleri üzerinde önemli değişimlere neden olduğu görülmektedir. Burada, $\theta = 0^\circ - 15^\circ$ ve $\theta = 75^\circ - 90^\circ$ arasındaki açısız konum değişimlerinin ısı alıcı termal performansı üzerinde % 14 seviyesinde sınırlı bir artışa açısız konumun, $\theta = 15^\circ - 75^\circ$ olduğu aralıkta ise artışın % 487 seviyesine ulaştığı görülmüştür. Bu davranış, daha önce ifade edildiği üzere, sıvı FDM içerisindeki taşınım hücrelerinin güçlenmesi ve buna bağlı olarak iç ortama olan ısı transferinin artması ile ilişkilidir. FDM-ilaveli ısı alıcı için güvenilir çalışma sürelerinin FDM-ilavesiz ısı alıcıya kıyasla minimum 4 kat arttığı ($\theta = 0^\circ$) ifade edilmelidir. Benzer şekilde, FDM-ilaveli ısı alıcı için ise, açısız konuma bağlı olarak ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$) çalışma süresinin yaklaşık 7 kat (% 553) seviyesinde arttığı, Şekil 3.18 a'da sunulan iyileşme oranları üzerinden görülebilir.

Isı alıcı termal performansı için kullanılan diğer bir yaygın değerlendirme kriteri ise ısı iletkenliğidir (G, W/K). Şekil 3.18 b'de ısı iletkenlik değerinin konum açısına bağlı değişimi FDM-ilaveli ısı alıcı için sütun grafik formunda sunulmuştur. Burada, artan konum açısına bağlı olarak ısı iletkenlik değerinin artması, iç ortama aynı zaman dilimi için transfer edilen ısı miktarının artışını doğrulamaktadır. Yatay konum için dikey konuma kıyasla ısı iletkenlik değeri % 168 düzeyinde bir artış sergilemektedir.

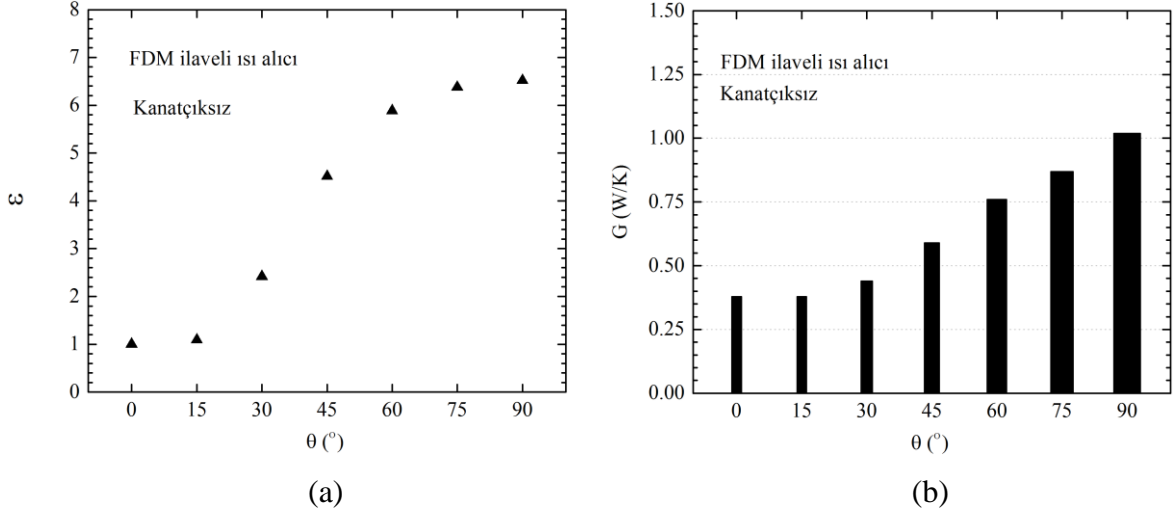


Şekil 3.16. Farklı konum açılarının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi: $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g)

Şekil 3.16'nın devamı



Şekil 3.17. Açısal konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi



Şekil 3.18. FDM-ilaveli ısı alıcı için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b)

3.2. Sabit Kesitli Levha Tip Kanatçıklara Sahip Isı Alıcı Düzenlemesi - Kanatçık Sayısı (n) ve Açıl Konum (θ) Etkisi

Bu bölümde, kanatçık sayısı ve açıl konum parametrelerinin ısı alıcı termal davranışı üzerindeki etkileri geniş parametre aralıklarında kapsamlı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 5 farklı kanatçık sayısına sahip ($n = 1, 2, 3, 4$ ve 5) ısı alıcı geometrisi yedi farklı konum açısı ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$) için test edilmiştir. Ancak, tez bütününde yapısal sadeliğin korunması açısından, bu bölümde sadece üç farklı kanatçık sayısı ($n = 1, 3$ ve 5) ve üç farklı konum açısı ($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90°) için FDM-ilaveli ısı alıcıya ait yerel sıcaklık değişimleri detaylı olarak sunulmuştur (Şekil 3.19 - 3.50). Diğer düzenlemelere ($n = 2$ ve $4, \theta = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve FDM-ilavesiz durum) ait verilere ise karşılaştırma grafiklerinde yer verilmiştir (Şekil 3.48 - 3.50).

3.2.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi

İç ortama ait yerel sıcaklıkların zaman bağımlı değişimi farklı kanatçık sayıları ($n = 1, 3$ ve 5) ve konum açıları ($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90°) için Şekil 3.19 – 3.24 ($\theta = 0^\circ$), Şekil 3.25 – 3.30 ($\theta = 45^\circ$) ve Şekil 3.31 – 3.36’da ($\theta = 90^\circ$) verilmiştir. Genel karakter olarak, konum açısının artmasına bağlı olarak yerel sıcaklık değerleri artmakta ve iç ortam daha uniform bir sıcaklık dağılımına yakınsamaktadır. Bu davranış, ısı transfer yüzey alanının artmasına bağlı olarak iç ortamdaki iletim ve doğal taşınım ısı transfer mekanizmalarının iyileştirilmesiyle

ilişkilidir. Daha açık bir ifade ile kanatçık ilavesiyle, ısı FDM içerisinde daha derin bölgelere iletilmekte ve doğal taşınımına katkı sunacak ilave akış bölgeleri oluşmaktadır.

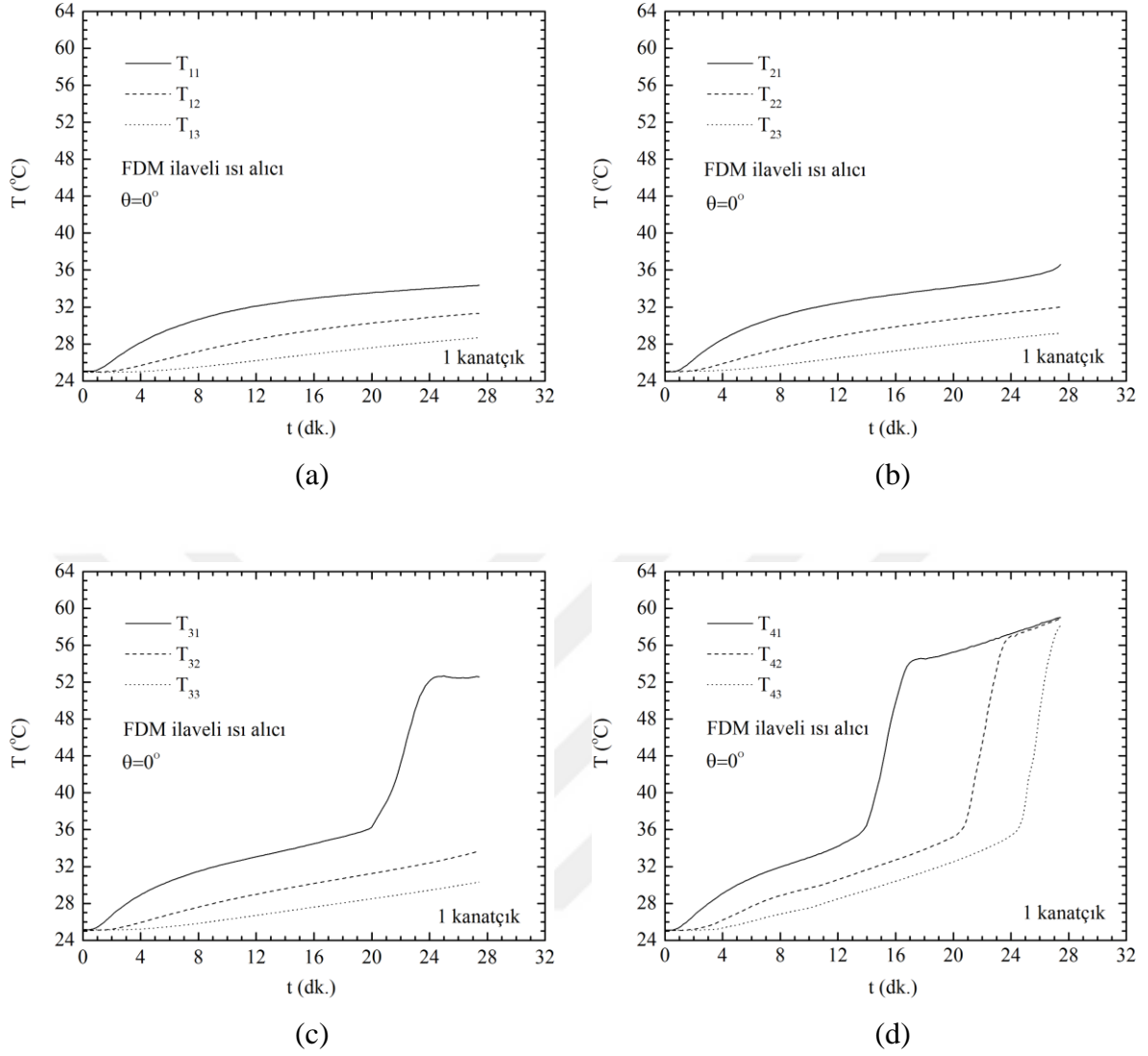
Kanatçık sayısının yerel sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi düşey konum ($\theta = 0^\circ$) için Şekil 19 - 24'de sunulmuştur. Örnek olarak $n = 1$ için $t = 27,4$ dk.'da, 3 nolu ölçüm istasyonuna (T_{3a} : T_{31} , T_{32} , T_{33}) ait iç ortam sıcaklıkları sırasıyla $52,6$ °C, $33,6$ °C, $30,3$ °C seviyelerindedir (Şekil 3.19 c). Aynı zaman adımında, $n = 3$ ve 5 durumları için T_{3a} 'ya ait sıcaklık değerleri, sırasıyla, $54,7$ °C, $37,9$ °C, $30,9$ °C; 54 °C, $37,1$ °C, $31,3$ °C değerlerine sahiptir (Şekil 3.21 c ve 3.23 c). Sıcaklıklardaki bu değişim, iç bölgelere doğru olan sıcaklık artış hızının artan kanatçık sayısı ile iyileştiğini göstermektedir. Isı alıcıya göre paralel 2 nolu yerel hatlara (T_{a2} : T_{12} , T_{22} , T_{32} , T_{42}) ait sıcaklık değerleri $n = 1$ ($\gamma = \% 0,9$) için sırasıyla $31,3$ °C, 32 °C, $33,6$ °C ve 59 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 20 b). Kanat sayısının (n) 3 ve 5 olduğu ısı alıcı düzenlemelerinde ise T_{a2} 'ye ait yerel sıcaklık değerleri, sırasıyla, $32,9$ °C, $34,4$ °C, $37,9$ °C, $57,1$ °C; $33,2$ °C, $34,3$ °C, $37,1$ °C, $54,5$ °C seviyelerindedir (Şekil 3.22 b ve 3.24 b). İlgili değerler incelendiğinde, alt bölgelerdeki yerel nokta sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu buna karşın artan kanatçık sayısı ile T_{42} yerel nokta sıcaklığının daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, kanatçık sayısındaki artışa bağlı olarak kanatçık aralıklarında taşınım hareketine karşı oluşan direnç ile açıklanabilir. Bu davranış, ileride detaylı olarak irdelenecektir. Isı geçiş sürecinin sonunda, $n = 3$ ve $n = 5$ için T_{3a} (T_{31} , T_{32} , T_{33}) yerel noktalarına ait sıcaklık ölçümleri sırasıyla $60,7$ °C, $59,5$ °C, $59,1$ °C; $63,3$ °C, 62 °C, $61,7$ °C değerlerini almaktadır (Şekil 3.21 c ve 3.23 c). T_{a2} (2 nolu yerel hat) yerel nokta sıcaklık değerleri $n = 3$ ($\gamma = \% 2,7$) için $35,1$ °C, $53,1$ °C, $59,5$ °C, $63,8$ °C, $n = 5$ ($\gamma = \% 4,5$) için $48,1$ °C, $56,5$ °C, 62 °C, $64,3$ °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.22 b ve 3.24 b). İlgili zaman adımında, üst yerel noktaya ait sıcaklık değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Burada, artan kanatçık sayısı ile doğal taşınım mekanizmasının kötüleştiği, ancak iletim ısı transferinin iyileştiği vurgulanmalıdır. Yüksek kanatçık sayılarında iç ortama transfer edilen ısı miktarının artmasına bağlı olarak kanatçiksiz duruma kıyasla daha yüksek sıcaklık değerlerinin elde edildiği yapılan yerel sıcaklık karşılaştırmalarında açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum, sıvı FDM bölgesinin daha hızlı gelişmesine ve iç ortam eş sıcaklık dağılımı sergilemesine katkı sunmaktadır. İç ortamdaki yerel sıcaklık dağılımı dikkate alındığında, $n = 5$ için katı/sıvı faz dönüşümünün yüksek oranda (T_{2a} , T_{3a} , $T_{4a} > 37$ °C) tamamlandığı, ancak $n=1$ için bu oranının sınırlı olduğu görülebilir. Mevcut açışal

düzenleme için ($\theta = 0^\circ$) artan ısı transfer yüzey alanı ile yerel noktalar arasındaki maksimum sıcaklık farkı ($T_{42}-T_{22}$) sırasıyla 27°C , 11°C ve 8°C olarak elde edilmektedir.

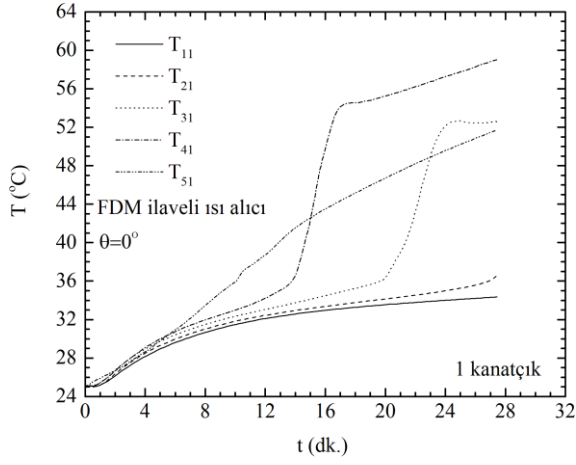
$\theta = 45^\circ$ için sınırlandırılmış ortam içerisindeki yerel sıcaklık değişimleri farklı kanat sayıları için Şekil 3.25 – 3.30’da verilmiştir. Örnek olarak, $n = 1, 3$ ve 5 için $t = 27,4$ dk.. anına ait T_{3a} yerel nokta sıcaklıkları, sırasıyla, $49,2^\circ\text{C}$, $33,9^\circ\text{C}$, $31,2^\circ\text{C}$; $50,1^\circ\text{C}$, $42,1^\circ\text{C}$, $31,9^\circ\text{C}$; $49,8^\circ\text{C}$, $38,3^\circ\text{C}$, $31,8^\circ\text{C}$ değerlerini almaktadır (Şekil 3.25 c, 3.27 c ve 3.29 c). Burada, $n = 3$ ve 5 için, T_{32} ve T_{33} yerel nokta sıcaklıklarının düşey konuma kıyasla daha yüksek olduğu; buna karşın, sıcak yüzeye yakın olan T_{31} yerel noktasında doğal taşınım akış yapısına bağlı olarak daha düşük sıcaklık değerlerinin elde edildiği görülmektedir. 2 nolu ölçüm hattına (T_{a2}) ait sıcaklık değerleri $n = 1, 3$ ve 5 için sırasıyla 32°C , $32,8^\circ\text{C}$, $33,9^\circ\text{C}$, $52,6^\circ\text{C}$; $33,8^\circ\text{C}$, $37,7^\circ\text{C}$, $42,1^\circ\text{C}$, 53°C ; $46,4^\circ\text{C}$, $50,7^\circ\text{C}$, $54,2^\circ\text{C}$, $56,8^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.26 b, 3.28 b ve 3.30 b). Düşey konuma kıyasla, mevcut açısız düzenlemenin yerel sıcaklık farklarının daha düşük olduğu görülmektedir. Burada, T_{42} yerel nokta sıcaklıklarının birbirine yakın değerler alması taşınım ve iletim ısı transfer mekanizmaları arasındaki denge ile açıklanabilir. Isı geçiş sürecinin sonunda, T_{3a} (3 nolu ölçüm istasyonu) yerel nokta sıcaklıkları $n = 1, 3$ ve 5 için sırasıyla $57,9^\circ\text{C}$, $59,5^\circ\text{C}$, $60,5^\circ\text{C}$; $62,2^\circ\text{C}$, $62,3^\circ\text{C}$, 63°C ; $63,9^\circ\text{C}$; 63°C , $63,6^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.25 c, 3.27 c ve 3.29 c). 2 nolu ölçüm hattına (T_{a2}) ait sıcaklıklar ise $n = 1, 3$ ve 5 için sırasıyla $35,5^\circ\text{C}$, 54°C , $59,5^\circ\text{C}$, 62°C ; $54,4^\circ\text{C}$, 59°C , $62,3^\circ\text{C}$, $64,1^\circ\text{C}$; $57,6^\circ\text{C}$, 61°C , $63,1^\circ\text{C}$, $64,4^\circ\text{C}$ seviyelerindedir (Şekil 3.26 b, 3.28 b ve 3.30 b). Burada, T_{42} ve T_{22} yerel nokta sıcaklık farklarının artan kanatçık sayısı ile ($n = 1, 3$ ve 5), sırasıyla, 8°C , 5°C , 3°C seviyelerinde olduğu belirtilmelidir. Bu durum, düşey konuma kıyasla sıcaklık farklarında sırasıyla % 70, % 54 ve % 57 oranında azalma olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. $\theta = 45^\circ$ için $n = 1, 3$ ve 5 kanatçık sayılarına sahip ısı alıcı düzenlemeleri kanatçiksiz durum ($n = 0$) ile karşılaştırıldığında ise yerel nokta sıcaklık farklarının % 64, % 78 ve % 87 oranlarında azaldığı ifade edilmelidir. İlgili azalım düzeyleri, kanatçık sayısının ve konum açısının artışıyla sıcaklık açısından daha uniform bir ortama sağlandığını ortaya koymaktadır.

Yatay konum ($\theta = 90^\circ$) için iç ortam içerisindeki yerel sıcaklık değişimleri farklı kanatçık sayıları için Şekil 3.31 – 3.36’da sunulmuştur. Örnek olarak, $n = 1, 3$ ve 5 için $t = 27,4$ dk. zaman adımına ait 3 nolu ölçüm istasyonunun (T_{3a} : T_{31} , T_{32} ve T_{33}) yerel nokta sıcaklıkları, sırasıyla, $45,8^\circ\text{C}$, $35,9^\circ\text{C}$, $32,7^\circ\text{C}$; $48,8^\circ\text{C}$, $47,4^\circ\text{C}$, $32,1^\circ\text{C}$; $46,4^\circ\text{C}$, 35°C , $31,5^\circ\text{C}$ değerlerini almaktadır (Şekil 3.31 c, 3.33 c ve 3.35 c). İlgili sıcaklık değerleri kendi içinde kıyaslandığında, $n = 1$ ve $n = 5$ ısı alıcı düzenlemelerine ait yerel nokta

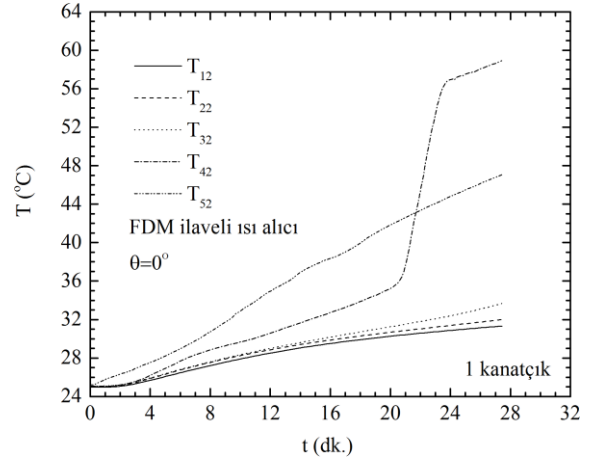
sıcaklıklarının birbirine yakın, buna karşın $n = 3$ düzenlemesinden daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, kanatçık yerleşiminin ısı geçiş mekanizmaları (iletim / taşınım) üzerindeki belirleyici rolü ile ve ısı transfer mekanizmaları arasındaki geçiş ile açıklanabilir. T_{a2} yerel noktalarına ait sıcaklıklar, sırasıyla, 33,4 °C, 34,7 °C, 35,9 °C, 34,4 °C; 37,9 °C, 44 °C, 47,4 °C, 39,4 °C; 34,7 °C, 35 °C, 35 °C, 34 °C değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 3.32 b, 3.34 b ve 3.36 b). Yerel nokta yerleşiminin ısı alıcı yüzey boyunca aynı mesafeye sahip olduğu hatırlanacak olursa sıcaklıkların kendi içerisinde birbirine yakın değerler alması beklenen bir sonuçtur. Bu durum, uniform erime davranışı ile ilişkili olarak bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Burada, $n = 3$ durumu için yerel sıcaklıkların $n = 1$ ve 5 durumlarına kıyasla daha yüksek değerler aldığı vurgulanmalıdır. Isı geçiş sürecinin sonunda, T_{3a} (T_{31} , T_{32} ve T_{33}) yerel nokta sıcaklıkları $n = 1$, 3 ve 5 için, sırasıyla, 58,7 °C, 58,8 °C, 58 °C; 63,1 °C, 62,2 °C, 62,3 °C; 64,2 °C, 63,3 °C, 62 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.31c, 3.33c ve 3.35c). T_{a2} (T_{12} , T_{22} , T_{32} ve T_{42}) yerel noktalarına ait sıcaklık değerleri ise, sırasıyla, 58,1 °C, 58,6 °C, 58,8 °C 58,7 °C; 61,8 °C, 62 °C, 62,2 °C, 62,1 °C; 62,6 °C, 63,1 °C, 63,3 °C, 63,2 °C değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 3.32 b, 3.34 b ve 3.36 b). İlgili sıcaklık değerleri kendi içinde kıyaslandığında, yüksek kanatçık sayılarında ($n = 3$ ve 5) yerel nokta sıcaklık artışlarının baskılandığı görülmektedir. T_{42} ve T_{22} yerel noktaları arasındaki sıcaklık farkının farklı kanatçık sayısı durumları ($n = 0$, 1,3 ve 5) için 0,2 °C ($n = 0$) ve 0,1 °C seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, iç ortam içerisindeki eş sıcaklık dağılımının varlığını ortaya koymaktadır.



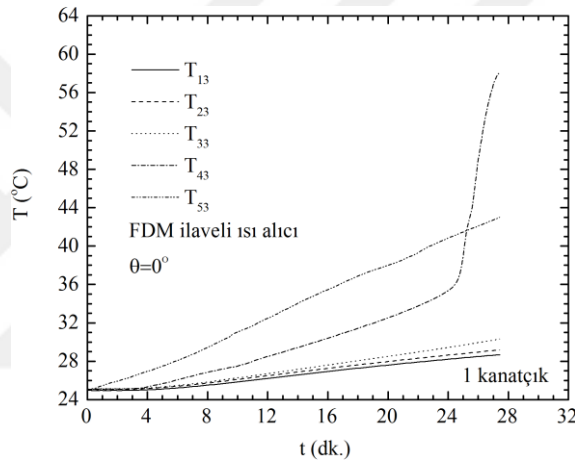
Şekil 3.19. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

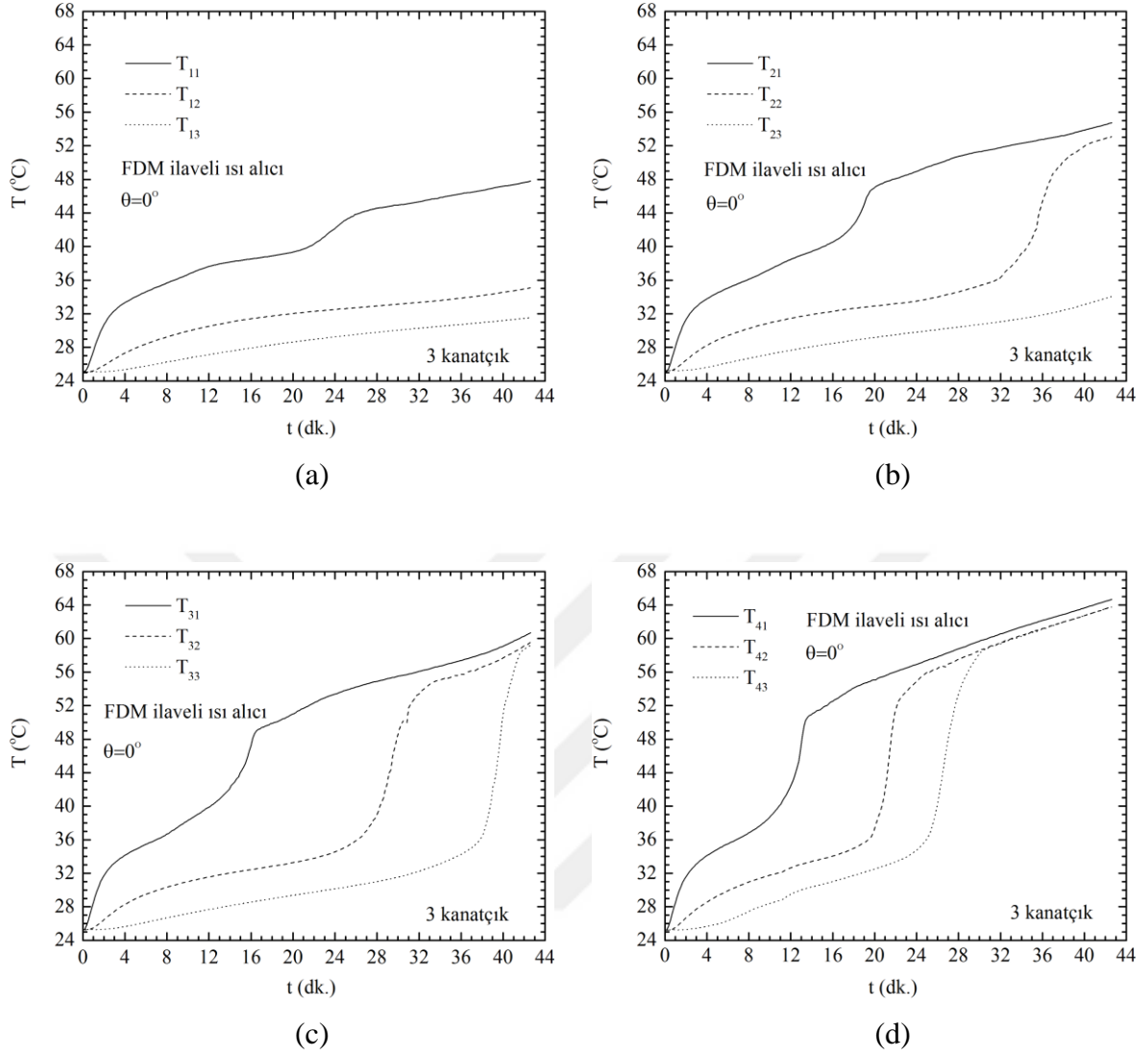


(b)

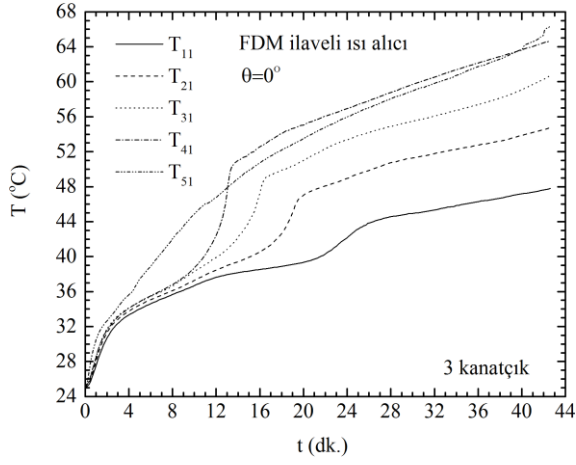


(c)

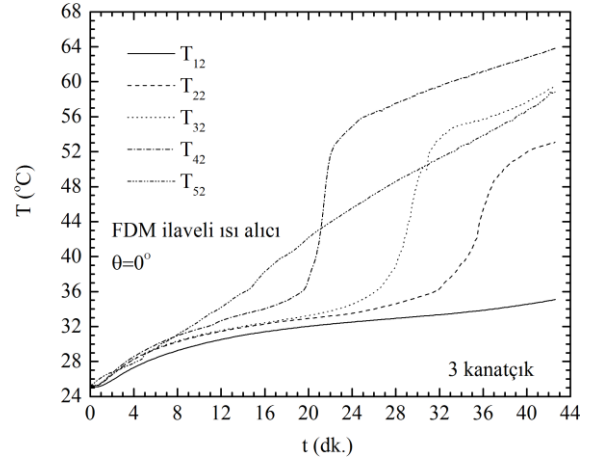
Şekil 3.20. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



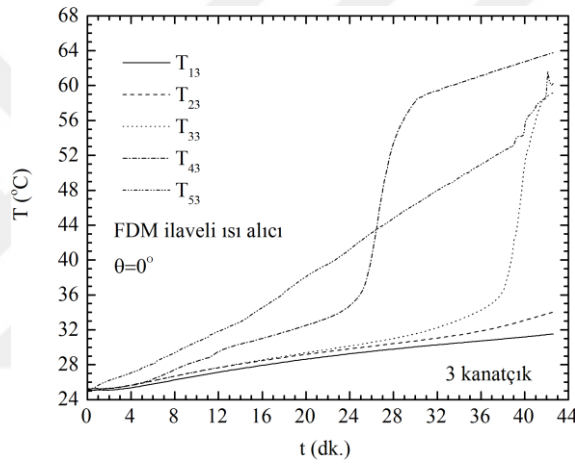
Şekil 3.21. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

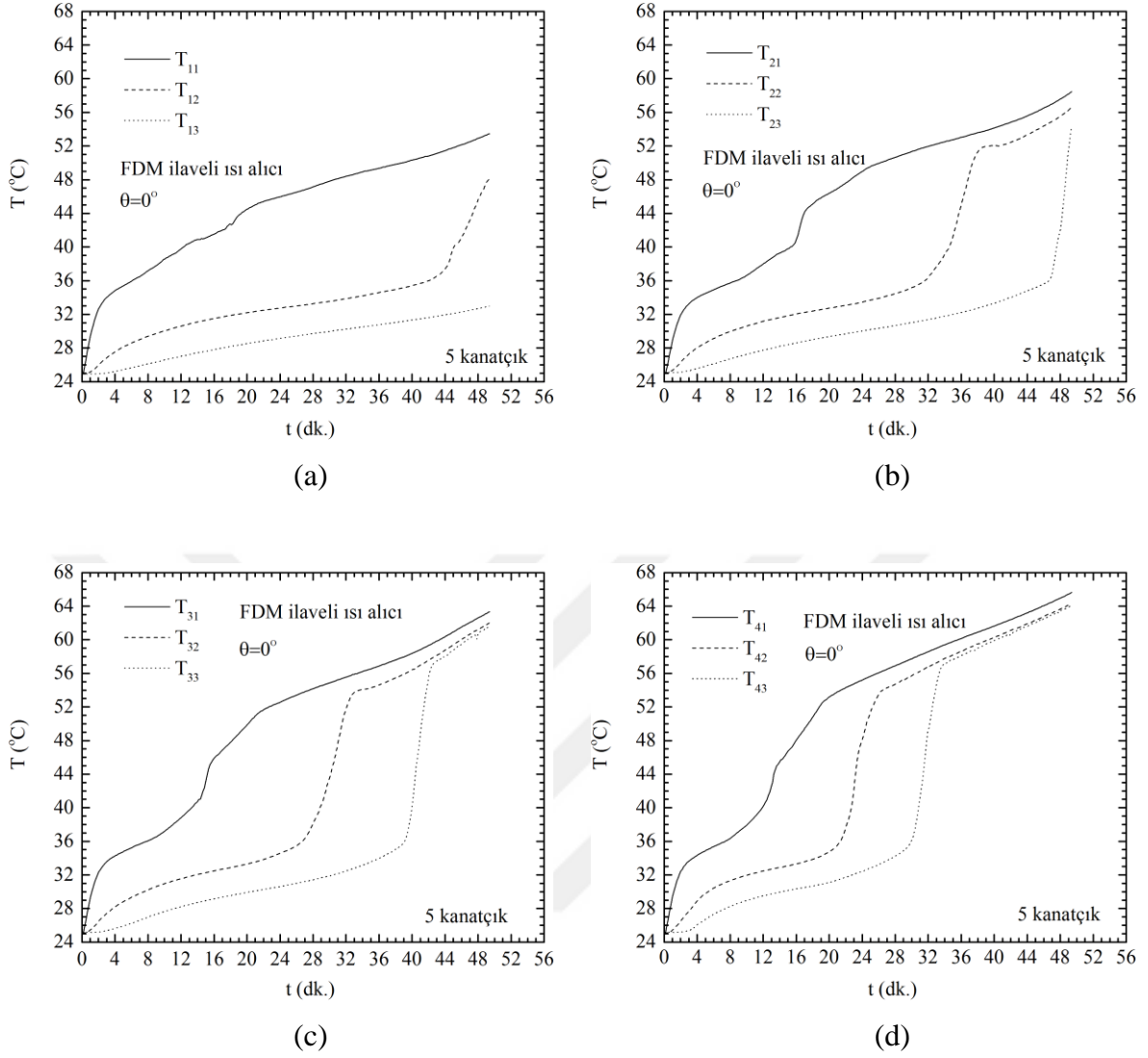


(b)

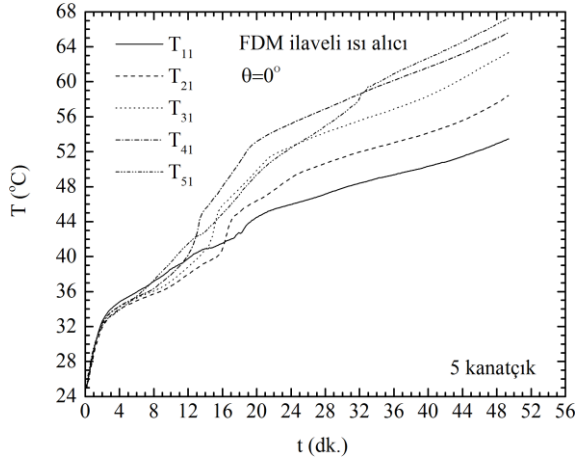


(c)

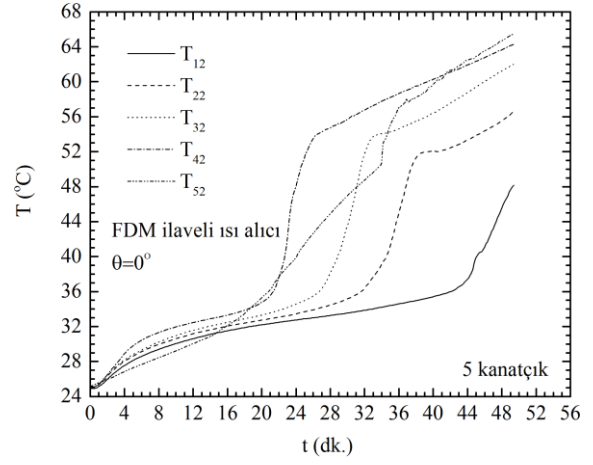
Şekil 3.22. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



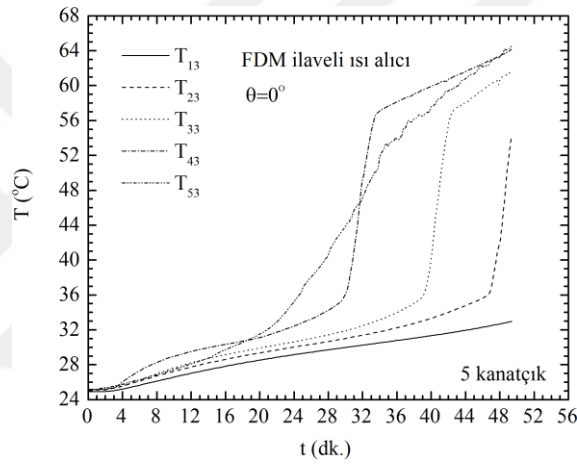
Şekil 3.23. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

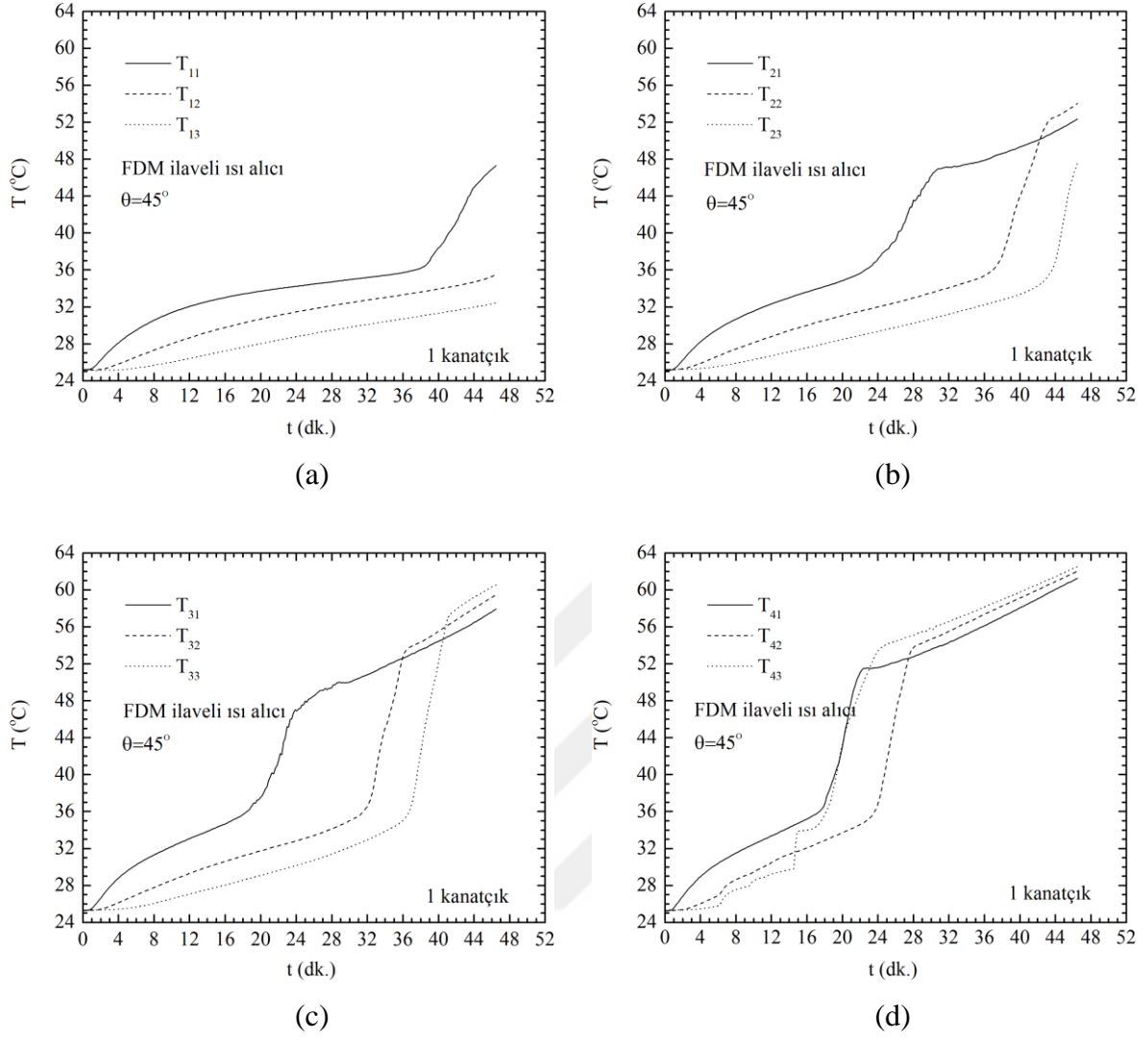


(b)

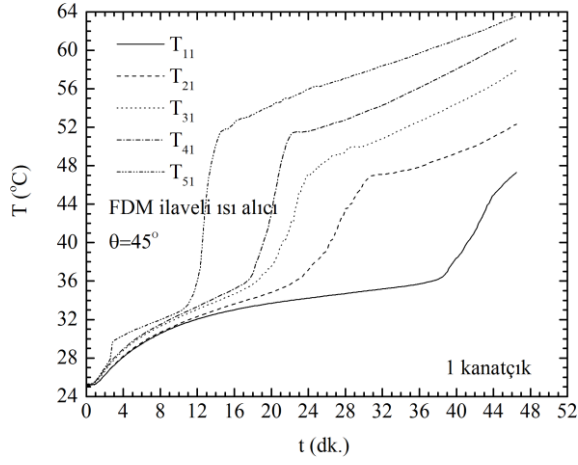


(c)

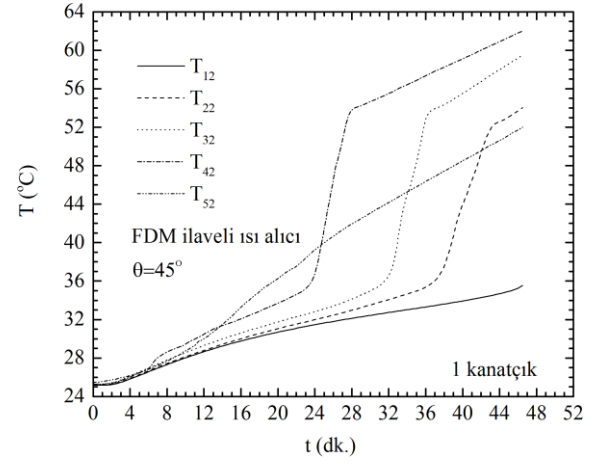
Şekil 3.24. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



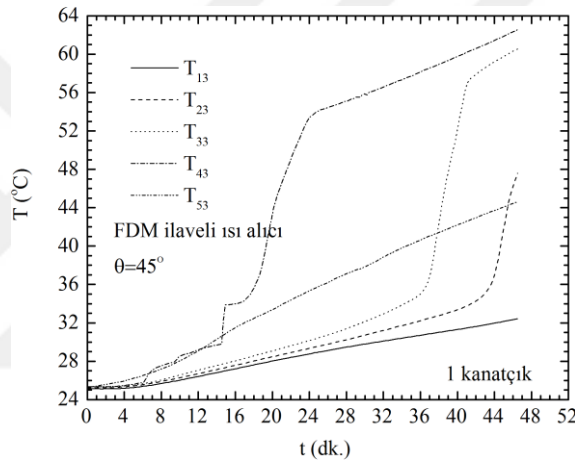
Şekil 3.25. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

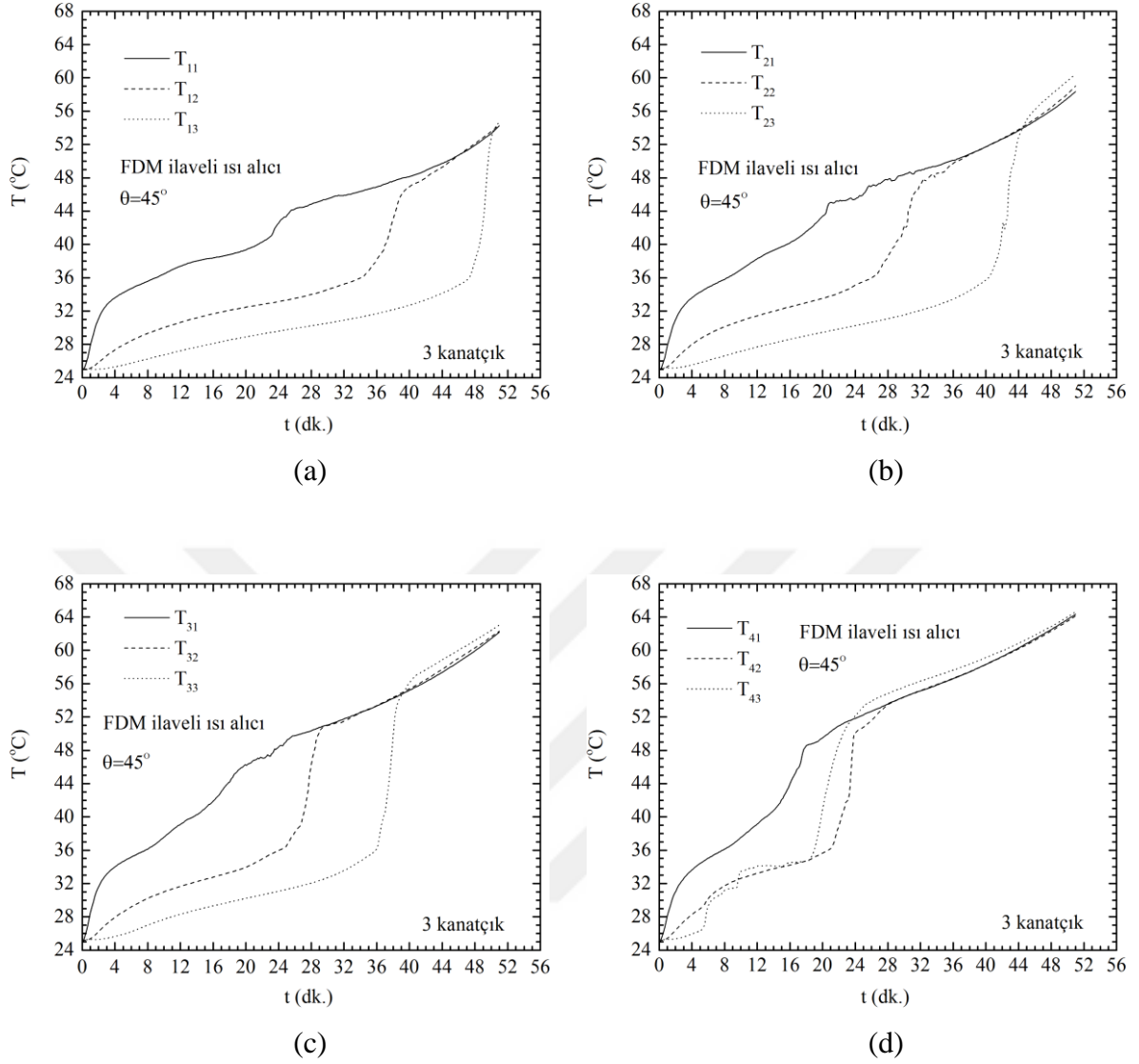


(b)

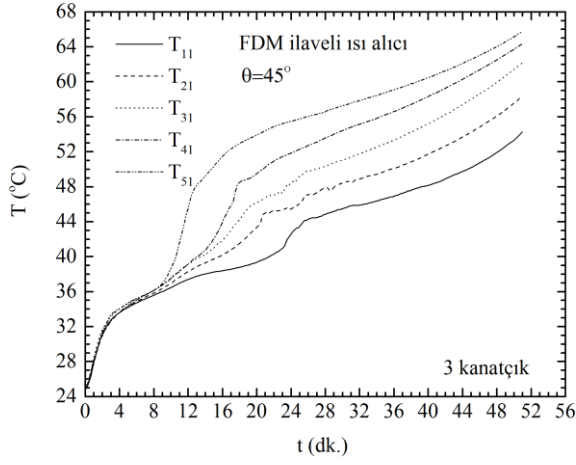


(c)

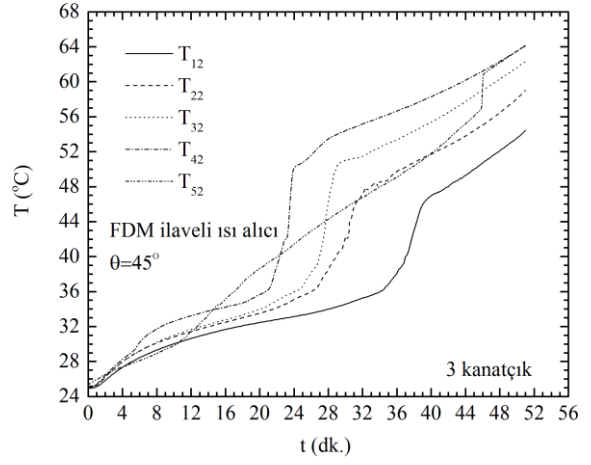
Şekil 3.26. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



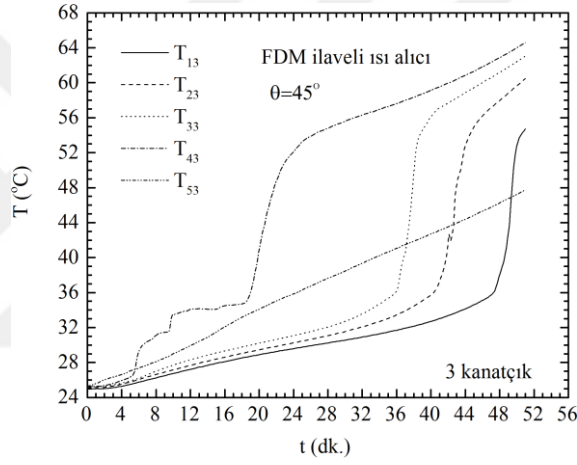
Şekil 3.27. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



(a)

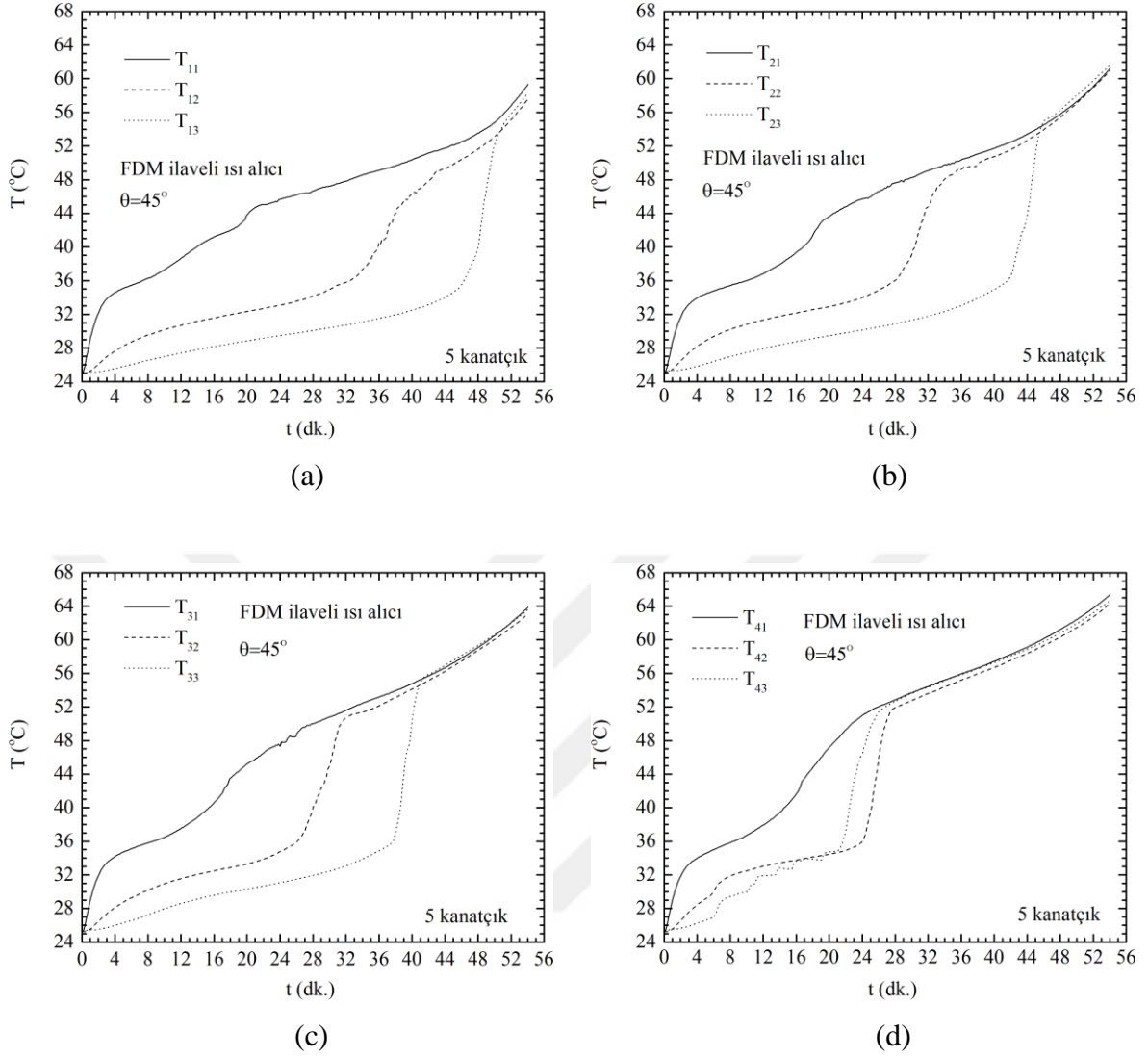


(b)

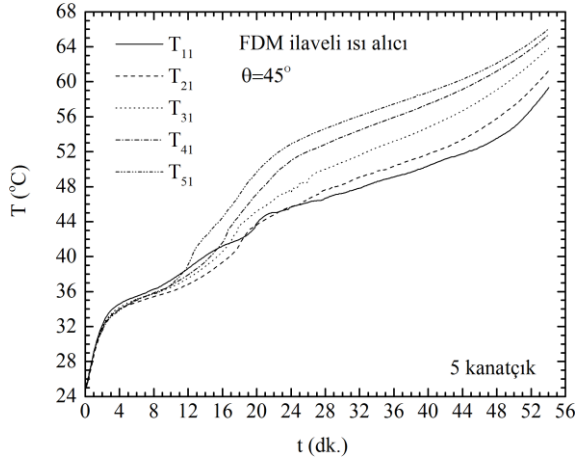


(c)

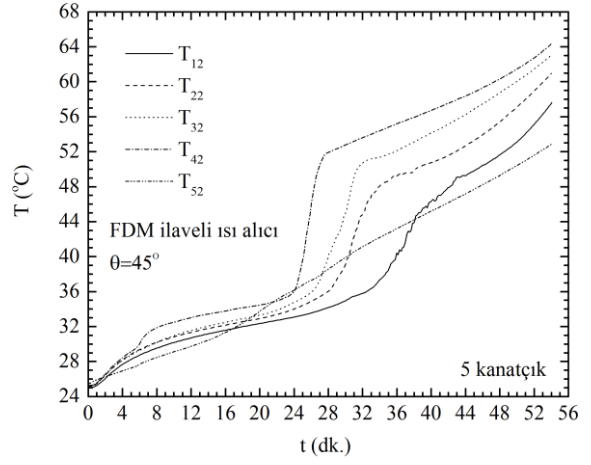
Şekil 3.28. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



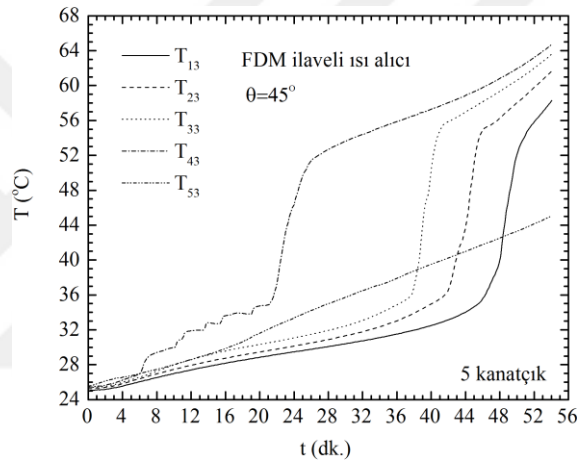
Şekil 3.29. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

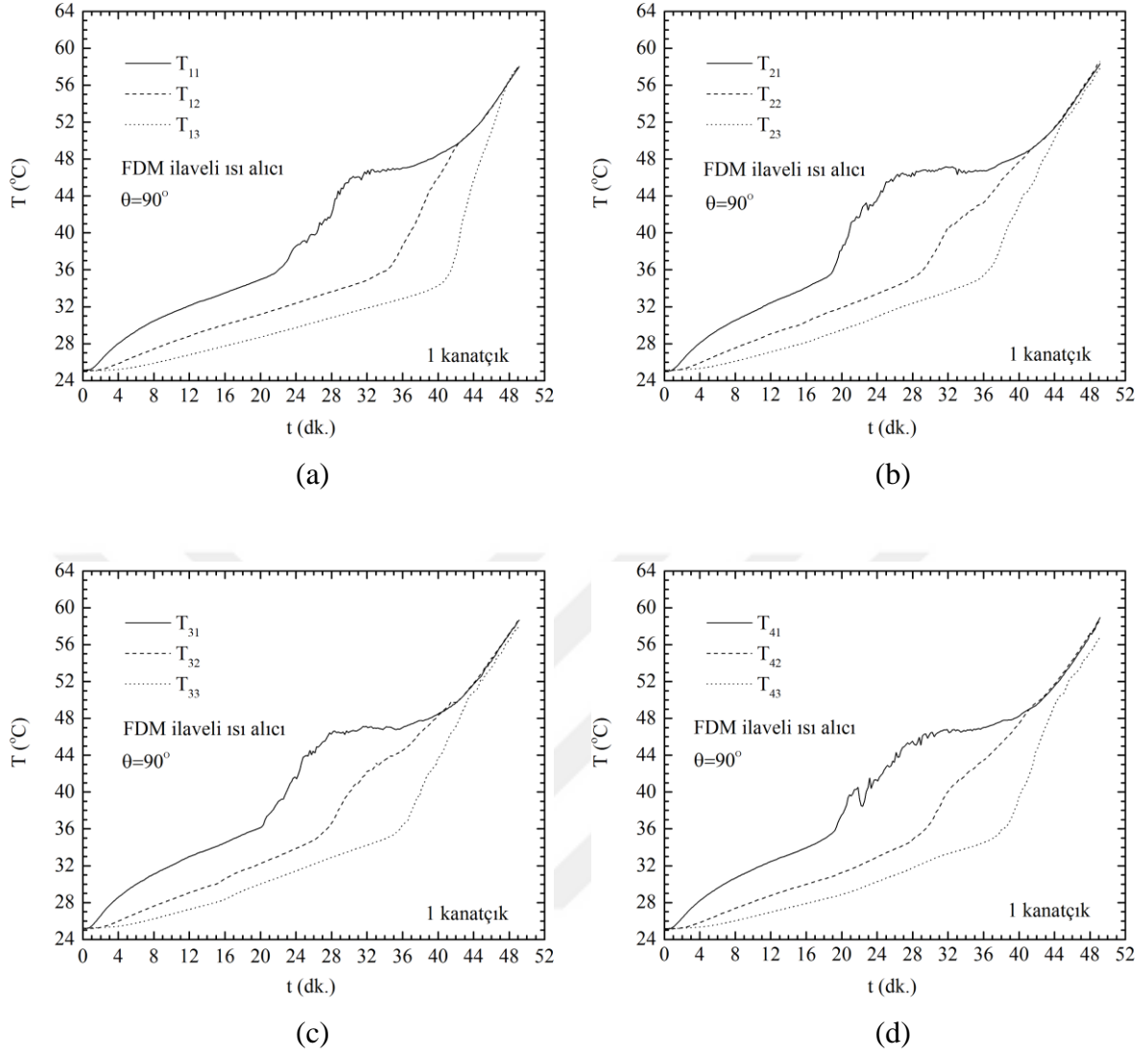


(b)

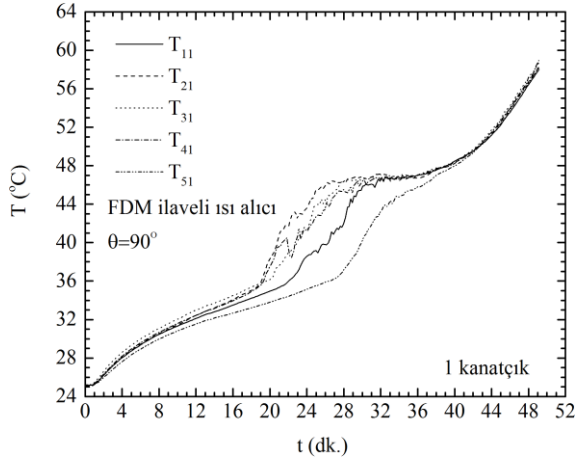


(c)

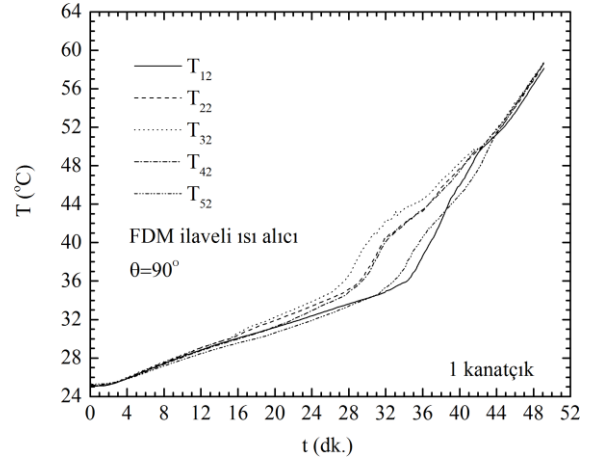
Şekil 3.30. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=45^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



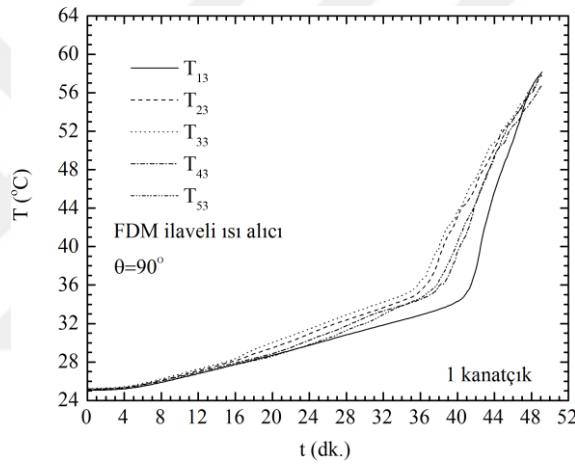
Şekil 3.31. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

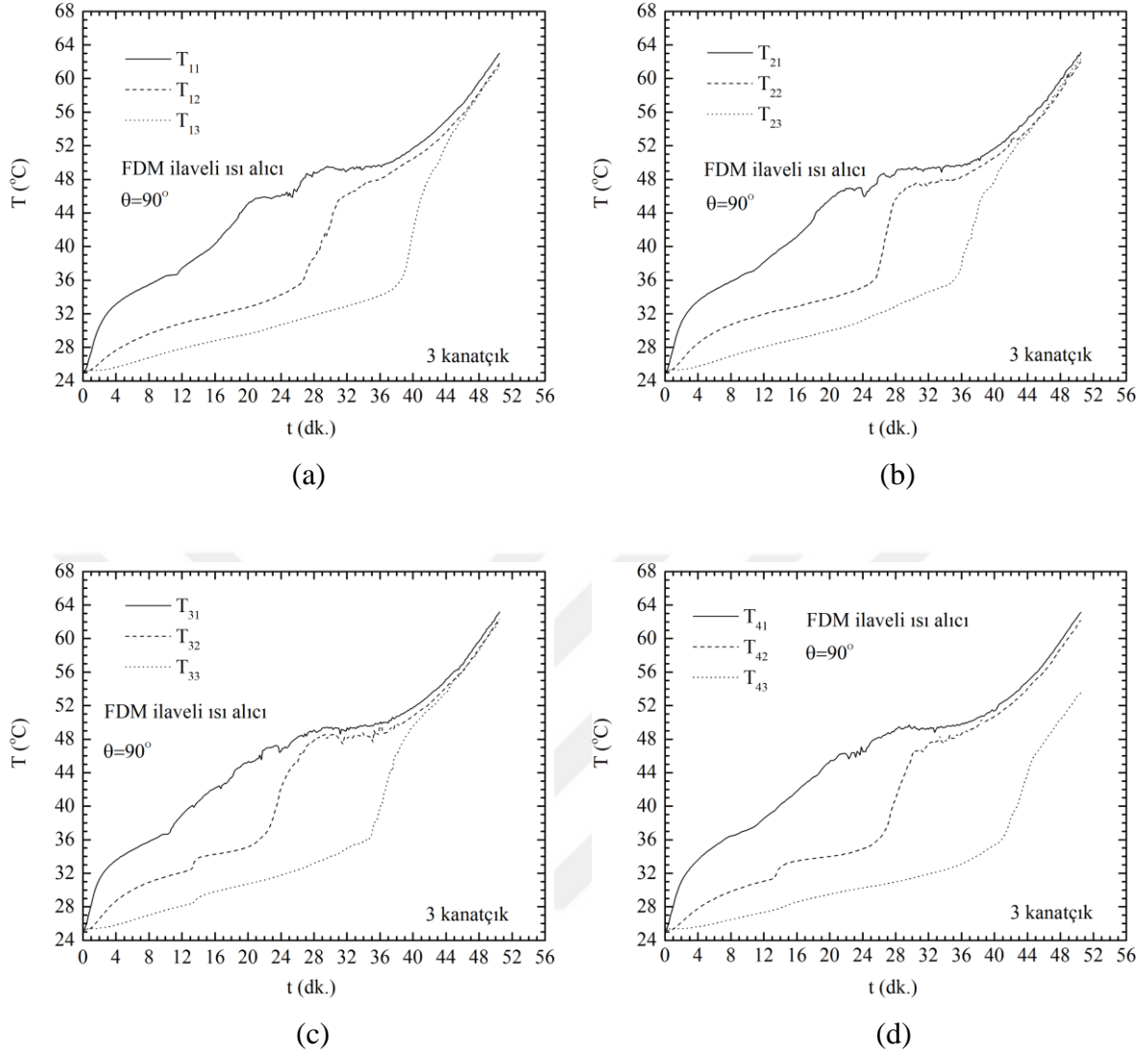


(b)

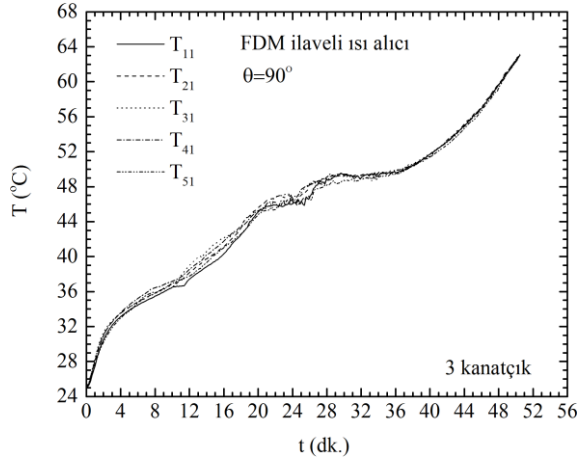


(c)

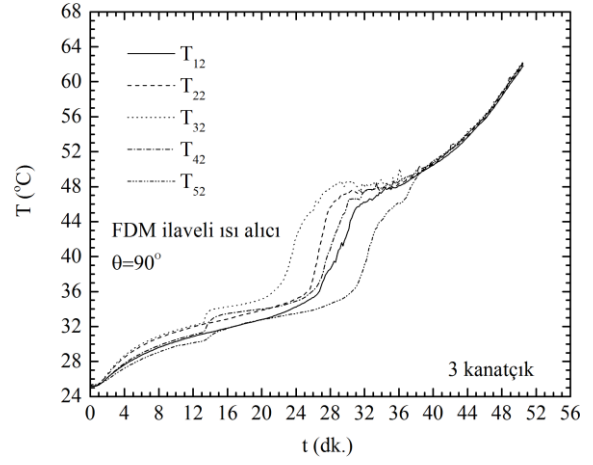
Şekil 3.32. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 1$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



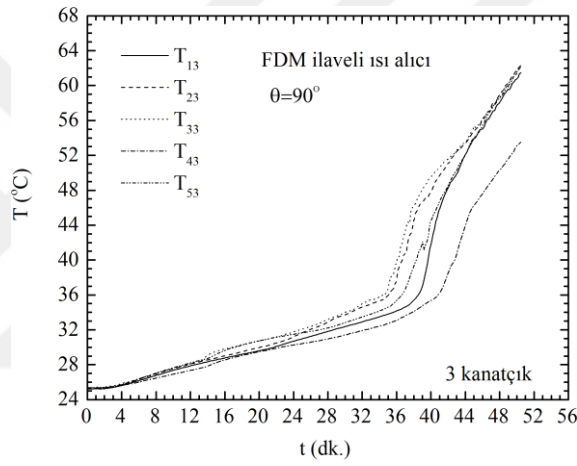
Şekil 3.33. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



(a)

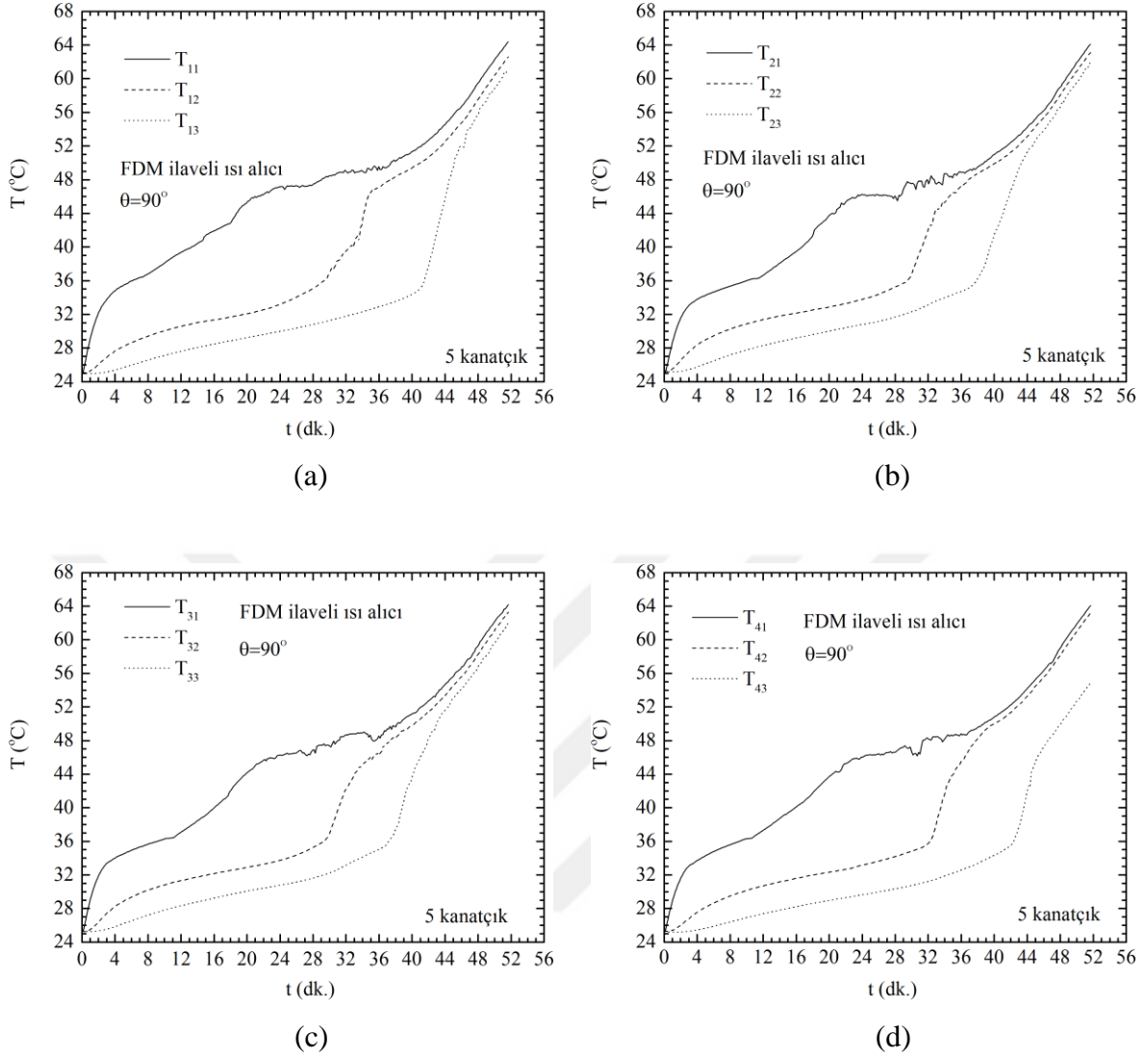


(b)

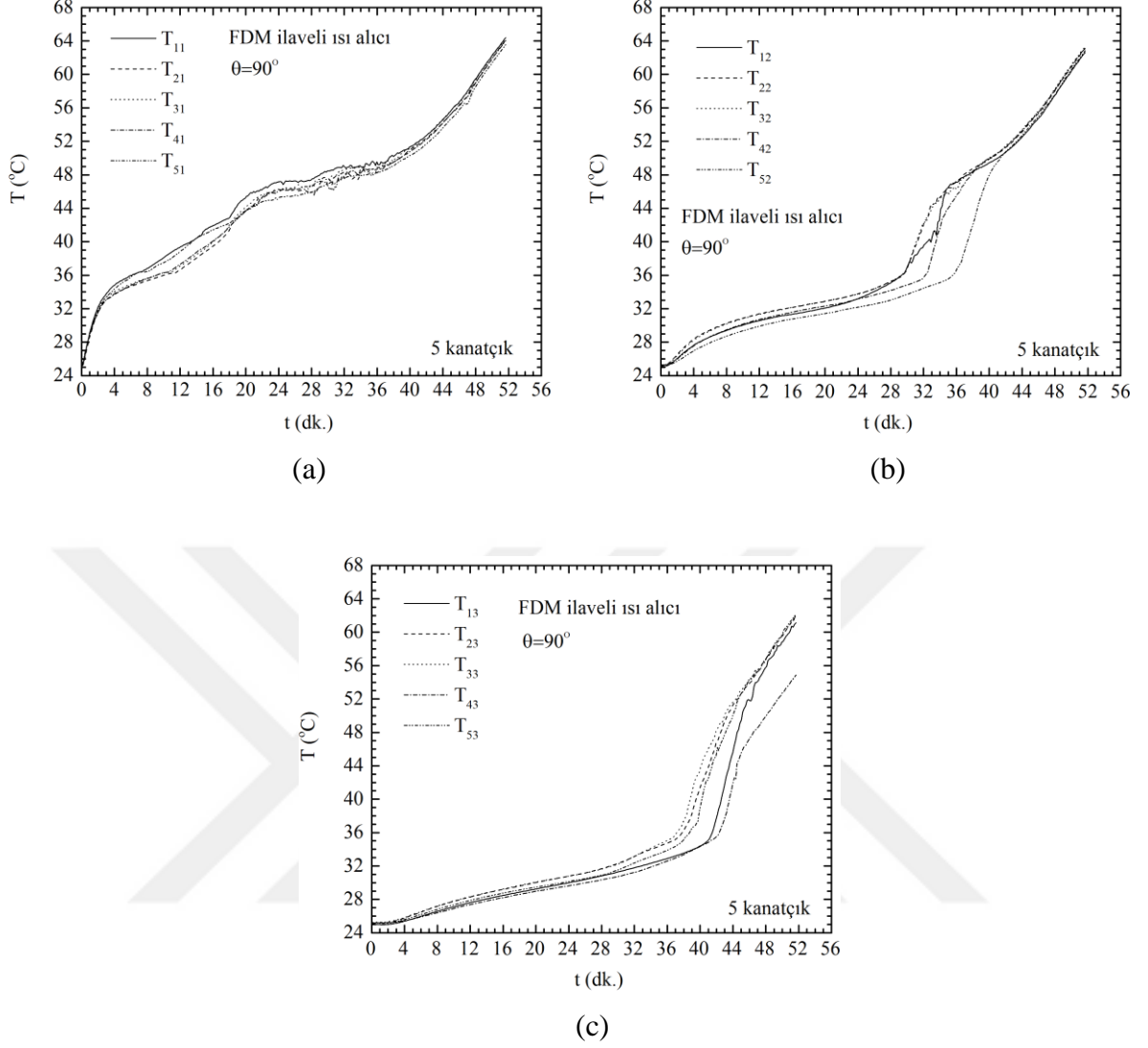


(c)

Şekil 3.34. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 3$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



Şekil 3.35. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



Şekil 3.36. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n = 0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=90^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).

3.2.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi

Farklı kanatçık sayısı ($n = 1, 3$ ve 5) ve konum açısı değerleri ($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90°) için ısıtıcı yüzey sıcaklığının zaman bağımlı değişimi Şekil 3.37 – 3.39’da verilmiştir. Genel karakter olarak, ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının benzer bir artış eğilimi sergilediği ve artan kanatçık sayısına ve konum açısıyla daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Geometrik düzenlemeye dayalı bu davranış, ısı transfer yüzey alanındaki artışın ve doğal taşınım mekanizmasındaki iyileşmenin bir sonucudur

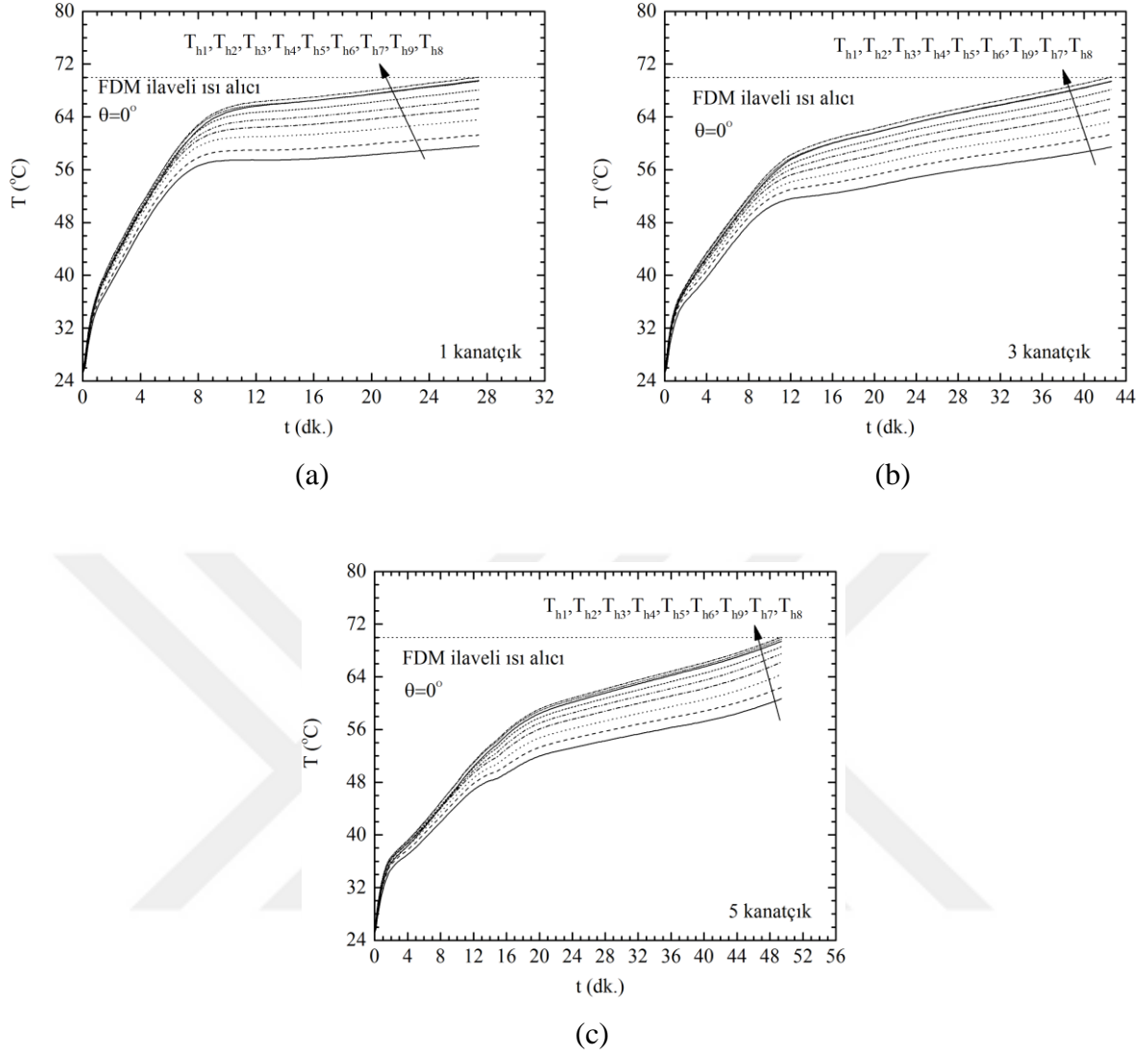
Düşey konum ($\theta = 0^\circ$) için ısıtıcı yüzeye ait yerel sıcaklık değişimleri farklı kanatçık sayıları için Şekil 3.37’de sunulmuştur. Herhangi bir zaman adımı için yerel sıcaklıkların

kanatçık sayısının artışına bağlı olarak daha düşük değerler aldığı açık bir şekilde görülmektedir. Nicel bir örnek olarak, $t = 7,2$ dk. zaman adımıyla ısıtıcı yüzey üzerindeki maksimum yerel nokta sıcaklıkları $n = 0$ (Şekil 3.13 b), 1, 3 ve 5 için sırasıyla $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerlerine ulaşmaktadır. Burada, kanatçiksız duruma kıyasla $n = 1, 3$ ve 5 için sıcaklık değerlerinde, sırasıyla, % 13, % 28 ve % 37 düzeyinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu durum, yukarıda da belirtildiği üzere, ısı transfer yüzey alanındaki artış ve etkin doğal taşınımın bir sonucudur. Isı geçiş sürecinin sonunda, ısıtıcı yüzeye ait maksimum yerel sıcaklık farkları ($T_{h8} - T_{h2}$) artan kanatçık sayısına bağlı olarak ($n = 1, 3$ ve 5), sırasıyla, $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $7,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerlerini almaktadır. Bu durum, artan kanatçık sayısı ile ısıtıcı yüzey üzerinde daha homojen bir sıcaklık dağılımının sağlandığını ortaya koymaktadır. İlgili grafikler de, kanatçık sayısının limit çalışma sıcaklığına ulaşma sürelerini de önemli ölçüde etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. Kanatçiksız duruma ($t = 7,2$ dk.) kıyasla güvenilir çalışma sürelerinde artan kanatçık sayısı ($n = 1, 3$ ve 5) ile, sırasıyla, % 280 ($t = 27,4$ dk.), % 492 ($t = 42,6$ dk.) ve % 586 ($t = 49,4$ dk.) oranında artış sağlamaktadır. Burada, kanatçık sayısındaki artış oranı ile çalışma sürelerindeki artış oranlarının doğru orantılı olmadığı not edilmelidir. Bu davranış, komşu kanatçıklar arasında mesafenin azalması ve bunun bir sonucu olarak direnç kuvvetlerinin artması ile ilişkilidir. Kanatçık sayısı ve direnç kuvvetleri arasındaki bu ilişki optimum bir kanatçık sayısı varlığını ortaya koymaktadır.

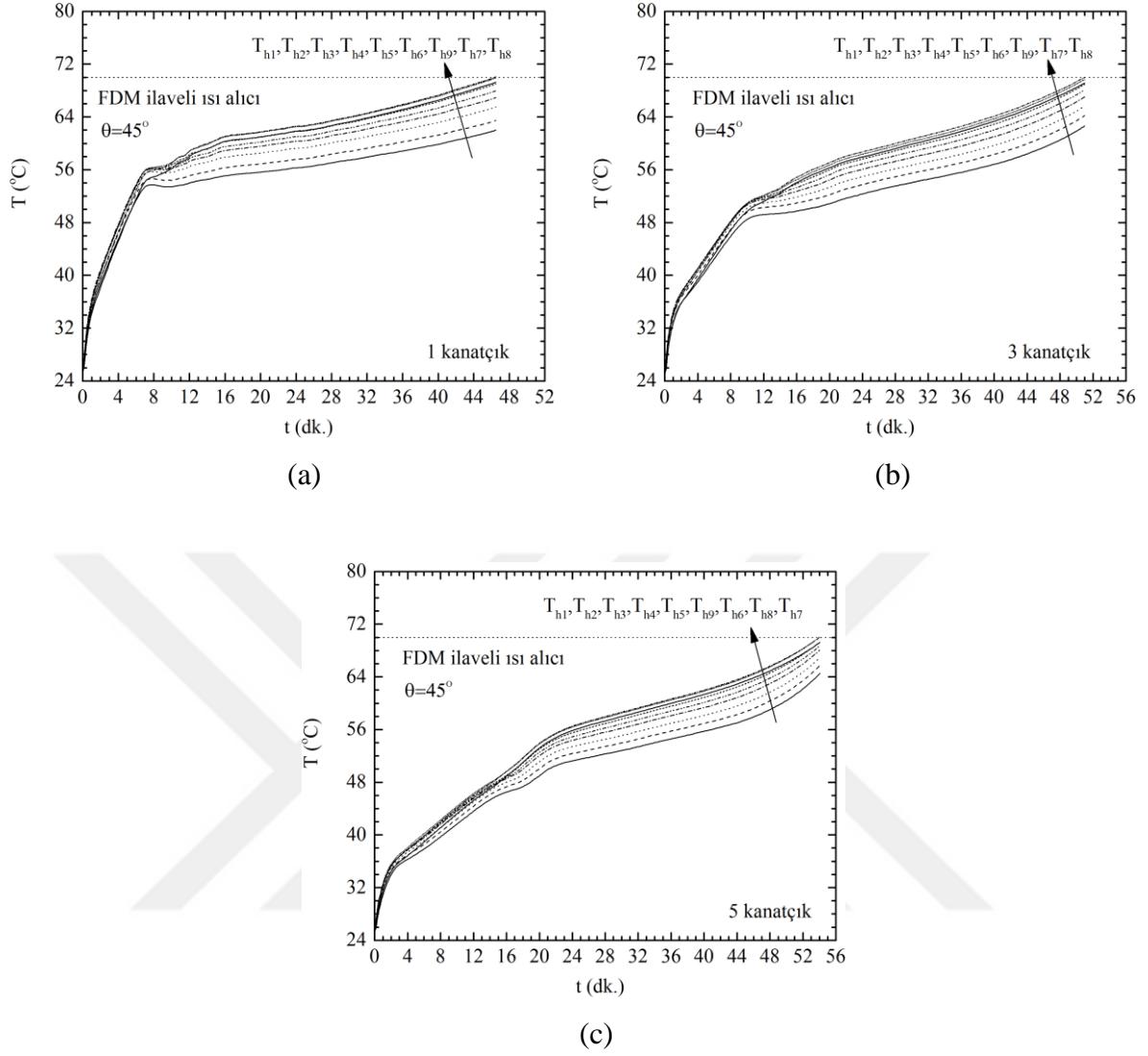
$\theta = 45^{\circ}$ konumu için ısıtıcı yüzey sıcaklıklarının farklı kanatçık sayıları altındaki yerel değişimleri Şekil 3.38'de verilmiştir. Genel karakter olarak, yerel sıcaklıklar $\theta = 0^{\circ}$ konumuyla benzer davranışlar sergilemektedir. Bununla birlikte, yerel sıcaklıkların herhangi bir zaman adımı için $\theta = 0^{\circ}$ 'ye kıyasla daha düşük değerler ve mevcut açılal konumun daha uzun çalışma süreleri sağladığı ilgili grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir. Bu davranış, aynı kanatçık sayısı için $\theta = 45^{\circ}$ 'nin daha büyük taşınım hücrelerine cevap vermesiyle açıklanabilir. Yerel sıcaklık değişimlerine örnek olarak, $t = 27,4$ dk. zaman adımı için, $n = 0$ (Şekil 3.13 d), 1, 3 ve 5 için maksimum yerel nokta sıcaklıkları sırasıyla $68,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $63,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $59,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $57,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. İlgili değerler kendi içinde değerlendirildiğinde maksimum yerel sıcaklık değerlerinin kanatçiksız duruma kıyasla, sırasıyla, % 8, % 13 ve % 16 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Açılal konum artışına bağlı olarak düşey konuma kıyasla $n = 1, 3$ ve 5 durumları için ısıtıcı yüzey sıcaklıklarında, sırasıyla, % 10, % 8 ve % 7 oranlarında bir azalma sağlanmıştır. Isı geçiş sürecinin sonunda, ısıtıcı yüzey üzerindeki yerel sıcaklık

farklarının ($T_{h8}-T_{h2}$) artan kanatçık sayısı ile daha düşük düzeylere ulaştığı; ($n = 1, 3$ ve 5 için, sırasıyla, $6,5$ °C, $5,8$ °C ve $5,4$ °C) ilgili grafiklerden görülmektedir. Bu davranışın, ısı alıcılarda karşılaşılan temel problemlerden biri olan termal gerilmeyi minimize ettiği vurgulanmalıdır. Limit çalışma sıcaklıklarına ulaşma süreleri açısından ise kanatçiksız duruma (Şekil 3.13 d, $t = 32,5$ dk.) kıyasla mevcut açısız düzenlemede ($\theta = 45^\circ$) $n = 1,3$ ve 5 için, sırasıyla, % 43, % 57 ve % 66 oranlarında iyileşme sağlandığı Şekil 3.38 a, b ve c'den görülmektedir.

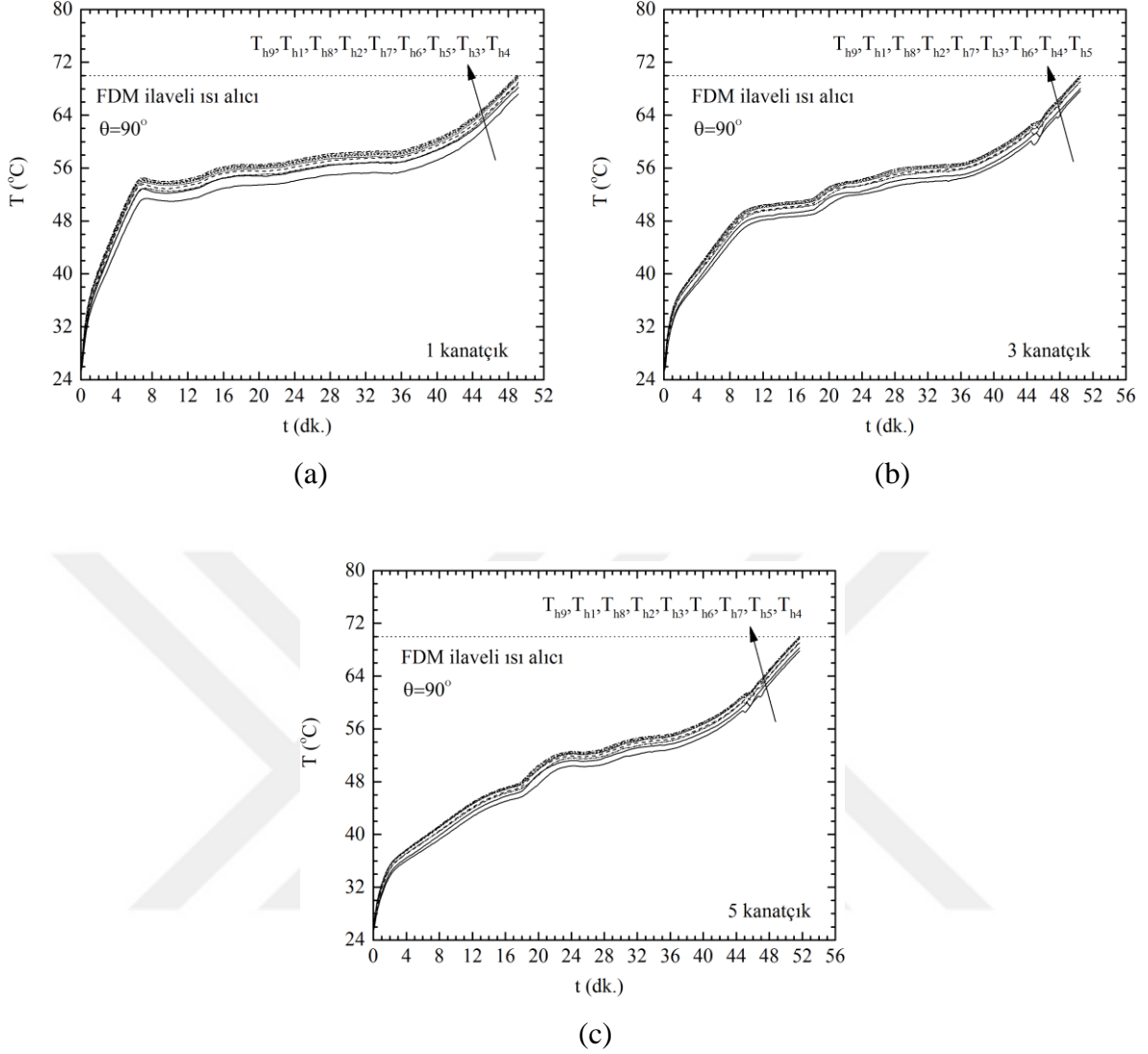
$\theta = 90^\circ$ konumuna ait yerel sıcaklık değişimleri farklı kanatçık sayıları için ayrı formda Şekil 3.39'da sunulmaktadır. $\theta = 0^\circ$ ve 45° 'den farklı olarak, mevcut düzenlemede ısı geçişinin son periyodunda yüzey sıcaklıklarının hızlı bir artış sergilediği görülmektedir. Bu davranış, kapalı ortam içerisinde katı/sıvı faz dönüşümünün bütünüyle tamamlanarak duyulur ısı depolama formuna geçildiğini göstermektedir. Bununla birlikte diğer açısız konumlara kıyasla, $\theta = 90^\circ$ 'nin aynı zaman adımı için daha düşük yüzey sıcaklıkları ve uzun çalışma sürelerine cevap verdiği ilgili grafiklerde görülmektedir. Örnek olarak, $t = 27,4$ dk. zaman adımıdaki maksimum yerel nokta sıcaklıkları artan kanatçık sayısına ($n = 0, 1, 3$ ve 5) göre, sırasıyla, 62 °C (Şekil 3.13f), $58,1$ °C, $55,6$ °C ve $52,6$ °C değerlerini almaktadır (Şekil 3. 39). Aynı zaman adımında, bu değerler $\theta = 45^\circ$ açısız konumuna kıyasla ise $n = 1, 3$ ve 5 için, sırasıyla, % 8, % 7 ve % 9 oranında daha düşük seviyededir. Benzer şekilde, ısı geçiş sürecinin sonunda, her bir kanatçık sayısı durumu için ısıtıcı yüzey üzerindeki maksimum sıcaklık farkı ($T_{h4} - T_{h2}$) önemli düzeyde azalmakta ve 1 °C seviyelerine ulaşmaktadır. İlgili farkın $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 45^\circ$ için, sırasıyla, $8,7$ °C ($n = 1$) ve $6,5$ °C ($n = 1$) olduğu hatırlanmalıdır. Mevcut düzenleme için güvenilir çalışma sürelerindeki artış oranlarının ise kanatçiksız duruma ($t = 47$ dk.) kıyasla, $n = 1, 3$ ve 5 için sırasıyla % 5 ($t = 49,1$ dk.), % 8 ($t = 50,6$ dk.) ve % 10 ($t = 51,8$ dk.) düzeylerinde ve oldukça sınırlı olduğu ifade edilmelidir.



Şekil 3.37. FDM-ileveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=0^\circ$: $n=1$ (a), $n=3$ (b), $n=5$ (c)



Şekil 3.38. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=45^\circ$: $n=1$ (a), $n=3$ (b), $n=5$ (c)



Şekil 3.39. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta = 90^\circ$: $n=1$ (a), $n=3$ (b), $n=5$ (c)

3.2.3. Erime Arayüzey Gelişimi

Kanatçık sayısı ve konum açısının erime arayüzeyi ilerleme hızı ve formu üzerindeki etkisi farklı zaman adımları için ($t = 12$ dk., 24 dk., 36 dk. ve $t = t_{\text{limit}}$) yanal ve alt erime yüzey fotoğrafları üzerinden Şekil 3.40 – 3.47’de verilmiştir.

Isı geçiş sürecinin ilk periyodunda ($t = 12$ dk.), genel karakter olarak, tüm ısı alıcı düzenlemeleri için erime arayüzeylerinin ısı alıcı yüzeyi boyunca düz bir forma ve uniform ilerleme hızına sahip olduğu yanal yüzey fotoğraflarından görülmektedir (Şekil 40). Bu periyotta ($t \leq 12$ dk.), sıvı FDM bölgesinin oldukça dar olması nedeniyle kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere kıyasla yeterli büyüklüğe ulaşamadığı ve etkin ısı transfer

mekanizmasının iletim olduğu vurgulanmalıdır. Bununla birlikte, düşük kanatçık sayıları ($n = 0, 1$ ve 2) ve konum açılarında ($\theta = 0^\circ - 30^\circ$) katı/sıvı erime arayüz ilerleme hızının kapalı hacmin üst yarı bölgesinde bir miktar arttığı ve arayüz formunun hafif dışa eğimli (konveks) bir yapıya dönüştüğü görülmektedir (Şekil 3.40 a-c). Bu durum, hacimsel genleşme sonucu üst bölgelere taşınan sıcak FDM'nin ısı geçişine sunduğu pozitif katkı ile açıklanabilir.

İlerleyen süreçte ($t = 24$ dk.), sıvı FDM bölgesinin yeterli kalınlığa ulaşmasıyla, kaldırma kuvvetleri viskoz kuvvetlere üstün gelmekte ve ısı geçişinin ilk periyodunda etkin olan iletim mekanizması yerini, büyük oranda doğal taşınım mekanizmasına terk etmektedir. Şekil 3.41 incelendiğinde, konum açısı ve kanatçık sayısının doğal taşınım mekanizması üzerinde (hücre formu ve büyüklüğü) belirleyici bir role sahip olduğu ve katı/sıvı arayüz ilerleme hızı ve formunu önemli düzeyde değiştirdiği görülmektedir. İlgili zaman dilimi için, arayüz formları $\theta = 0^\circ - 15^\circ$ aralığında (Şekil 3.41 a ve b) yukarı yönlü genişleyen konveks bir yapı, $\theta = 30^\circ - 60^\circ$ (Şekil 3.42 c - e) aralığında yukarı yönlü genişleyen konkav bir yapı ve $\theta \geq 75^\circ$ (Şekil 3.41 f ve g) için ise yaklaşık düz (dalgalı) bir yapı sergilemektedir. Aynı konum açısı değerleri için ise kanatçık sayısındaki artışa bağlı olarak konveks ve konkav form eğim açıları daha düşük düzeylere ulaşmakta, bir başka ifadeyle daha uniform erime hızları sağlanmaktadır.

İlgili form değişimleri, bir önceki bölümde (kanatçık ilavesiz durum için) sıcak FDM hareketi ve doğal taşınım hücrelerinin gelişimi üzerinden detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu nedenle, yinelemeden kaçınmak için bu bölümde kanatçık etkisi üzerinde yoğunlaşılacaktır. İlgili şekiller incelendiğinde, aynı konum açısı için kanatçık sayısının artışına bağlı olarak konkav ve konveks yapıların azaldığı, bir başka ifade ile uniform erime hızlarının sağlandığı net bir şekilde görülmektedir. Bu davranış, kapalı hacmin alt bölgesinde etkin olan iletim mekanizmasının iyileşmesi ve doğal taşınım hücrelerinin ilgili bölgeyi içerecek formda aşağı yönlü gelişimi ile açıklanabilir. Isı alıcıya göre yatay ve düşey ölçüm hatlarına ait sıcaklık dağılımları (Şekil 3.19 – 3.36) ve kapalı hacmin sol alt köşesindeki katı FDM hacmi bu mekanizmaların varlığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Arayüz görüntüleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde, kanatçık sayısının belirli bir değerinden ($n \geq 3$) sonra, arayüz formunun yüksek oranda korunduğu görülebilir. Bu davranış, kanatçık mesafesinin, iletim ve taşınım mekanizmaları üzerindeki belirleyici rolü ile açıklanabilir. Daha açık bir ifade ile kanatçık sayısındaki artış (kanatçıklar arasındaki mesafenin azalması) iletimle ısı geçişini arttırırken, oluşturduğu ilave akış

direnci doğal taşınım ile olan ısı geçişini önemli düzeyde baskılamaktadır. İletim ve taşınım arasındaki bu denge, daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere ısı alıcı düzenlemeleri için optimum bir kanatçık sayısının varlığını ortaya koymaktadır.

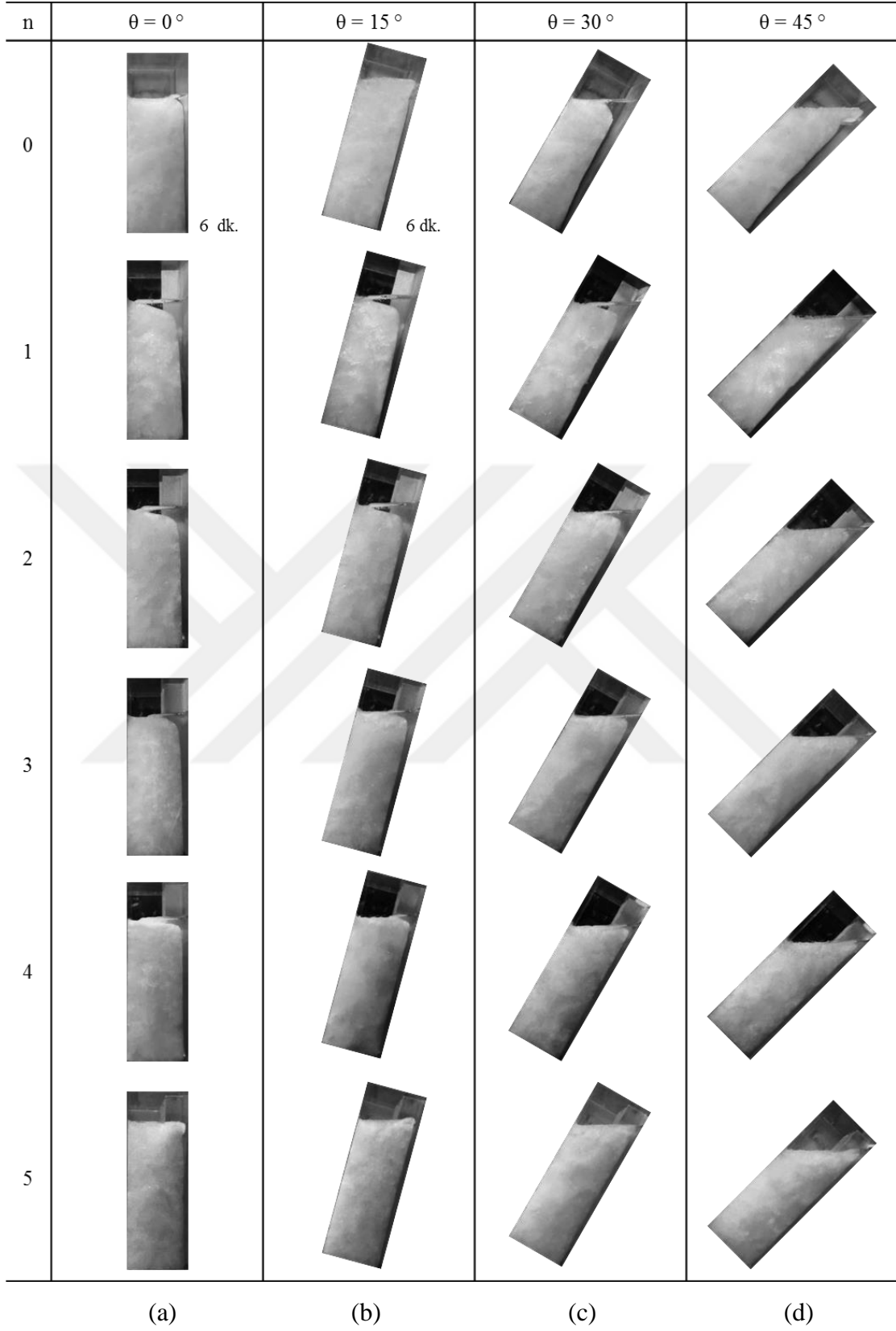
Isı geçişinin bir sonraki periyodunda ise ($t = 36$ dk.), sıvı FDM kalınlığının kanatçık yüksekliğini aşmasıyla ayrık formdaki taşınım hücreleri birleşmekte ve doğal taşınım daha etkin bir karaktere bürünmektedir. Şekil 3.42’de sunulan katı/sıvı arayüz formları ve ilerleme hızları bu mekanizmanın geçerliliğini ortaya koymaktadır. Nicel olarak katı/sıvı arayüz ilerleme hızında önceki zaman adımına kıyasla yaklaşık 2 katlık bir artış söz konusudur.

Isı geçiş sürecinin son periyoduna ait katı/sıvı arayüz görüntüleri Şekil 3.43’de verilmektedir. Farklı kanatçık sayısı ve konum açılarına ait görüntüler incelendiğinde, kanatçiksız ısı alıcı düzenlemesi için katı/sıvı faz dönüşümünün sadece $\theta = 90^\circ$ ’de tamamlandığı, kanatçık ilaveli düzenlemeler için ise artan kanatçık sayısı ile daha geniş açı aralıklarına kaydığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, aynı konum açısı için kanatçık sayısının artışıyla katı/sıvı arayüzü daha hızlı ilerlemekte ve faz dönüşümü daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Örnek olarak, $\theta = 45^\circ$ için, kanatçık sayısının 2 değerinde faz dönüşümüne katılmayan katı FDM varlığı söz konusu iken, $n = 5$ ’de tüm FDM sıvı fazdadır (Şekil 3.43 d). FDM’nin faz dönüşüm sürecindeki yüksek gizli ısı depolama kabiliyeti dikkate alındığında, bu davranışın daha uzun kullanım sürelerine yer vereceği açıktır.

Kapalı hacmin alt yüzeyi üzerinden elde edilen katı/sıvı arayüz gelişimi farklı zaman adımları için Şekil 3.44 – 3.47’ verilmiştir. Isı geçiş sürecinin ilk periyodunda ($t = 12$ dk.), genel karakter olarak, arayüz ilerleme hızlarının ısı alıcı komşuluğunda uniform, kanatçık komşuluğunda ise kanatçık uç bölgelerine doğru azalan bir eğilim sergilediği görülmektedir. İlgili zaman adımındaki ısı geçişinin iletim ile olduğu hatırlanacak olursa, yüksek taban sıcaklıklarının ve kanatçık boyunca azalan yüzey sıcaklıklarının bu davranışa neden olacağı açıktır. Bununla birlikte, kanatçık sayısının artışıyla ilerleme hızlarının (sıvı FDM kalınlığı) daha düşük seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu davranış ise, aynı ısı geçiş miktarı için genişletilmiş yüzeylerin neden olduğu düşük sıcaklık farkları ($T_{\text{yüzey}} - T_{\text{FDM}}$) ile açıklanabilir. Isı geçiş sürecinin bir sonraki periyodunda ($t = 24$ dk.), katı/sıvı arayüz ilerleme hızlarının önemli düzeyde arttığı ve kanatçıklar arasındaki sıvı bölgelerin kanatçık sayısı ve konum açısının değerine bağlı olarak kısmen veya tamamen birleştiği görülmektedir. Şekil 3.46 incelendiğinde bütünsel birleşimlere yüksek kanatçık sayıları ve

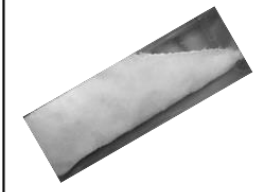


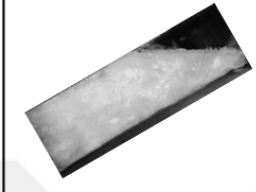





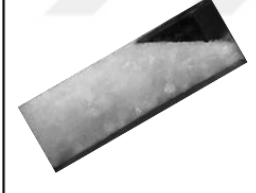


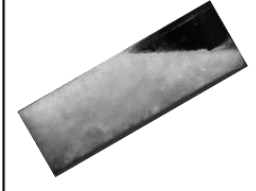


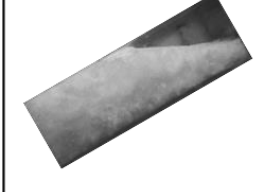


eğim açılarındaki ulaşıldığı görülmektedir. Bu davranış, sırasıyla kanatçık ilavesinin iletimle ısı geçişini artırması ($\theta < 60^\circ$) ve eğim açısının doğal taşınım ile ısı geçişine sunduğu ($\theta > 75^\circ$) pozitif katkı ile açıklanabilir. $t = 36$ dk. ise katı/sıvı arayüzeylerin tüm geometrik düzenlemeler için birleştiği ve içe eğimli (konkav) bir yapıya kavuştuğu görülmektedir. Katı/sıvı arayüzey ilerleme hızları ise bir önceki periyota benzer davranışlar sergilemektedir.

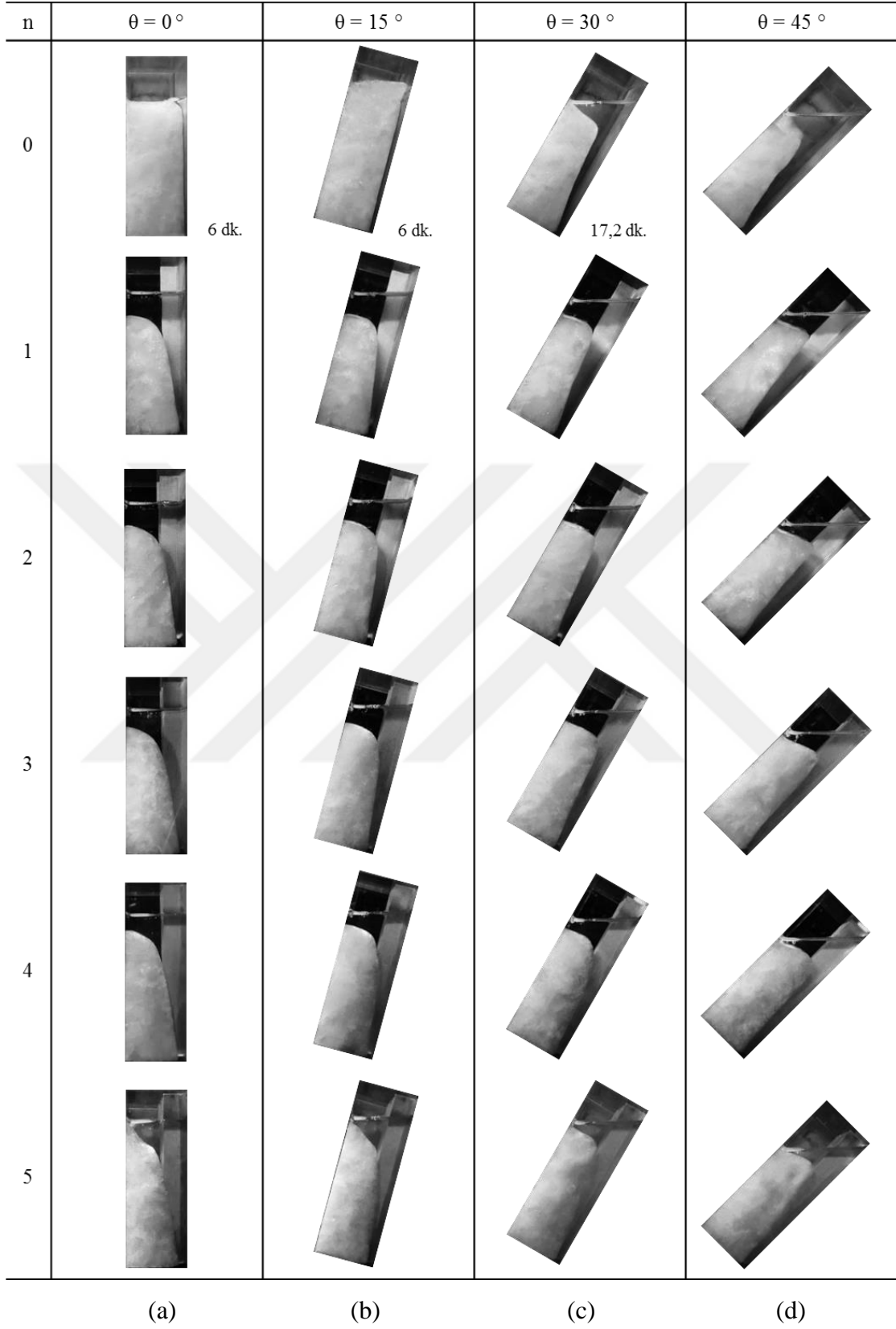
Isı geçiş sürecinin son periyodunda ise, kapalı hacmin alt yüzeyindeki katı/sıvı faz dönüşümünün yüksek kanatçık ve eğim açıları için büyük ölçüde tamamlandığı görülmektedir (Şekil 3.47). Burada, düşey konumlandırma için kanatçık sayısındaki artışın etkin bir faz dönüşümü için yeterli olmadığı vurgulanmalıdır. Bu davranış, ilgili açısal konum için kanatçık geometrisinin faz dönüşümüne cevap verecek şekilde modifikasyonunu gerekli kılmaktadır.



Şekil 3.40. Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey ($t=12$ dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).



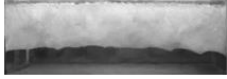


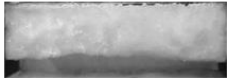












Şekil 3.40'in devamı

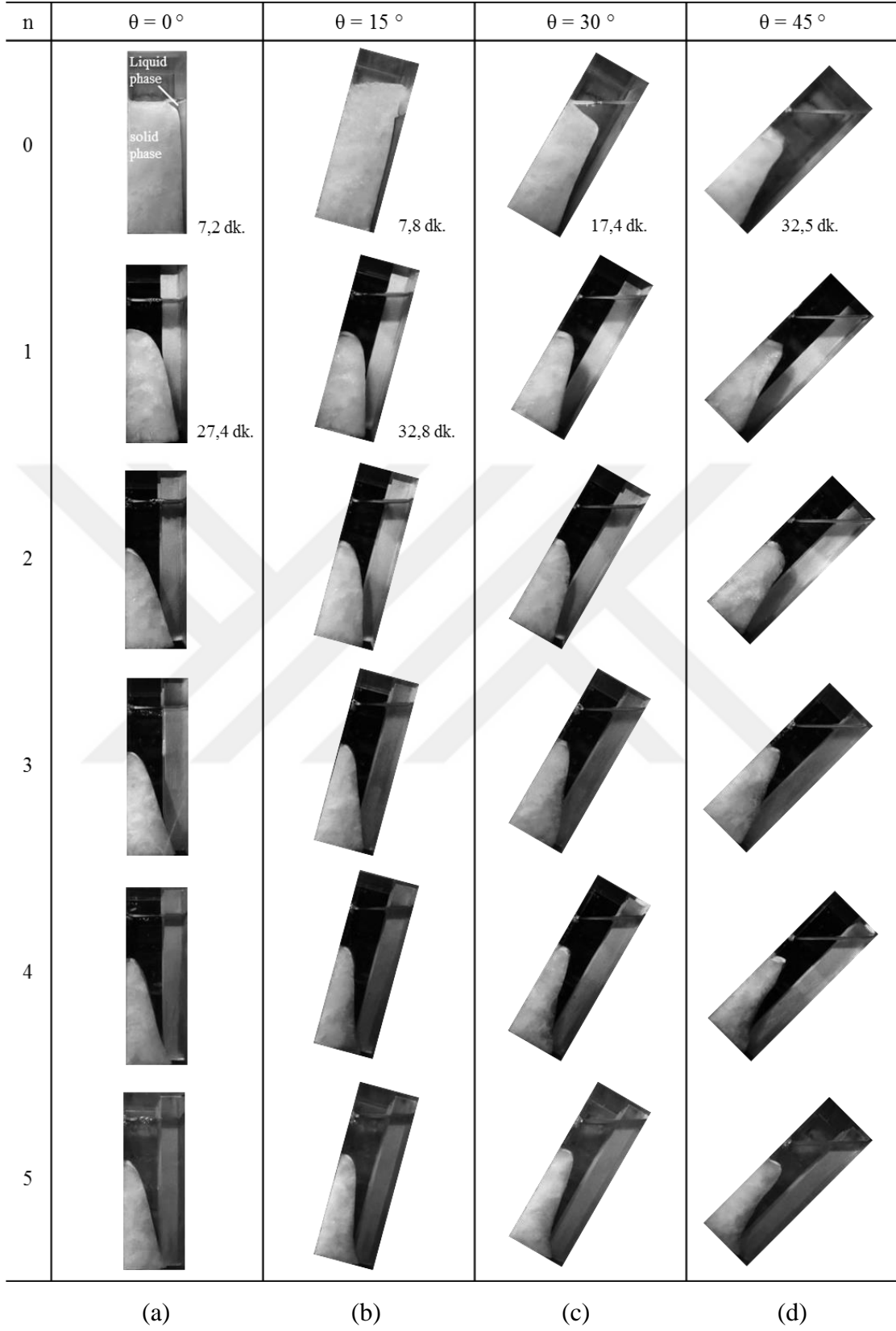
n	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
0			
1			
2			
3			
4			
5			
	(e)	(f)	(g)



Şekil 3.41. Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey (t=24 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

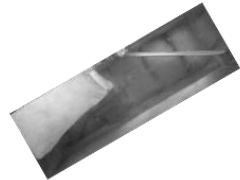
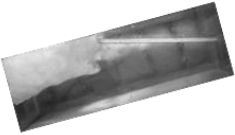
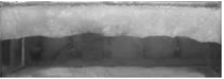
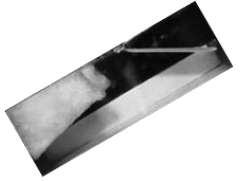
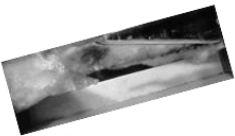
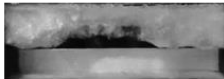
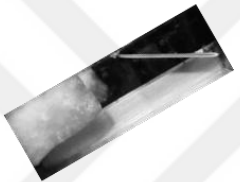
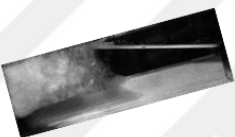
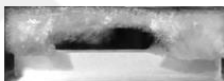
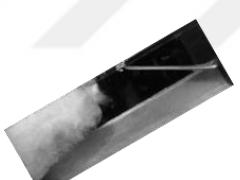

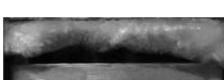
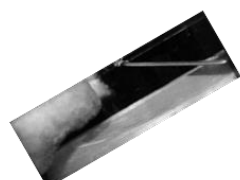


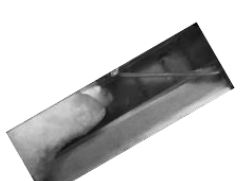


Şekil 3.41'in devamı



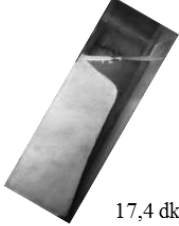
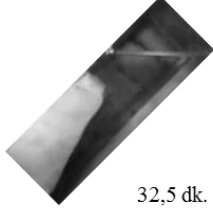



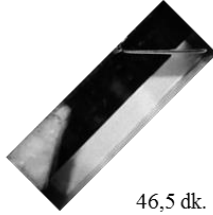


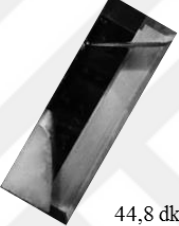
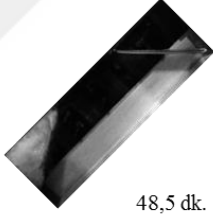



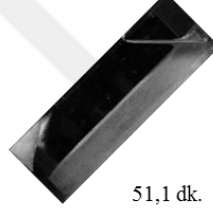


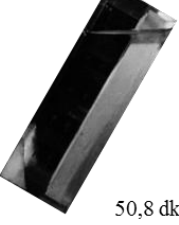
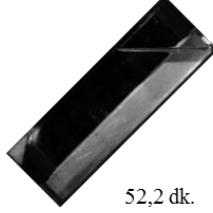

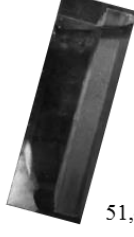

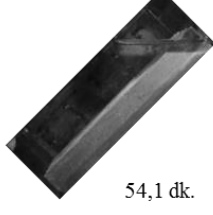
n	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
0			
1			
2			
3			
4			
5			
	(e)	(f)	(g)



Şekil 3.42. Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey ($t=36$ dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

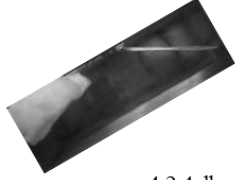
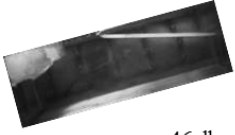

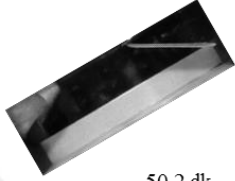
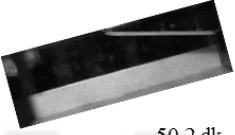





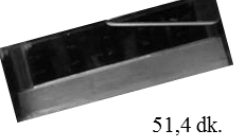

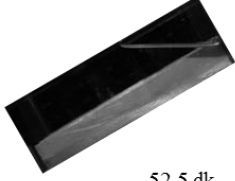


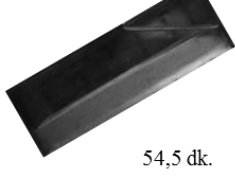
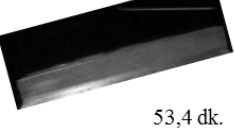

Şekil 3.42'nin devamı

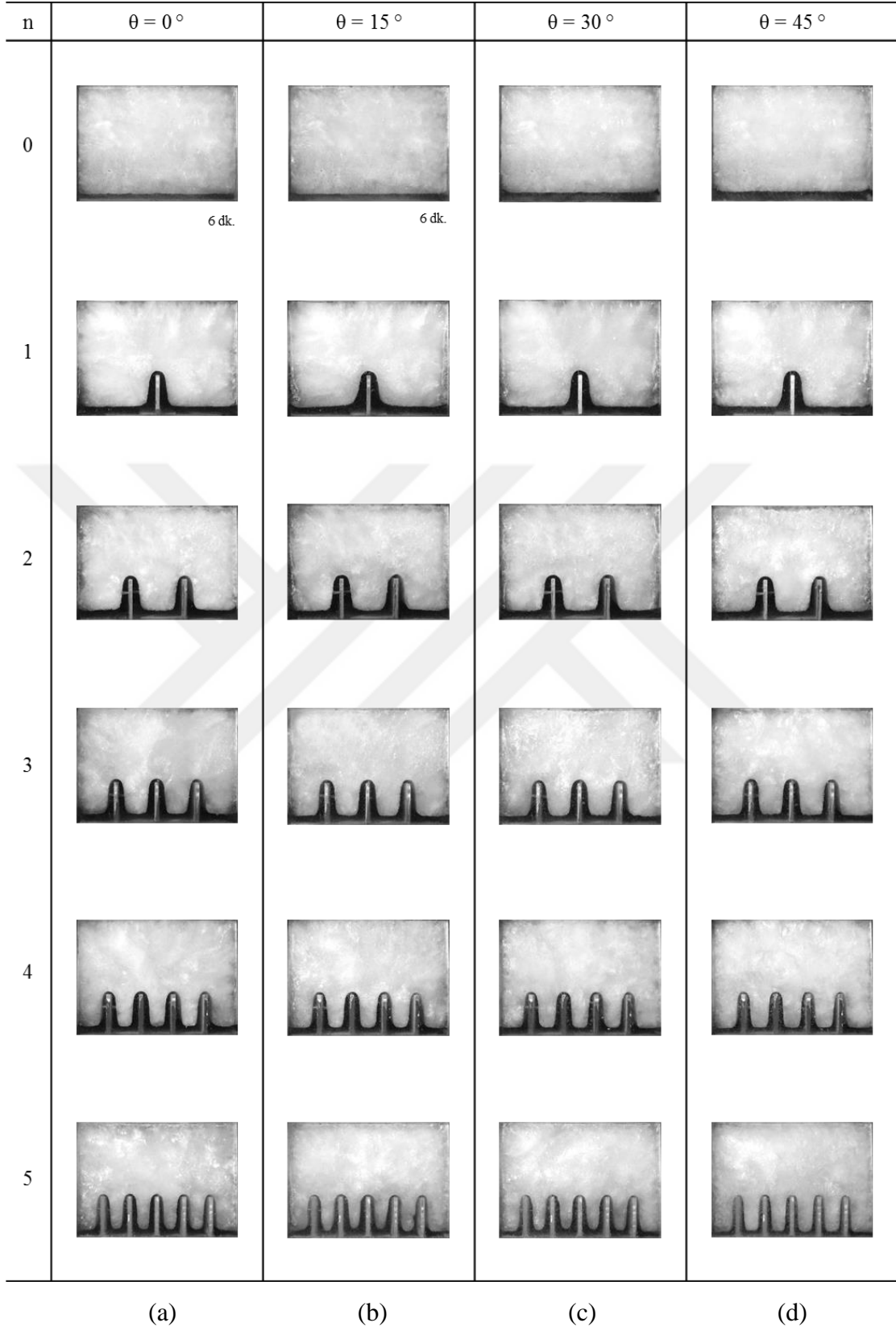
n	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
0			
1			
2			
3			
4			
5			
	(e)	(f)	(g)

n	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0	 7,2 dk.	 7,8 dk.	 17,4 dk.	 32,5 dk.
1	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 39,1 dk.	 46,5 dk.
2	 36,8 dk.	 40,9 dk.	 44,8 dk.	 48,5 dk.
3	 42,6 dk.	 45,5 dk.	 48,8 dk.	 51,1 dk.
4	 45,8 dk.	 48,2 dk.	 50,8 dk.	 52,2 dk.
5	 49,4 dk.	 51,4 dk.	 53,8 dk.	 54,1 dk.
	(a)	(b)	(c)	(d)

Şekil 3.43. Erime arayüzey ilerlemesi, yanal yüzey ($t=t_{son}$): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

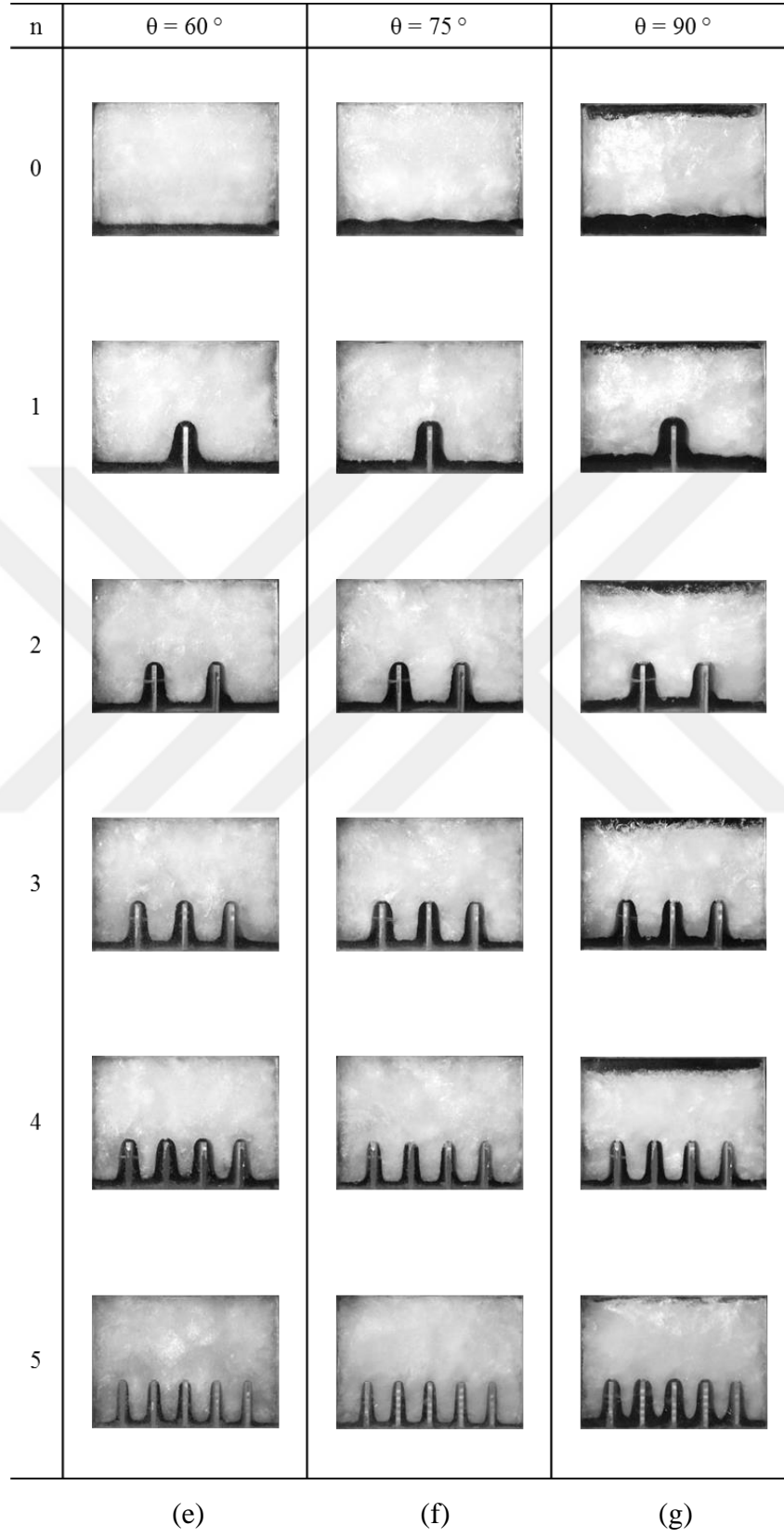
Şekil 3.43'ün devamı

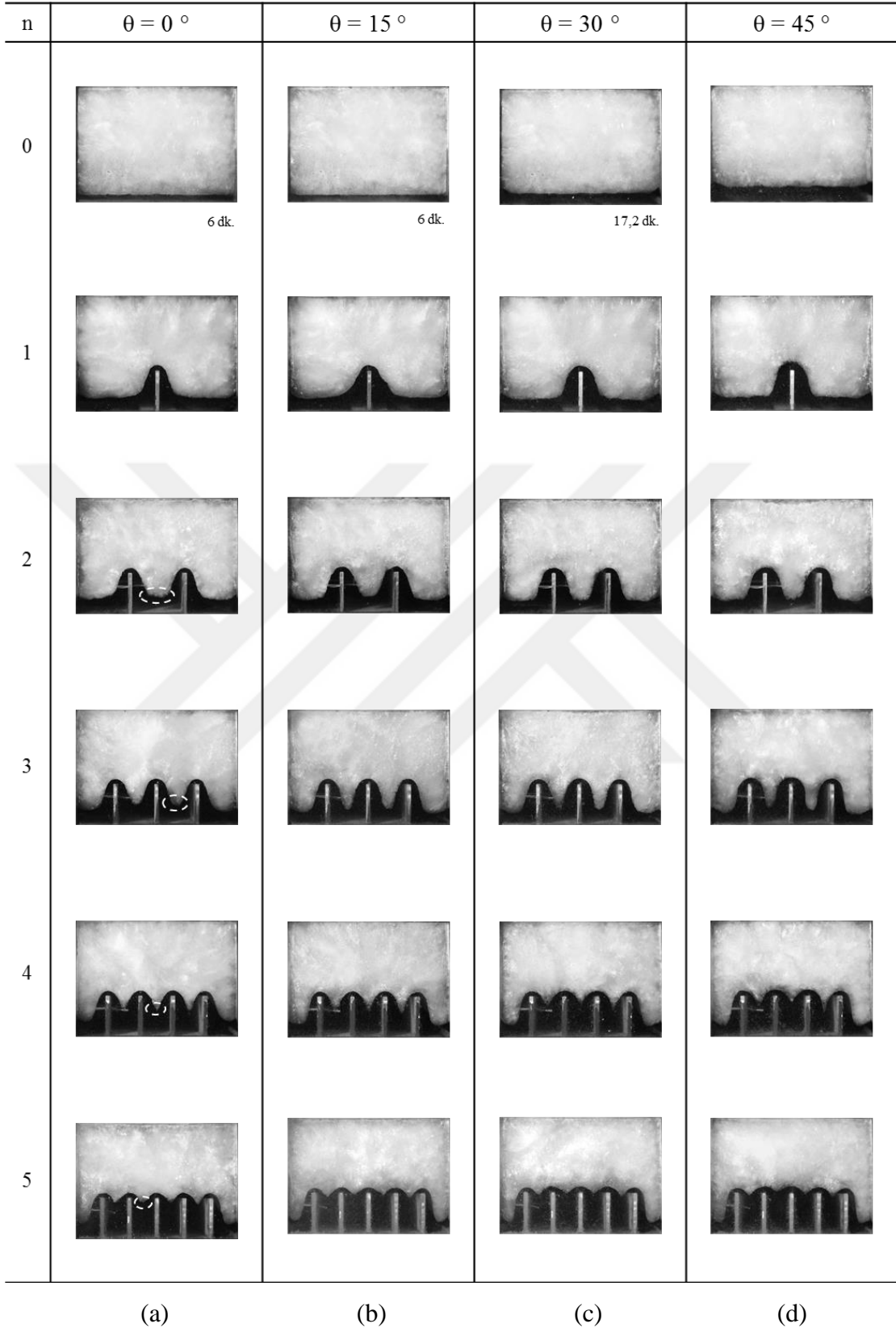
n	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
0	 4,2,4 dk.	 46 dk.	 47 dk.
1	 50,2 dk.	 50,2 dk.	 49,1 dk.
2	 51 dk.	 50,2 dk.	 48,8 dk.
3	 52,5 dk.	 51,4 dk.	 50,6 dk.
4	 52,5 dk.	 51,5 dk.	 50,5 dk.
5	 54,5 dk.	 53,4 dk.	 51,8 dk.
	(e)	(f)	(g)



Şekil 3.44. Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey (t=12 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

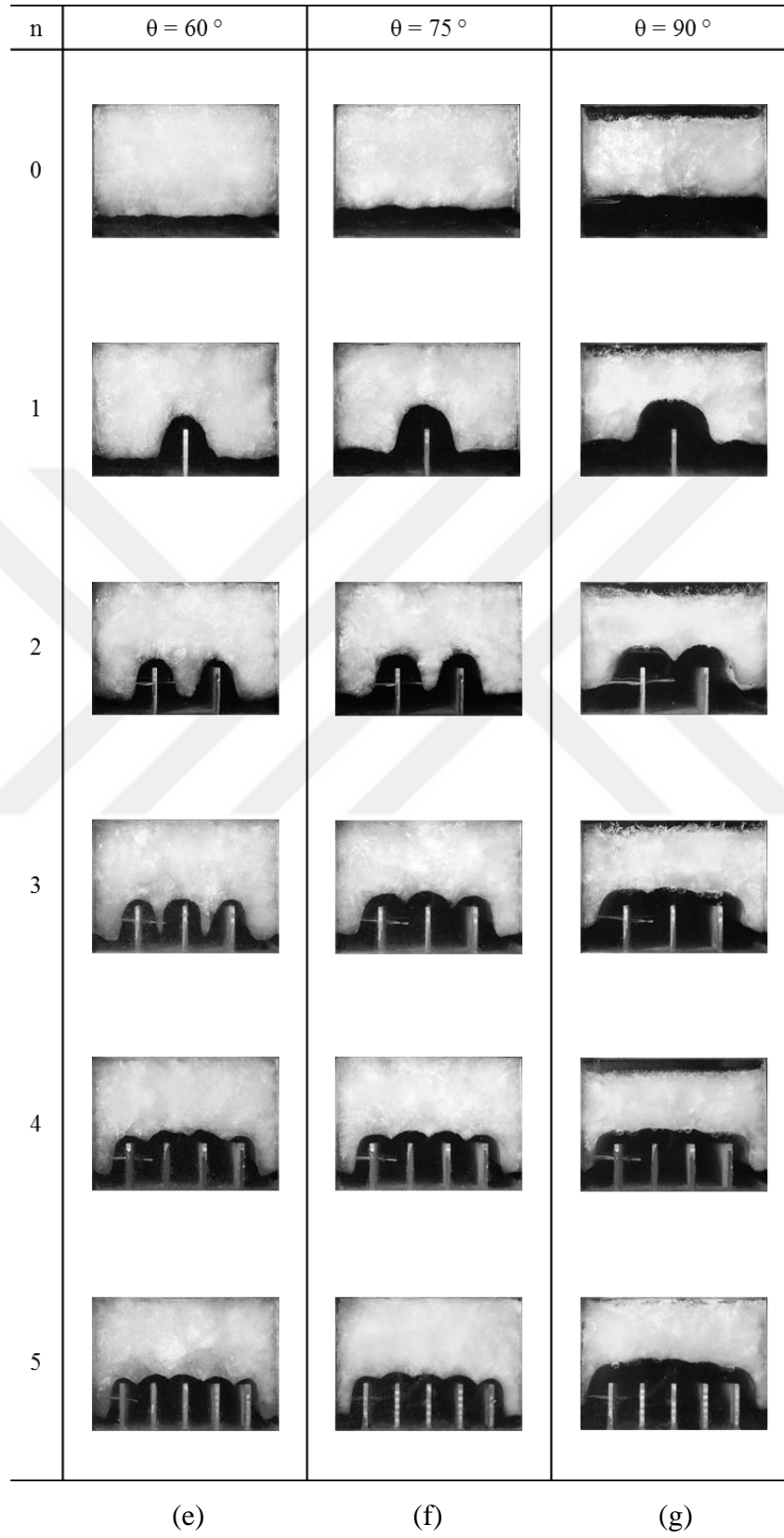
Şekil 3.44'ün devamı




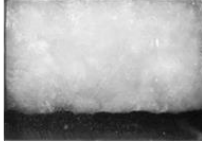
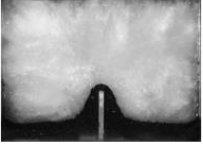
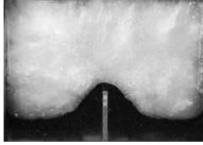
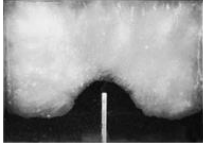
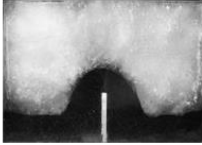
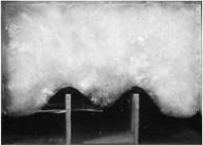
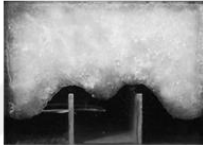
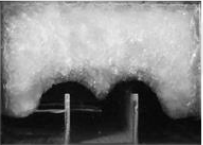
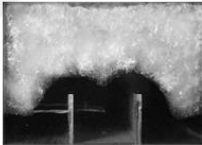
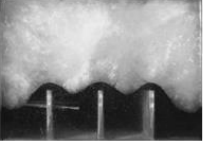
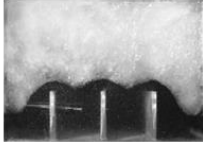
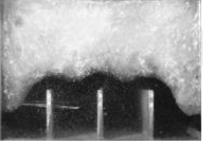
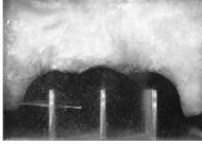
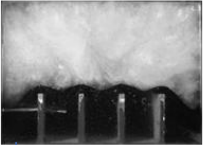
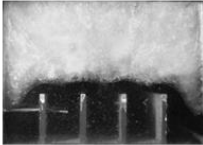
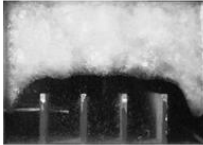
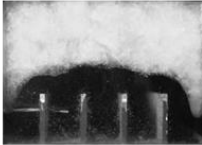
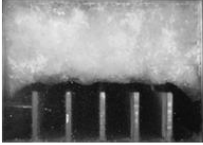
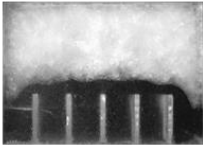
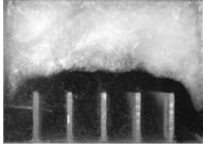
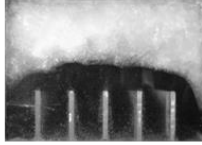




Şekil 3.45. Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey (t=24 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

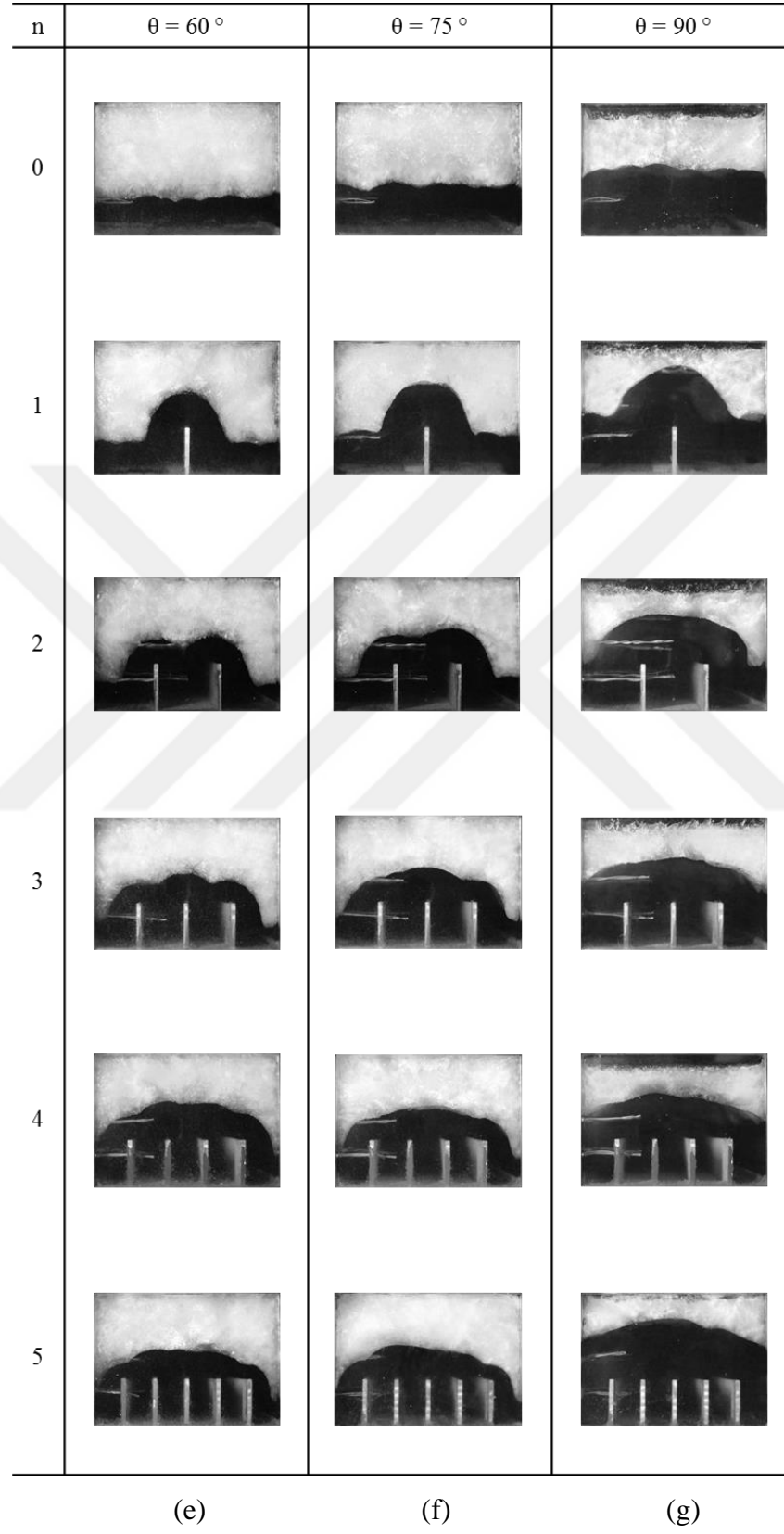
Şekil 3.45'in devamı





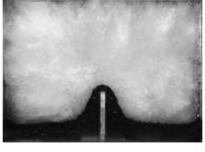
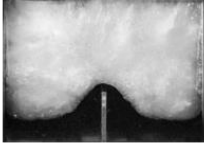
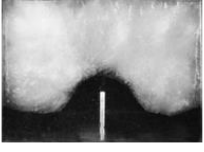
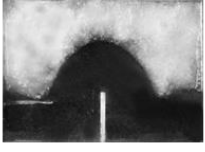

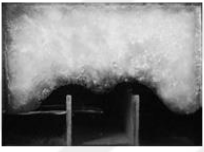
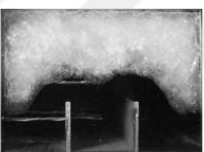
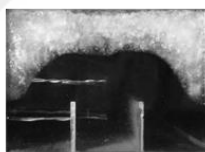
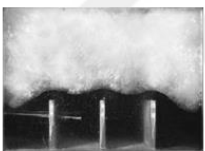
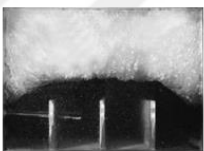
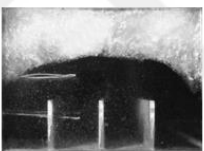

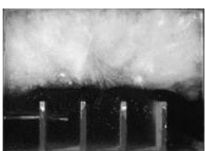
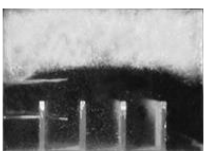
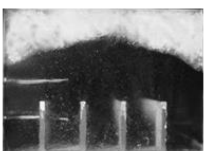

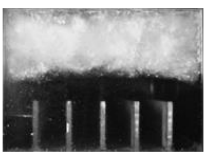
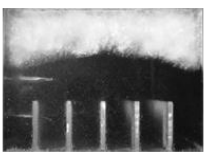
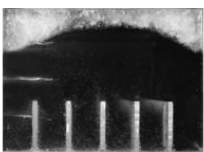
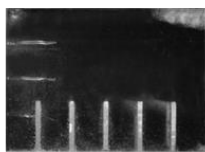


n	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0	 7,2 dk.	 7,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
1	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
2	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
3	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
4	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
5	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 17,2 dk.	 32,5 dk.
	(a)	(b)	(c)	(d)

Şekil 3.46. Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey (t=36 dk.): $\theta=0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).



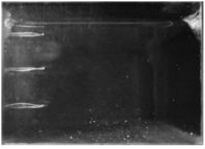
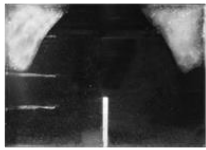
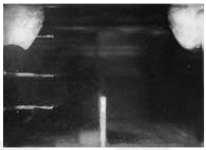
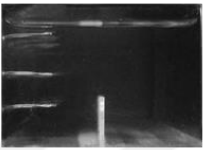
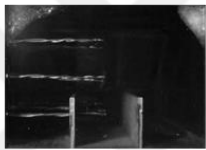

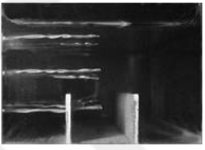
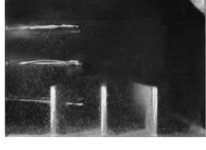

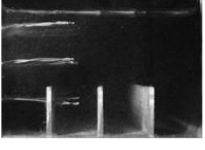
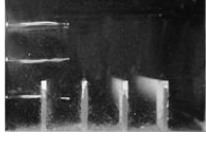
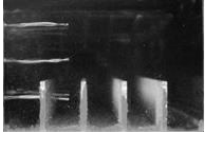
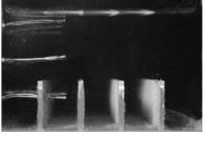
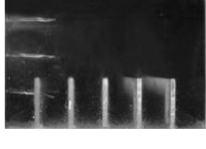
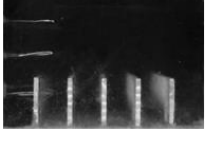

Şekil 3.46'nın devamı



n	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0	 7,2 dk.	 7,8 dk.	 17,4 dk.	 32,5 dk.
1	 27,4 dk.	 32,8 dk.	 39,1 dk.	 46,5 dk.
2	 36,8 dk.	 40,9 dk.	 44,8 dk.	 48,5 dk.
3	 42,6 dk.	 45,5 dk.	 48,8 dk.	 51,1 dk.
4	 45,8 dk.	 48,2 dk.	 50,8 dk.	 52,2 dk.
5	 49,4 dk.	 51,4 dk.	 53,8 dk.	 54,1 dk.
	(a)	(b)	(c)	(d)

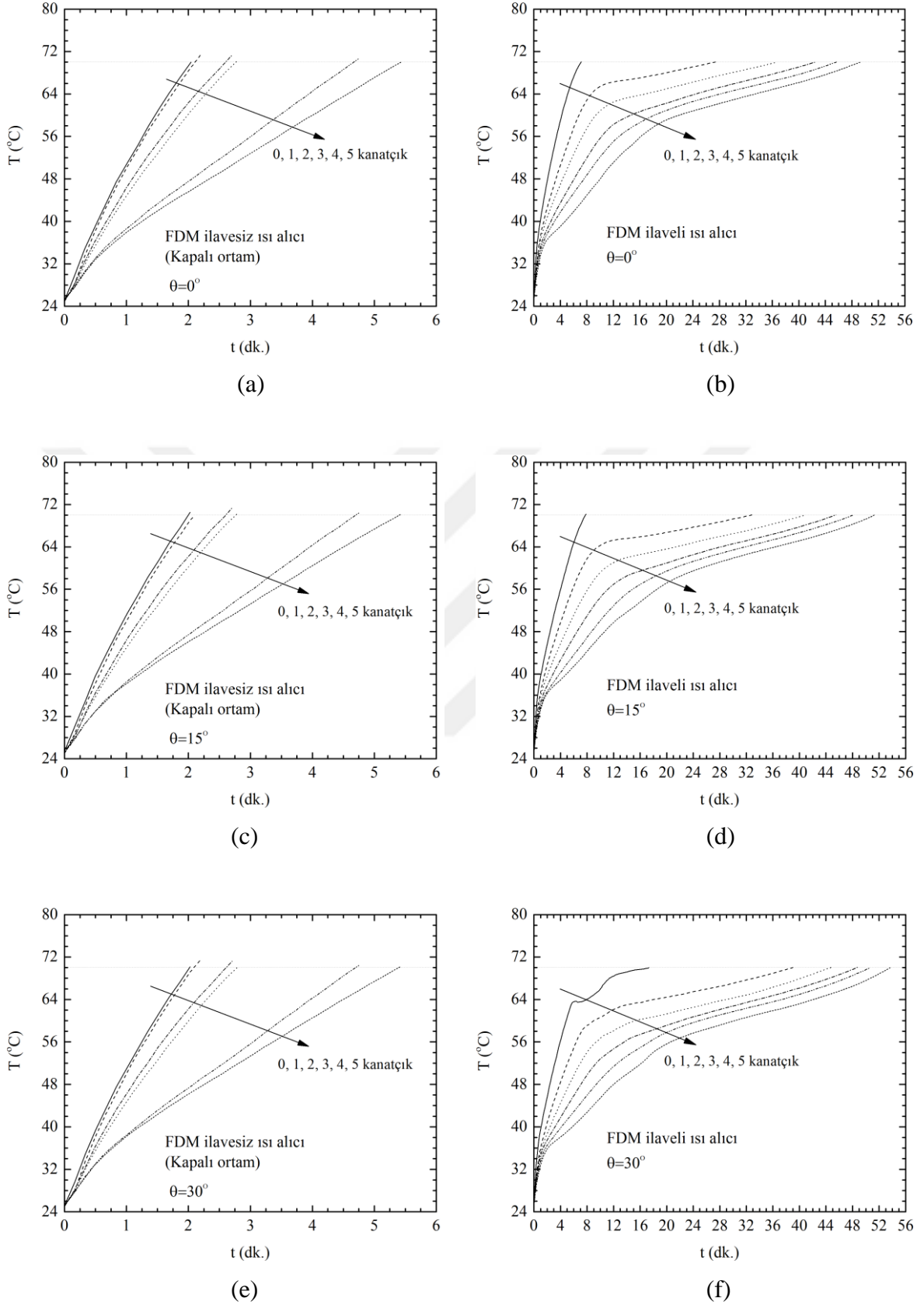
Şekil 3.47. Erime arayüzey ilerlemesi, alt yüzey ($t=t_{son}$): $\theta = 0^\circ$ (a), $\theta=15^\circ$ (b), $\theta=30^\circ$ (c), $\theta=45^\circ$ (d), $\theta=60^\circ$ (e), $\theta=75^\circ$ (f), $\theta=90^\circ$ (g).

Şekil 3.47'nin devamı

n	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
0	 42,4 dk.	 46,0 dk.	 47,0 dk.
1	 50,2 dk.	 50,2 dk.	 49,1 dk.
2	 51,0 dk.	 50,2 dk.	 48,8 dk.
3	 52,5 dk.	 51,4 dk.	 50,5 dk.
4	 53,2 dk.	 52,5 dk.	 50,8 dk.
5	 54,5 dk.	 53,4 dk.	 51,8 dk.
	(e)	(f)	(g)

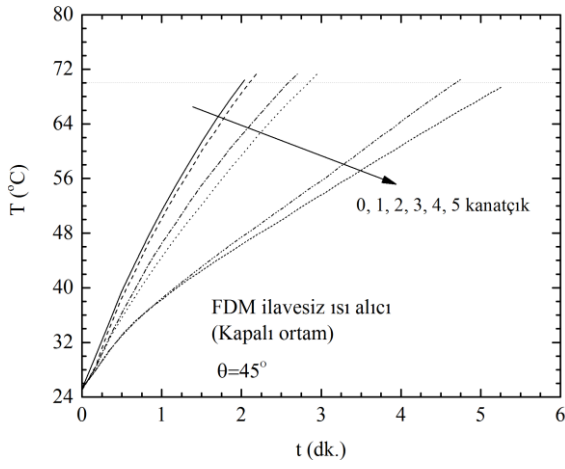
3.2.4. Isı Alıcı Termal Performansı ($n = 0 - 5$)

FDM-ilavesiz ve FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerine ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının zaman bağımlı değişimleri farklı kanatçık sayısı ve konum açıları için Şekil 3.48'de verilmiştir. FDM-ilavesiz durum için, genel karakter olarak, kritik yerel nokta sıcaklıkların açısal konumdan bağımsız ve yaklaşık lineer bir artış sergilediği görülmektedir (Şekil 3.48 a, c, e, g, i, j ve l). Yüksek ısı direncin geçerli olduğu bu düzenlemede kanatçık sayısının artışıyla sıcaklık artış hızları önemli düzeyde azalmakta ve daha uzun çalışma sürelerine ulaşmaktadır. Fakat, nicel açıdan bu sürelerin ($t < 6$ dk.) orta ve yüksek düzeydeki ısı yüklemelere başarılı cevap veremeyeceği açıktır. İlgili sürelerin, yüksek ısı depolama kabiliyetine sahip FDM kullanımıyla çok daha üst seviyelere taşınabileceği Şekil 3.48 b, d, f, h, i, k ve m'de görülmektedir. Örnek olarak, $n = 5$ ve $\theta = 0^\circ$ için, FDM-ilavesiz ve ilaveli durumlara ait çalışma süreleri 5,5 dk. ve 46 dk. düzeylerindedir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemeleri kendi içinde değerlendirildiğinde ise sabit kanatçık sayısı için, kritik sıcaklığın konum açısının belirli bir değerine kadar ($0 < \theta < 60^\circ$) önemli düzeyde azaldığı, $\theta = 60^\circ$ 'de minimum değerine ulaştığı ve $\theta > 90^\circ$ için ise yön değiştirerek artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Sabit konum açısı için ise, kritik sıcaklıkların kanatçık sayısının artışı ile daha düşük değerlere ulaşmaktadır. İlgili davranışlar bir önceki bölümde de ifade edildiği üzere kanatçık sayısı ve konum açısına bağlı olarak farklı gelişimler gösteren doğal taşınım hücrelerinin katı/sıvı faz dönüşümü ve ısı geçişi üzerindeki belirleyici rolü ile açıklanabilir.

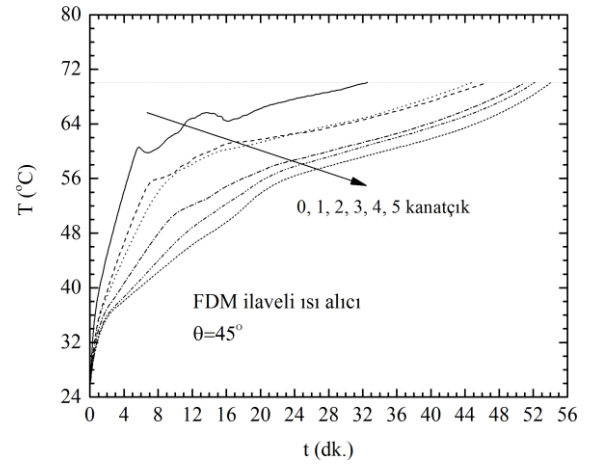


Şekil 3.48. Farklı konum açıları için kanatçık sayısının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi: FDM-ilavesiz ısı alıcı (a, c, e, g, i, j ve l), FDM-ilaveli ısı alıcı (b, d, f, h, i, k ve m)

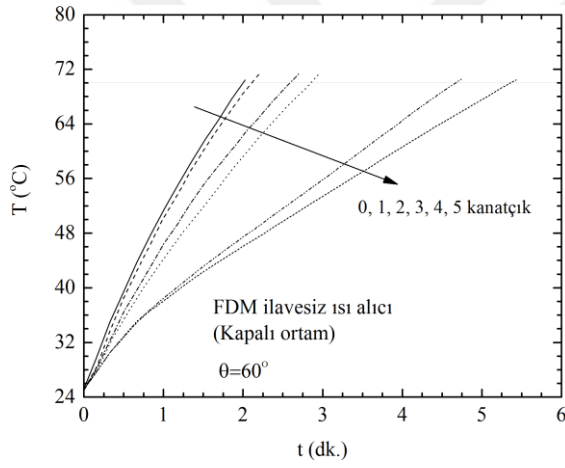
Şekil 3.48'in devamı



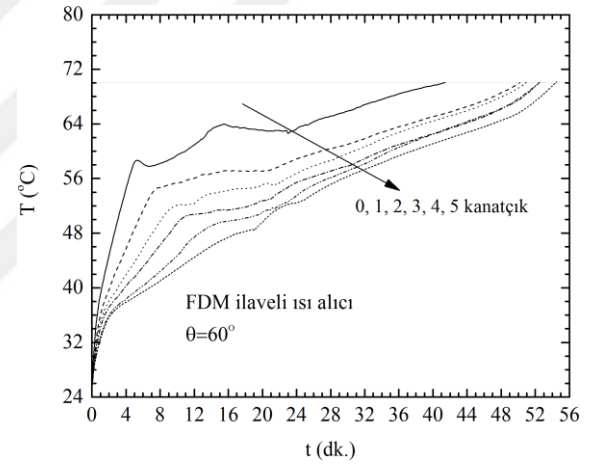
(g)



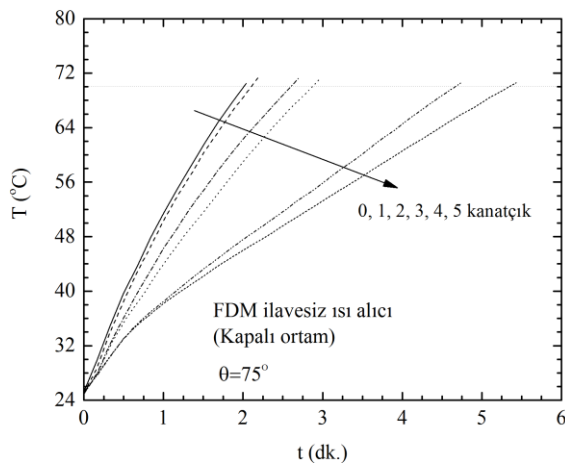
(h)



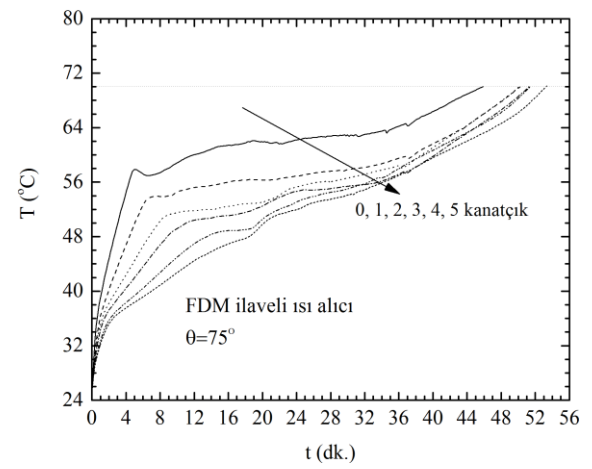
(ı)



(i)

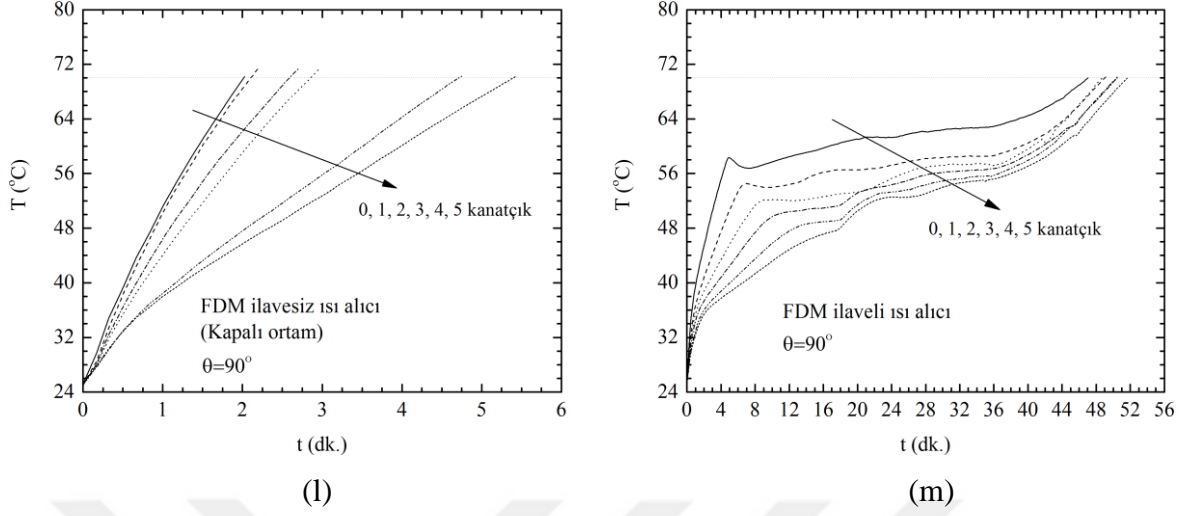


(j)



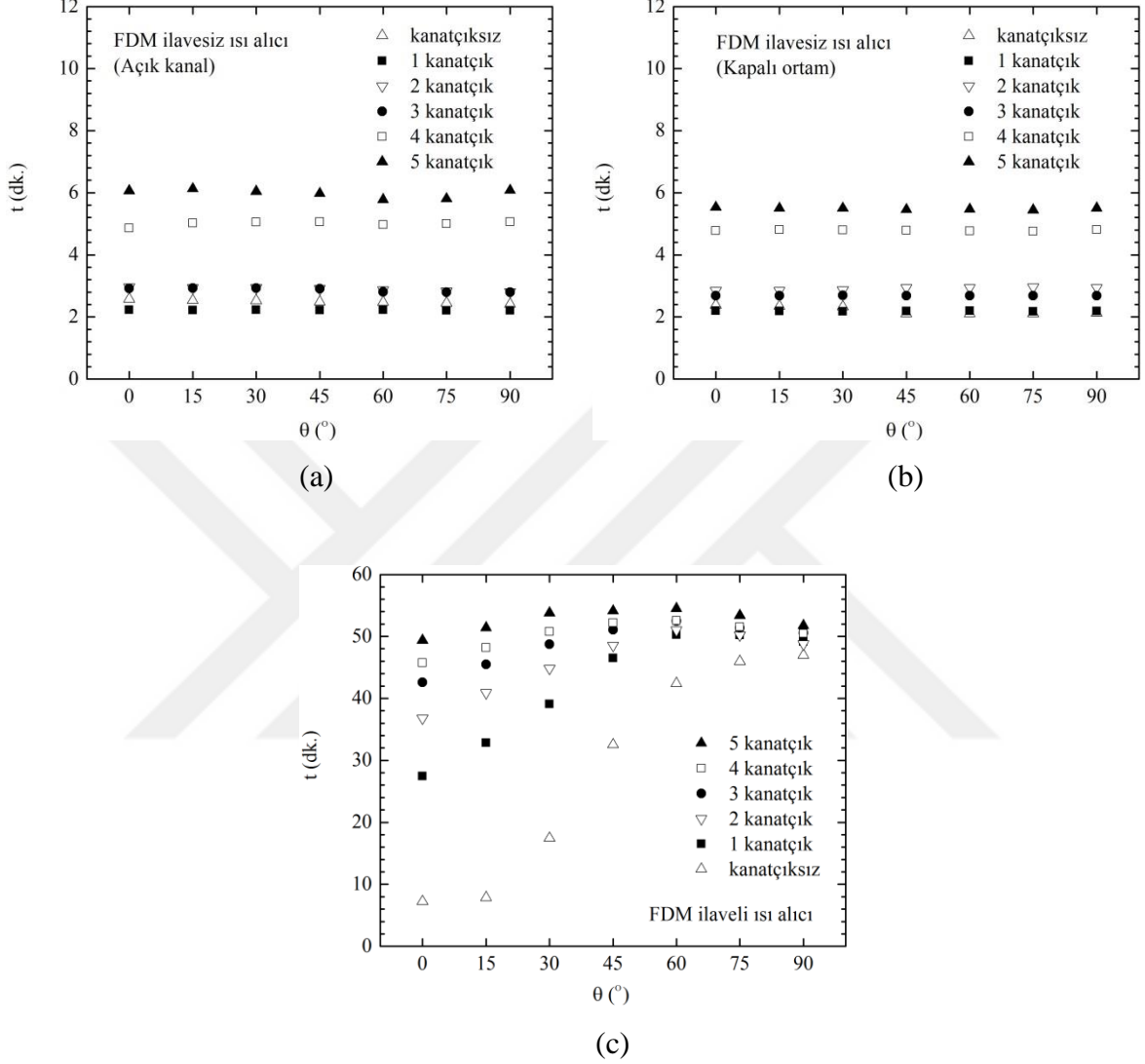
(k)

Şekil 3.48'in devamı



FDM-ilavesiz ve FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerine ait açısal zaman - konum grafiği Şekil 3.49'da verilmiştir. İlgili grafikte, FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemelerine (açık kanal ve kapalı ortam) ait güvenilir çalışma sürelerinin açısal konumdan bağımsız bir davranış sergilediği ve sürenin kanatçiksiz duruma kıyasla iki kat düzeyine kadar ($n = 5$) iyileştirildiği görülmektedir. Burada, ulaşılan maksimum sürenin uygulama açısından yetersiz olduğu not edilmelidir. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ait açısal konum güvenilir çalışma süresi ilişkisi Şekil 3.49 c'de verilmektedir. Grafik, incelendiğinde, kanatçık ilaveli durum için güvenilir çalışma sürelerinin konum açısının artışıyla $0 - 60^\circ$ aralığında önemli düzeyde arttığı, $\theta = 60^\circ$ 'de maksimuma ulaştığı ve $\theta > 60^\circ$ 'dan sonra ise sınırlı düzeyde azaldığı (kötüleştigi) görülmektedir. Kanatçık sayısındaki artışın ise, genel karakter olarak, daha uzun çalışma sürelerine olanak sunduğu; fakat etki düzeyinin $\theta = 60^\circ$ 'den sonra önemli düzeyde kısıtlandığı, Şekil 3.49 c'de görülmektedir. Bu davranış, sırasıyla $\theta = 60^\circ$ 'de bütünlük forma sahip olan doğal taşınım hücresinin ve $\theta > 60^\circ$ 'dan sonra parçalanarak etki mertebesi daha düşük forma geçmesi (birden fazla hücreye bölünmesi) ve belirli bir kanatçık ilavesinden sonra ($n \geq 3$) baskın hale geçen ek akış direnci ile açıklanabilir. Nicel olarak, açısal konumun (θ) 0° , 45° ve 90° ve kanatçık sayısının (n) 1, 3 ve 5 değerleri için çalışma süresinde ulaşılan artışlar kanatsız duruma kıyasla, sırasıyla, $\theta = 0^\circ$ için % 280, % 492 ve % 586, $\theta = 45^\circ$ için % 44, % 57 ve % 66; $\theta = 90^\circ$ için % 5, % 8 ve % 10 düzeylerine ulaşmaktadır. Yüksek konum açısı değerlerinde ise ($\theta = 60^\circ-90^\circ$), farklı kanat sayı düzenlemeleri ($n = 1 - 5$) için % 2 - 5 oranında bir kötüleşme söz konusudur. İlgili artış ve azalış düzeyleri dikkate alındığında, kanatçık

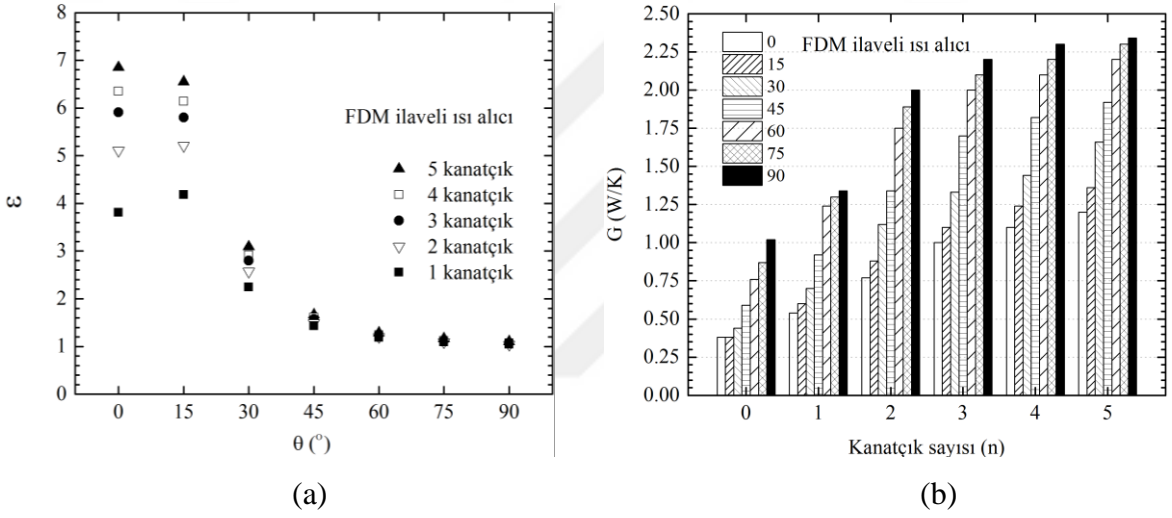
ilavesinin düşey konumlandırılmış ısı alıcı performansı üzerinden hayati bir öneme sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 3.49. Açısal konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi: FDM-ilavesiz ısı alıcı, Açık Kanal (a), FDM-ilavesiz ısı alıcı, Kapalı Ortam (b), FDM-ilaveli ısı alıcı (c)

Kanatçık sayısı ve konum açısı değişiminin birleşik etkisi iyileşme oranı üzerinden Şekil 3.50 a'da görülmektedir. Burada, iyileşme oranı tanımına ait referans değerlerin aynı konum açısına ait kanatçıksız durum temsil ettiği not edilmelidir. İlgili değişimler incelendiğinde, yüksek konum açısı değerlerinde ($\theta > 45^\circ$) kanatçık sayısının termal performans üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir bir mertebeye ulaştığı ($< \% 2$) görülmektedir. Isı alıcı düzenlemelerine ait ısıl iletkenlik (G) değerleri, Şekil 3.50 b'de

sunulmuştur. İyileşme oranına benzer şekilde, ısı iletkenliğin, $\theta = 60^\circ$ 'ye kadar belirgin bir şekilde arttığı; $\theta = 60^\circ$ 'den sonra ise artış hızının önemli düzeyde sönümlendiği görülmektedir. Kanatçık sayısı referans alındığında ise $n = 3, 4$ ve 5 değerleri için ısı iletkenliğin birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Nicel olarak, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ için $n = 3$ ve 5 'e ait ısı iletkenlik değerleri, sırasıyla, 1 ve 2 ; $1,2$ ve $2,2$ düzeyindedir. Bu davranış, ısı performans açısından konum açısı ve kanatçık sayısı arasındaki güçlü bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır. Farklı konum açısı ve kanatçık sayıları için ulaşılan sonuçlar ısı performans, maliyet ve ağırlık açısından en iyi çözümü $\theta = 60^\circ$ ve $n = 3$ 'e sahip ısı alıcı geometrisinin sunduğunu net olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 3.50. Artan kanatçık sayısı değerleri için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b)

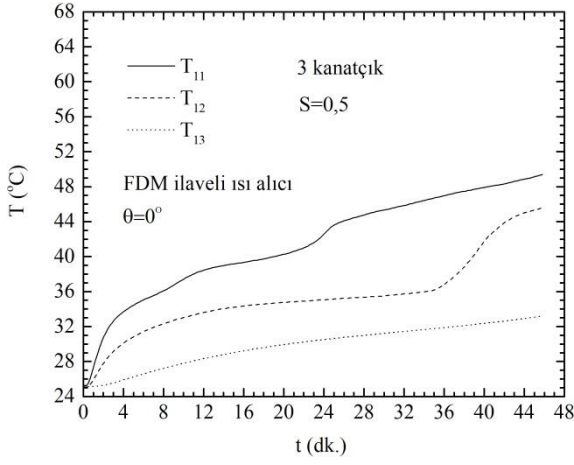
3.3. Değişken Kesitli Levha tip Kanatçıklara Sahip Isı Alıcı Düzenlemesi-Kanatçık Genişlik Oranı Etkisi ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0)

Bu bölümde, düşey olarak konumlandırılmış FDM-ilaveli bir ısı alıcının ($n = 3$) farklı kanatçık genişlik oranları ($S = 1, 0,5, 0,2, 0$) altındaki termal davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Kanatçık sayısı ve geometrisi seçiminde, bir önceki bölümde ulaşılan çalışma süreleri ve katı/sıvı arayüz formları referans olarak dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda kanatçık sayısı 3 olarak tanımlanmış ve kanatçık geometrisinde aşağı yönlü genişleyen bir form tercih edilmiştir (Şekil 2.4 b). Önerilen kanatçık geometrisi ile ısı geçişinde baskın rol üstlenen doğal taşınım hücrelerinin faz dönüşümüne katılmayan bölgelere genişletilmesi ve güvenilir çalışma sürelerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

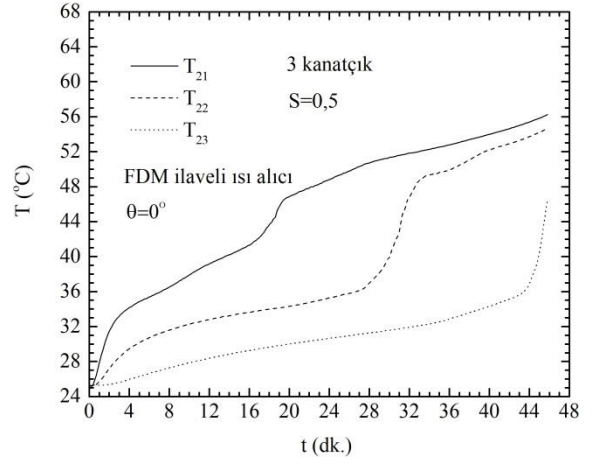
Burada, farklı genişlik oranlarına sahip kanatçık geometrilerinin ısı transfer yüzey alanının aynı olduğu vurgulanmalıdır.

3.3.1. İç Ortam Sıcaklıkları Yerel Değişimi

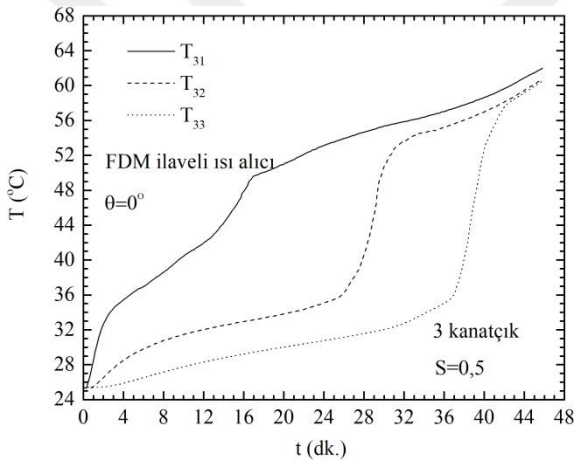
Farklı kanatçık genişlik oranları için iç ortama ait yerel sıcaklık değişimleri, Şekil 3.51 – 3.56’de verilmiştir. İlgili grafikler incelendiğinde, genel karakter olarak, üst yerel nokta sıcaklıklarının (T_{3a} ve T_{4a}) sıcaklıklarının kanatçık geometrisinden bağımsız bir davranış sergilediği (Şekil 3.51c-d, 3.53c-d ve 3.55c-d); buna karşın, azalan kanatçık genişlik oranları ile alt yerel nokta sıcaklıklarının (T_{1a} ve T_{2a}) daha yüksek değerler aldığı görülmektedir (Şekil 3.51 a-b, 3.53 a-b ve 3.55 a-b). Örnek olarak, $t = 40$ dk. için, $S=1$, 0,5, 0,2 ve 0 için T_{2a} yerel noktalarına ait sıcaklık değerleri, sırasıyla, 53,9 °C, 52 °C, 33 °C; 54 °C, 52,2 °C, 34 °C; 52,9 °C, 51,8 °C, 36 °C; 53 °C, 52,4 °C, 49 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.33 b, 3.52 b, 3.54 b ve 3.56 b). Burada, ısı transfer yüzeyinin aşağıya doğru genişlemesiyle dış cidara yakın olan yerel nokta sıcaklıklarının hızlı bir şekilde arttığı ve daha uniform bir sıcaklık dağılımına ulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Aynı zaman adımında, T_{a2} yerel noktalarına (2 nolu sıcaklık hattı) ait sıcaklık değerleri ise $S=1$, 0,5, 0,2 ve 0 için, sırasıyla, 34 °C, 52 °C, 58 °C, 63 °C; 41,7 °C, 52,2 °C, 57 °C, 61,7 °C; 46 °C, 51,8 °C, 55,5 °C, 60,3 °C; 46,1 °C, 52,4 °C, 55,3 °C, 59,8 °C olarak ölçülmüştür (Şekil 3.34 b, 3.52 b, 3.54 b ve 3.56 b). İlgili değerler üzerinden azalan kanatçık genişlik oranı ile üst yerel nokta sıcaklıklarının bir miktar azaldığı, alt yerel nokta sıcaklığının (T_{12}) $S = 1$ durumuna kıyasla $S = 0$ durumunda 12 °C seviyesinde bir artış sergilediği görülmektedir. Bu değişim, azalan kanatçık genişlik oranı ile FDM içerisinde daha uniform bir sıcaklık dağılımına geçildiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Örnek olarak, $S = 1$ ve $S = 0$ için alt ve üst yerel nokta sıcaklık farkları ($T_{42} - T_{12}$), sırasıyla, 29 °C ve 14 °C değerlerini almaktadır. Bu davranış, kapalı hacmin alt bölgesinde zayıf olan iletim mekanizmasının artan ısı transfer yüzey alanıyla iyileşmesi ve üst yarı bölgede etkin olan taşınım hücrelerinin ilgili alanı kapsayacak formda aşağı yönlü genişlemesiyle açıklanabilir.



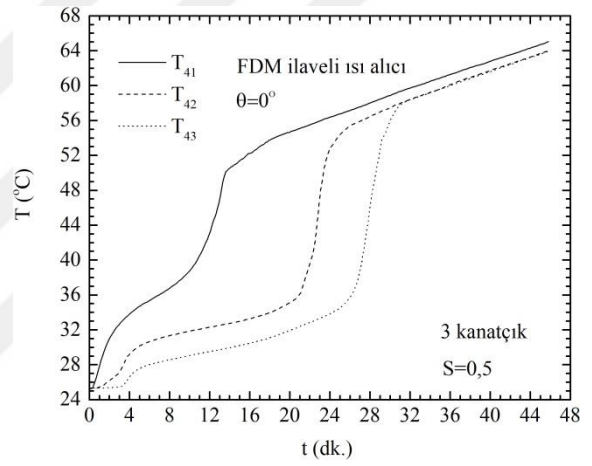
(a)



(b)

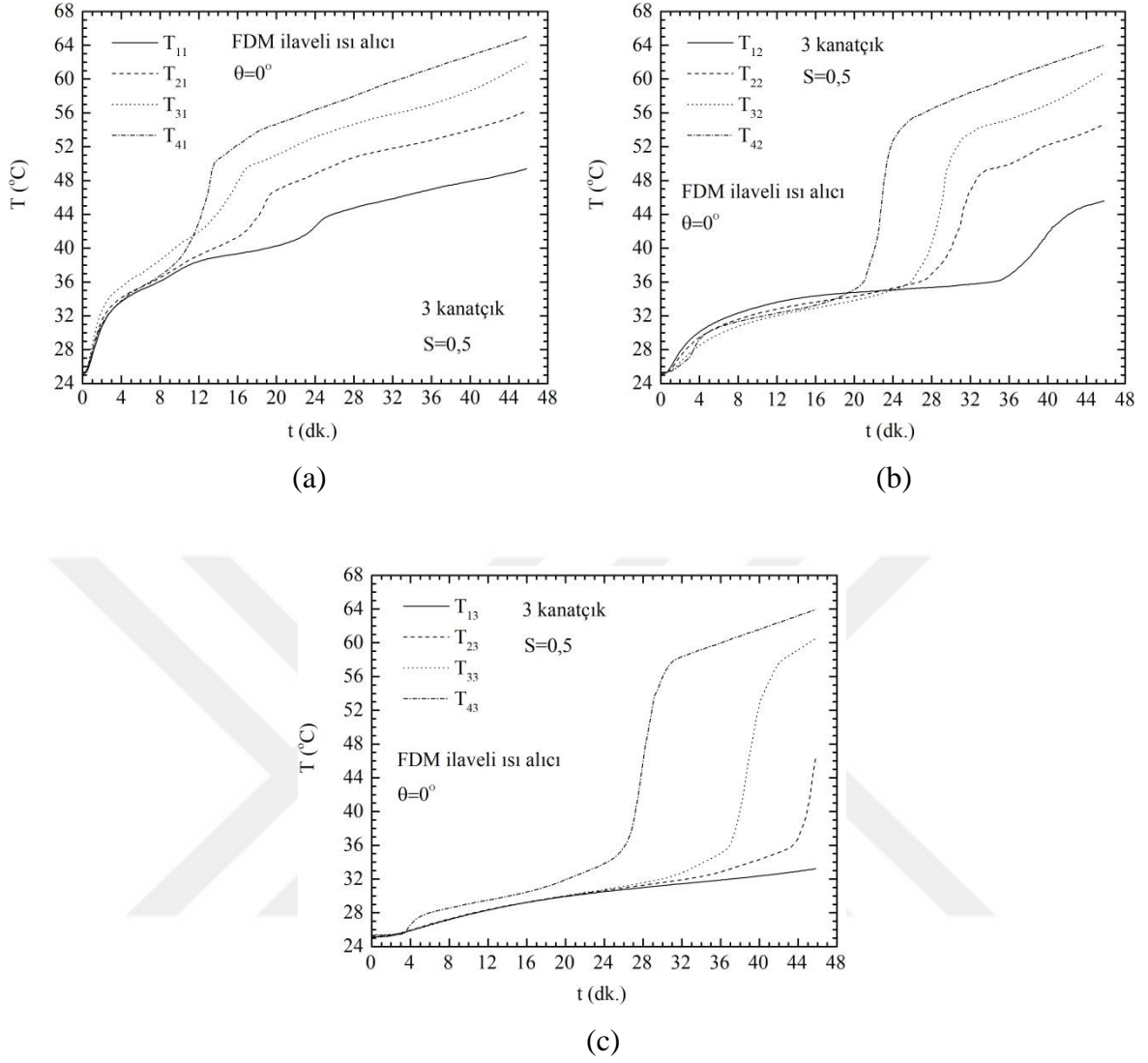


(c)

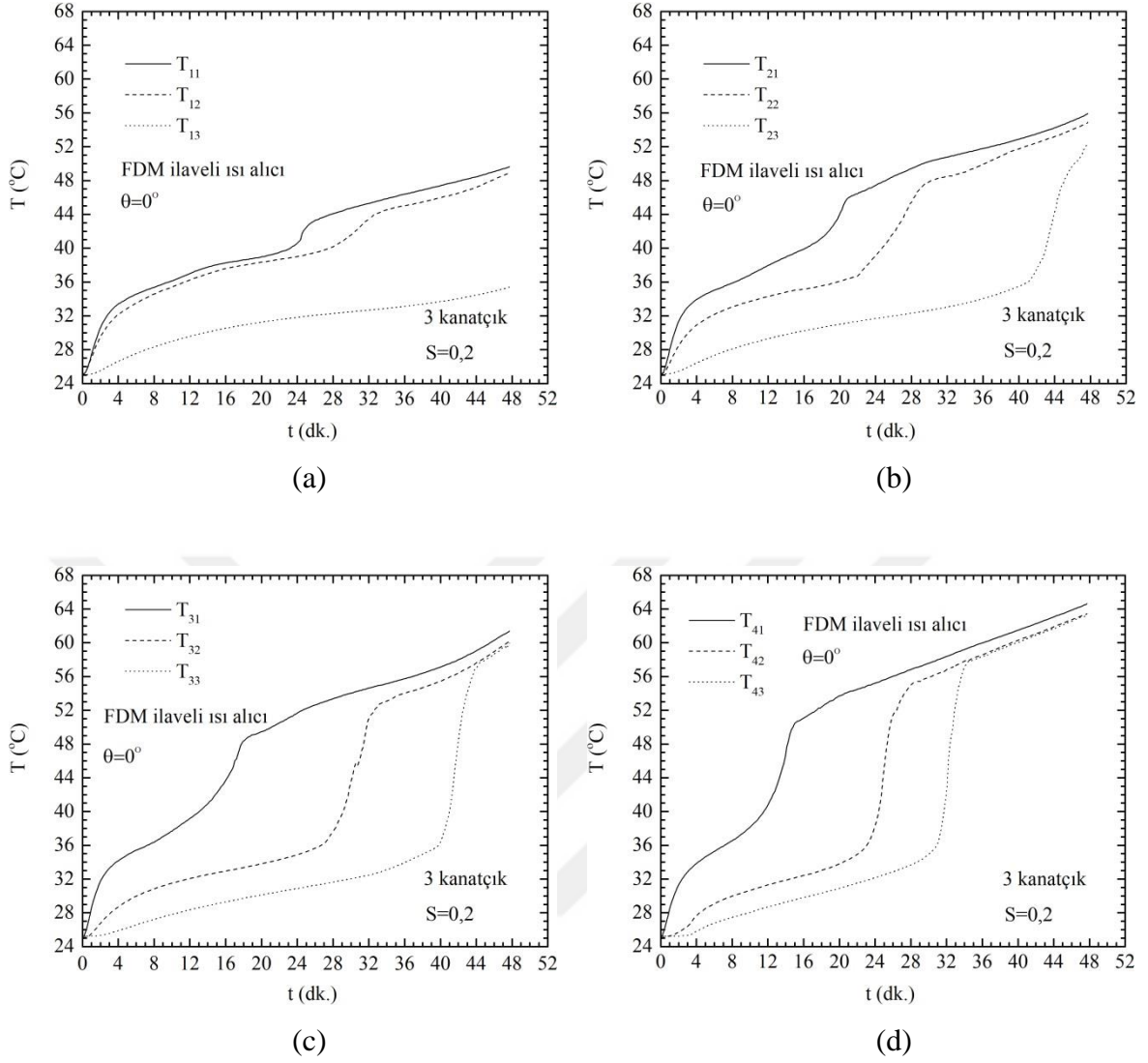


(d)

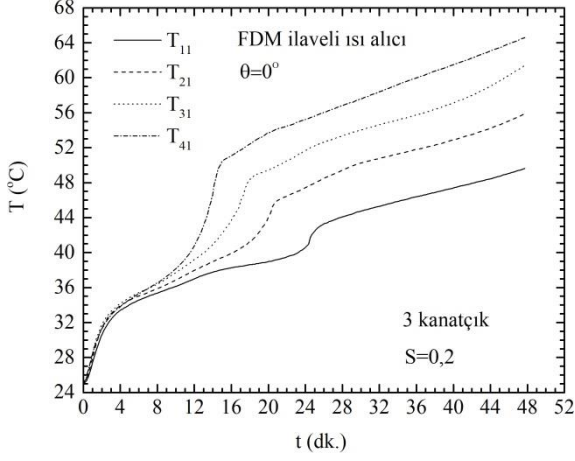
Şekil 3.51. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d)



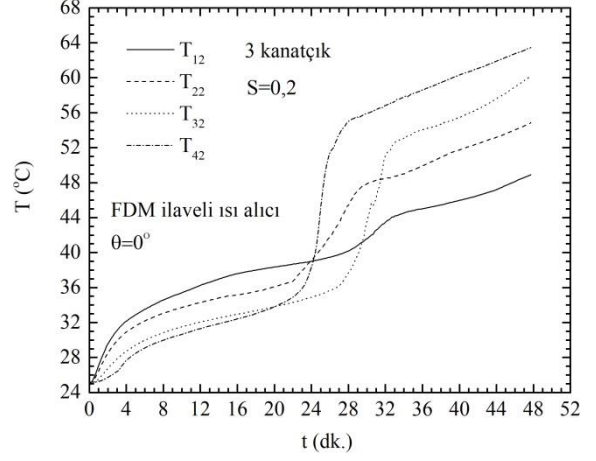
Şekil 3.52. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,5$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



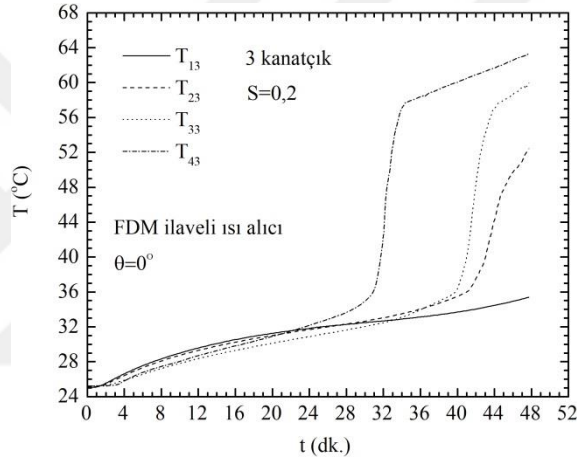
Şekil 3.53. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,2$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d), T_{5a} (e)



(a)

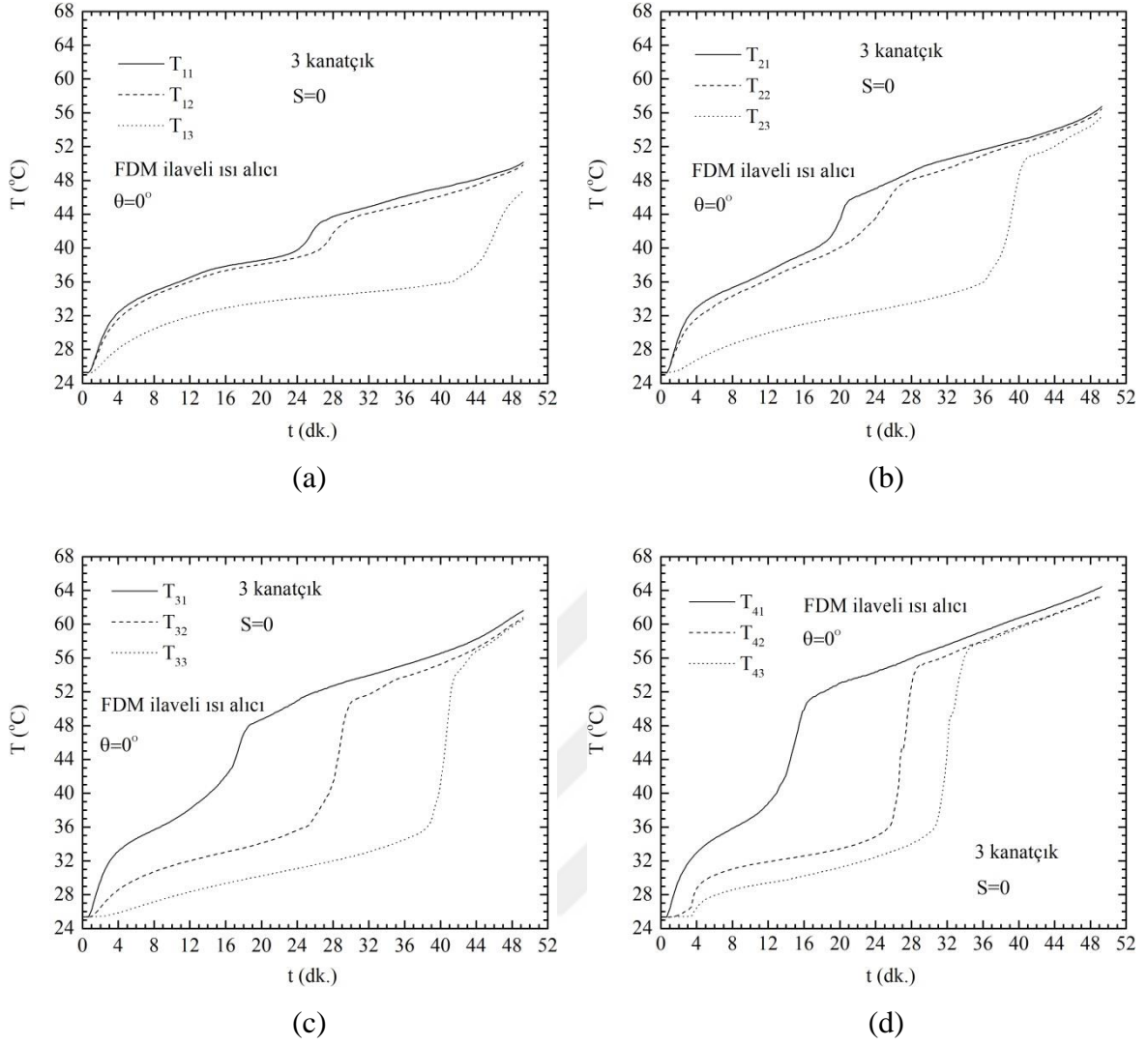


(b)

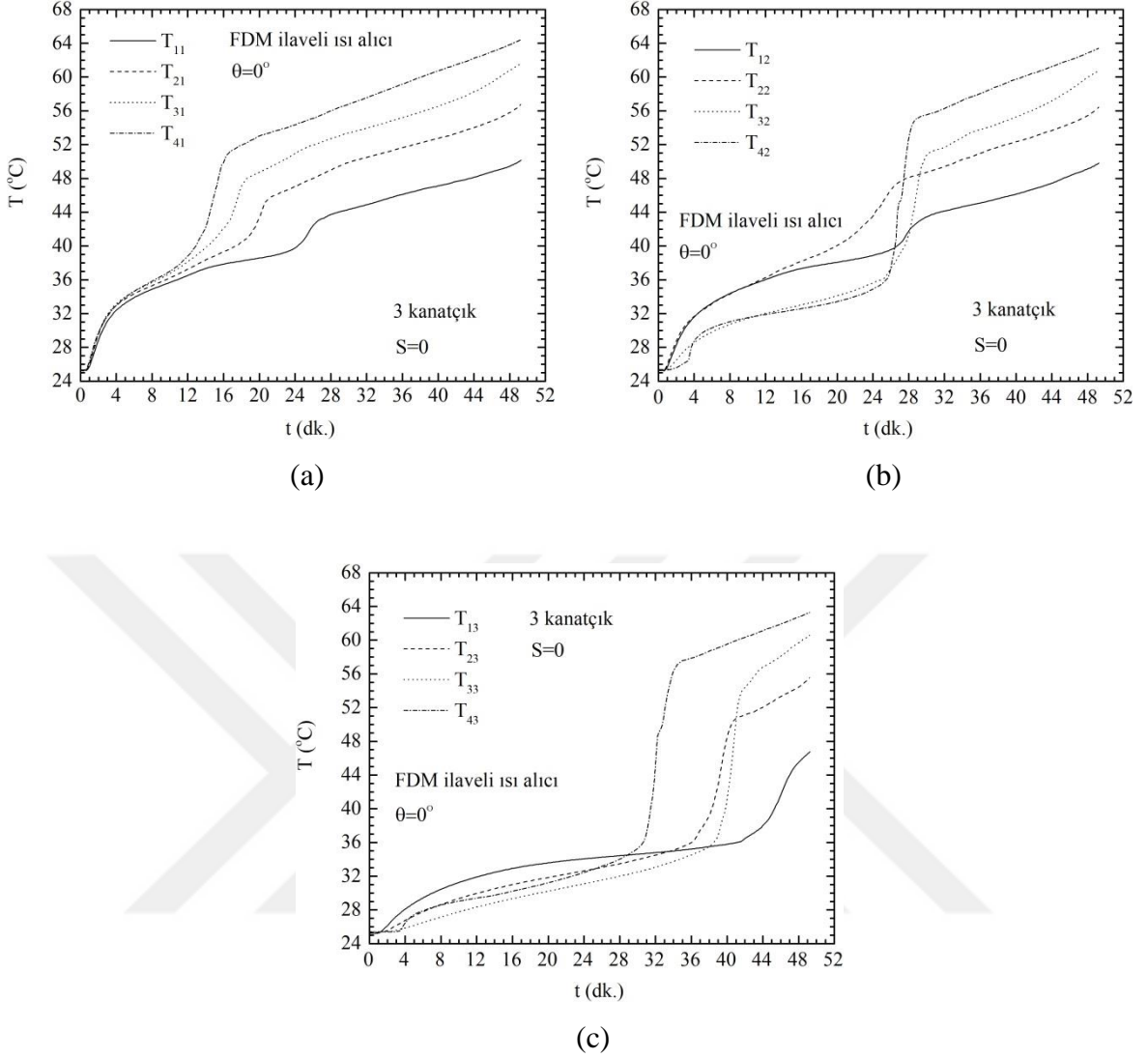


(c)

Şekil 3.54. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0,2$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).



Şekil 3.55. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (yatay doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{1a} (a), T_{2a} (b), T_{3a} (c), T_{4a} (d).

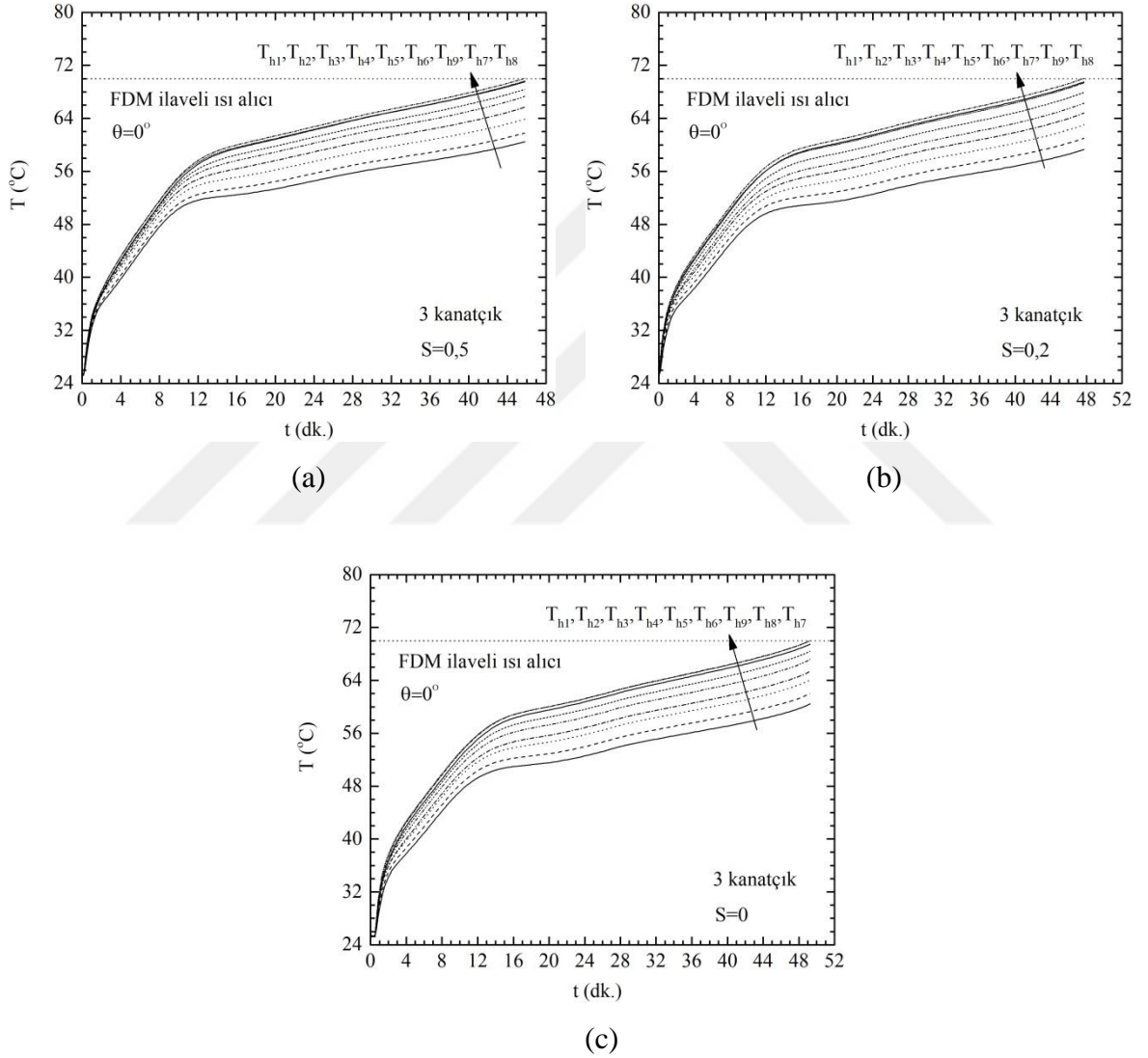


Şekil 3.56. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesine ($n=3$, $S=0$) ait iç ortam sıcaklıklarının yerel değişimi (düşey doğrultu), $\theta=0^\circ$: T_{a1} (a), T_{a2} (b), T_{a3} (c).

3.3.2. Isıtıcı Yüzey Sıcaklıkları Yerel Değişimi

Isıtıcı yüzey sıcaklığının kanatçık genişlik oranına bağlı yerel değişimi Şekil 3.57'de sunulmuştur. Üç farklı genişlik oranı değeri ($S = 0,5, 0,2$ ve 0) için yerel sıcaklık değişimlerinin, genel karakter olarak, benzer bir değişim sergilediği Şekil 3.58 a, b ve c'de görülmektedir. Azalan kanatçık genişlik oranıyla sıcaklık artış hızlarının azaldığı ve limit çalışma sıcaklığına ulaşma sürelerinin arttığı görülmektedir. Örnek olarak, $t = 40$ dk. zaman adımıında $S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0 için kritik yerel nokta sıcaklıkları, sırasıyla, 70°C (Şekil 3.37 b), $68,7^\circ\text{C}$, 68°C , 67°C olarak ölçülmüştür. Bu dağılım, azalan kanatçık genişlik oranıyla ısı geçişinin hızlandığını ve kapalı hacim içerisinde daha etkin bir

katı/sıvı faz dönüşümünün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, termal gerilme açısından, azalan kanatçık genişlik oranıyla maksimum yerel sıcaklık farklarının $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ mertebesine çekildiği not edilmelidir. Bu değerin, $S = 1$ durumu için $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ seviyesinde olduğu hatırlanmalıdır. Grafiklerde göze çarpan diğer önemli bir husus ise, azalan kanatçık genişlik oranıyla kritik yerel noktanın aşağı yönlü yer değişimidir ($T_{h8} - T_{h7}$). Bu davranış, kapalı hacmin alt yarı bölgesindeki hızlı faz dönüşümü ile açıklanabilir.

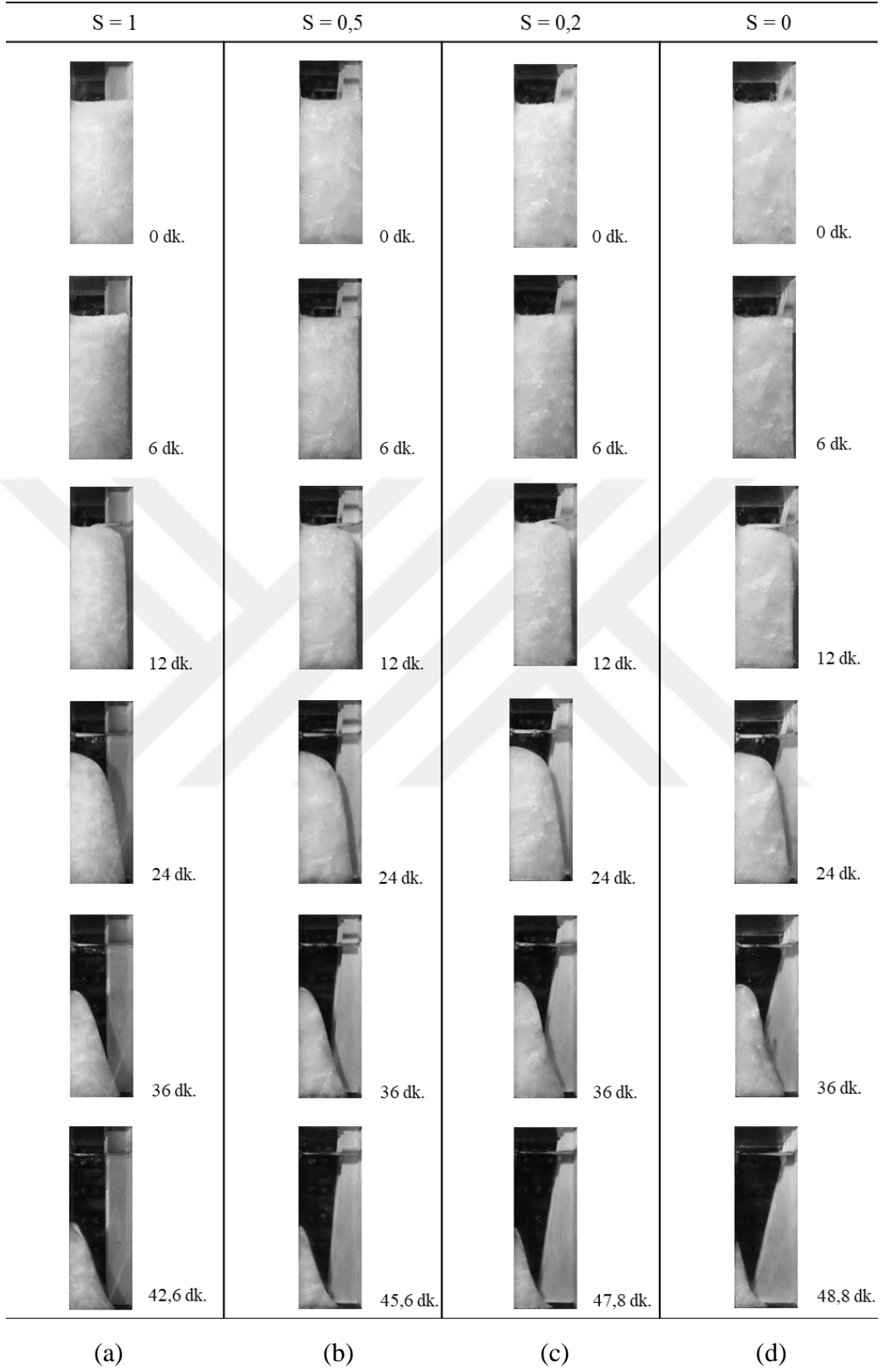


Şekil 3.57. Farklı kanatçık genişlik oranları için ısıtıcı yüzey üzerindeki sıcaklık dağılımı, $\theta=0^{\circ}$: $S=0,5$ (a), $S=0,2$ (b), $S=0$ (c)

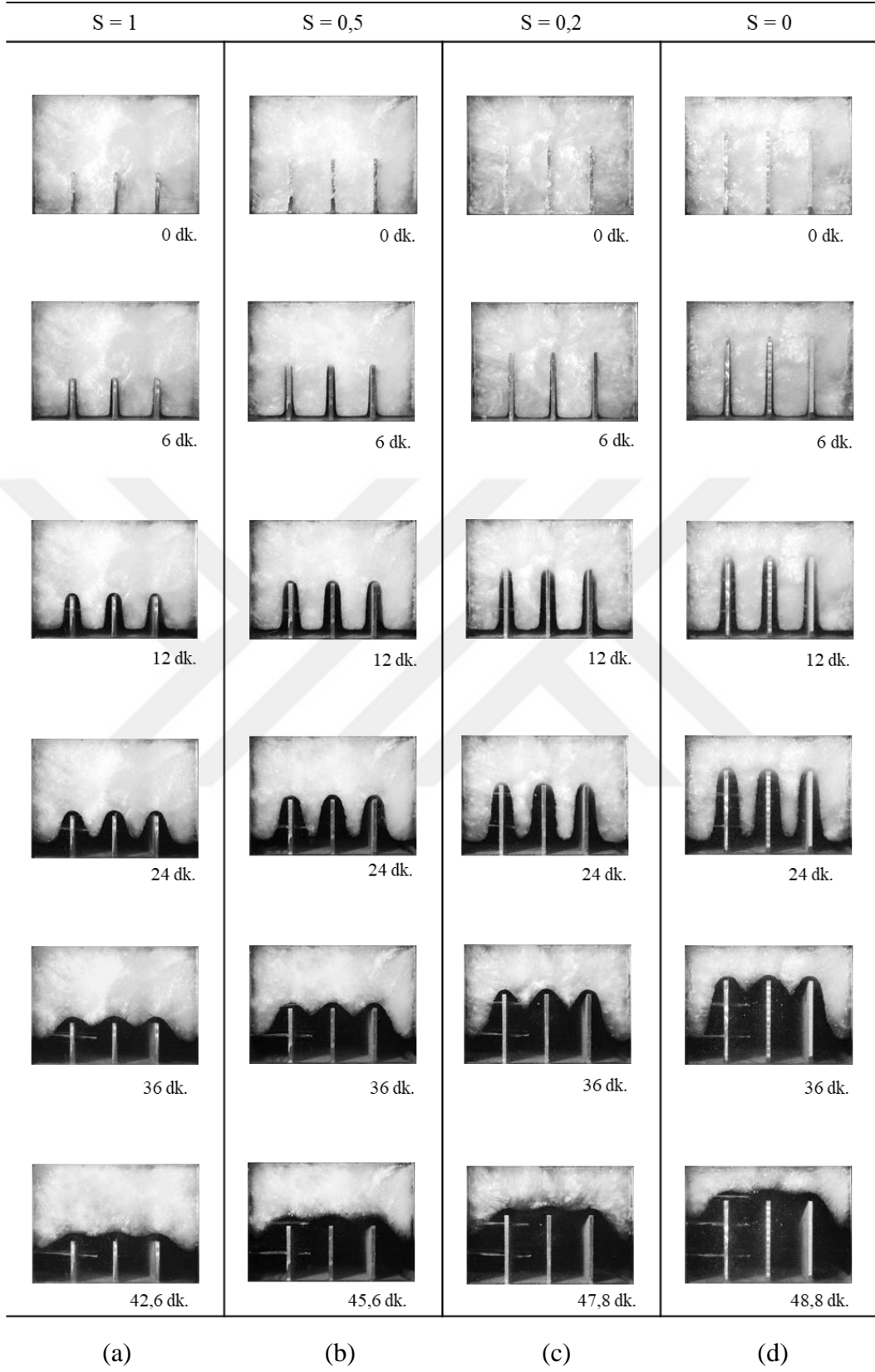
3.3.3. Erime Arayüzey Gelişimi

Farklı kanatçık genişlik oranlarına ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0) ait katı/sıvı arayüzey gelişimi yanal ve alt yüzey görüntüleri üzerinden, sırasıyla Şekil 3.58 ve Şekil 3.59'da sunulmuştur. Isı geçiş sürecinin ilk periyodunda ($t < 12$ dk.), tüm kanatçık düzenlemelerinin üniform katı/sıvı ilerleme hızı formunda ortak bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu davranış, önceki bölümlerde de belirtildiği üzere iletim mekanizmasının ısı geçişi üzerindeki baskın rolü ile ilişkilidir. Sıvı FDM'nin yeterli kalınlığa ulaşmasıyla taşınım mekanizması rolü kısmen üstlenmekte ve baskın olduğu bölgelerde (üst yarı bölge) yüksek arayüz ilerleme hızlarının gerçekleşmesine katkı sunmaktadır. Isı geçiş sürecinin devamında, $t = 24$ dk.'ya ait yanal görüntüler incelendiğinde, kanatçık genişlik oranının katı/sıvı arayüz ilerleme hızları üzerinde önemli değişimlere neden olduğu görülmektedir. Bu değişim, azalan kanatçık genişlik oranıyla üst yarı - bölgede ilerleme hızının azalması, alt yarı - bölgede ise artışı şeklindedir. Diğer bir ifadeyle, ısı transfer yüzey alanının aşağı yönlü genişlemesiyle doğal taşınım mekanizmasının etki alanı alt yarı - bölgeye doğru kaymaktadır. Bu davranış $t = 36$ dk.'ya ait görüntülerde daha net bir karaktere bürünmektedir. İlgili görüntülerde, azalan genişlik oranları ile erime arayüzeyinin orta kısmında içe eğimli bir yapının oluştuğu ve üst kısmında ise dışa eğimin arttığı görülmektedir. Isı geçiş sürecinin son periyodunda ise $S = 0$ için FDM'nin büyük oranda katı/sıvı faz dönüşümünü tamamladığı ve gizli ısı depolama sürecine maksimum katkıyı sunduğu ifade edilmelidir.

Alt yüzey üzerinden elde edilen katı/sıvı ara yüzey görüntüleri Şekil 3.59'da verilmiştir. Burada, azalan genişlik oranı değerleri ile katı/sıvı erime arayüzey ilerleme hızlarının daha yüksek değerler aldığı net olarak görülmektedir. Bu davranış, aşağı yönlü genişleyen ısı transfer yüzey alanının iletim mekanizmasına sunduğu katkıyla açıklanabilir.



Şekil 3.58. Erime ara yüzey ilerlemesi, yanal yüzey: S=1 (a), S=0,5 (b), S=0,2 (c), S=0 (d)

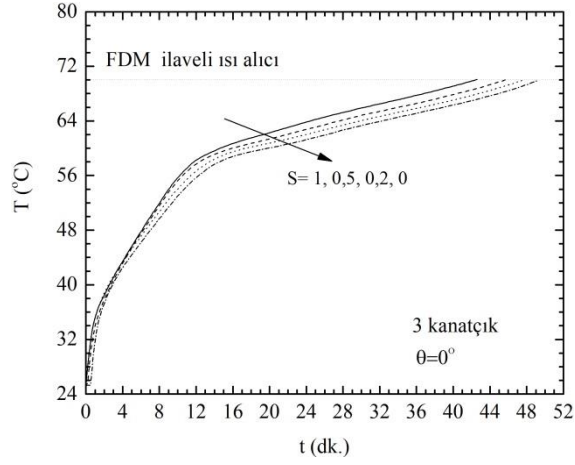


Şekil 3.59. Erime ara yüzey ilerlemesi, alt yüzey: S=1 (a), S=0,5 (b), S=0,2 (c), S=0 (d)

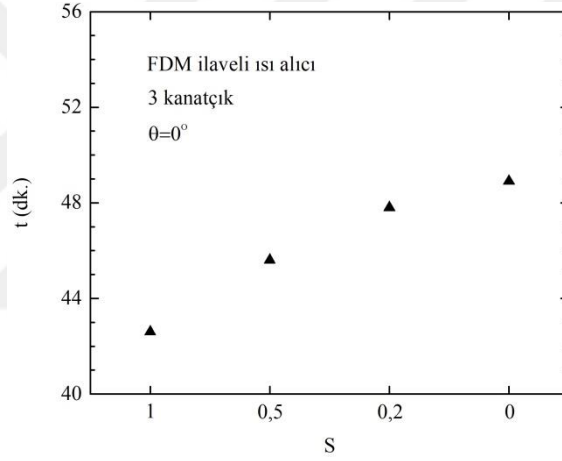
3.3.4. Isı Alıcı Termal Performansı ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0)

Değişken kesitli kanatçık geometrisine sahip ısı alıcı düzenlemelerinin termal performans değerlendirilmesi Şekil 3.60 - 3.62'de sunulmuştur. Azalan kanatçık genişlik oranları için kritik yerel nokta sıcaklık artış hızlarının daha düşük değerler aldığı Şekil 3.60'da görülmektedir. Bu durum, daha önce ifade edildiği üzere azalan kanatçık genişlik oranıyla doğal taşınımın alt yarı – bölgeye yönlendirilmesi ve bunun bir sonucu olarak ulaşılan etkin katı/sıvı faz dönüşümü ile açıklanabilir. Kanatçık genişlik oranına bağlı olarak limit sıcaklığa ulaşma süreleri Şekil 3.61'de verilmiştir. Isıtıcı yüzey üzerindeki kritik sıcaklıklara bağlı olarak azalan kanatçık genişlik oranları ($S = 1, 0,5, 0,2$ ve 0) için güvenilir çalışma sürelerinin arttığı görülmektedir. Kanatçık genişlik oranının en düşük olduğu durumda ($S = 0$) çalışma sürelerinin sabit kesitli kanatçık geometrisine ($S = 1$) kıyasla % 15 oranında iyileştirildiği ($\epsilon = 1,15$, Şekil 3.62a) vurgulanmalıdır. İç ortama transfer edilen ısı miktarının bir karşılığı olan ısıl iletkenlik değerlerinde % 38 oranında bir artış sağlandığı Şekil 3.62 b'de görülmektedir.

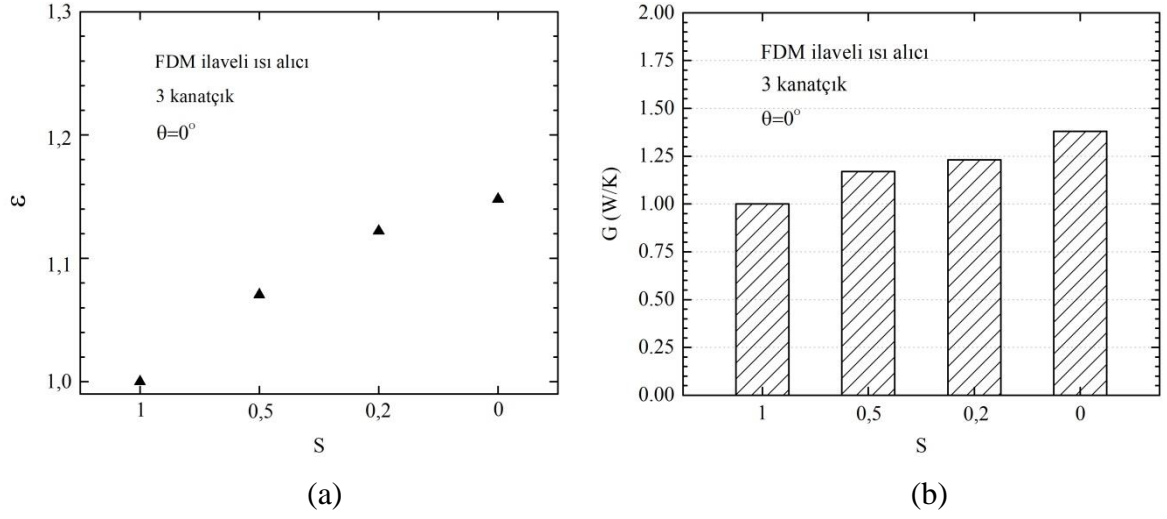
Burada, ısı transfer yüzey alanını değiştirmeksizin kanatçık geometrisinde yapılan geometrik bir düzenleme ile ısı alıcı termal performans düzeylerinde önemli artışlara ulaşıldığı vurgulanmalıdır. Ayrıca, kanatçık sayısı ve genişlik oranının sırasıyla $n = 3$ ve $S = 0$ ve $n = 3$ ve $S = 1$ değerleri için aynı güvenilir çalışma sürelerine ulaşıldığı dikkate alınırsa, önerilen kanatçık geometrisinin benzer ısı alıcı geometrileri için daha az kanatçık kullanımına imkan sunacağı açıktır. Bu durum, hacim, ağırlık ve maliyet gibi diğer ısı alıcı tasarım parametreleriyle birlikte ele alındığında havacılık-uzay, savunma sanayi, taşınabilir elektronikler vb. uygulama alanlarına önemli kazanımlar sağlayacaktır.



Şekil 3.60. Farklı kanatçık genişlik oranlarının ısıtıcı kritik yerel nokta sıcaklık profili üzerindeki etkisi



Şekil 3.61. Farklı kanatçık genişlik oranları için açısız konumun güvenilir çalışma süreleri üzerindeki etkisi



Şekil 3.62. Farklı kanatçık genişlik oranları için iyileşme oranları (a) ve ısı iletkenlik değerleri (b)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli levha form kanatçıklara sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal performansı farklı konum açıları ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ve 90°), kanatçık sayısı ($n = 0, 1, 2, 3, 4$ ve 5) ve kanatçık geometrileri (sabit ve aşağı yönlü genişleyen kesitli) için deneysel olarak incelenmiştir. Isı alıcı ve kanatçık boyutları gerçek uygulamalara bağlı kalınarak, sırasıyla, $48 \times 38 \times 100$ mm (genişlik x en x boy) ve $1,2 \times 12 \times 100$ (kalınlık x en x boy) olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar, sabit ısı yükü altında yürütülmüş ve limit sıcaklığın 70°C ulaşması ile sonlandırılmıştır. Performans karşılaştırmalarına referans teşkil etmesi amacıyla, tüm deneyler FDM-ilavesiz durum için tekrarlanmıştır. Deneylerde ana büyüklük olarak, ısıtıcı ve ısı depolayıcı ortama ait zaman bağımlı yerel sıcaklıklar ölçülmüş ve katı/sıvı arayüz ilerlemesi fotoğraflanmıştır. İncelenen tüm geometrik düzenlemelere ait performans düzeyleri; güvenilir çalışma süresi, iyileşme oranı ve ısı iletkenlik üzerinden sunulmuştur. Çalışmaya ait ana bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesi için,

- Isıtıcı yüzey sıcaklıkları açısal konumdan bağımsız bir davranış sergilemektedir.
- Kanatçık sayısının artışı güvenilir çalışma süresini önemli düzeyde iyileştirmektedir. Buna karşın ulaşılan maksimum süreler ($n = 5$ için $t = 6$ dk.) uygulama açısından kabul edilebilir nitelikte değildir.
- Isı geçiş süreçlerinin tüm periyotlarını taşınım mekanizması yönetmektedir.
- Isıtıcı komşuluğundaki ortamın kapalı veya açık (kanal) olmasının termal performans üzerinde hissedilir bir etkisi yoktur.

2. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemesi için ısı geçiş sürecinin ilk periyodunda iletim, sonraki periyotlarda ise taşınım mekanizması baskın rol oynamaktadır.

3. İletimle ısı geçişinin baskın olduğu periyotta, yerel yüzey sıcaklıkları üniform bir artış sergilemektedir. Benzer şekilde, katı/sıvı arayüz ilerleme hızı üniform bir karaktere sahiptir.

4. Isı geçişinin ilerleyen periyotlarında ($t > 12$ dk.), tüm ısı alıcı düzenlemeleri için, katı/sıvı arayüz ilerleme hızı doğal taşınım etkisiyle kapalı hacmin üst yarı -

bölgesinde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu davranış, katı/sıvı arayüzüne konveks bir form kazandırmaktadır.

5. FDM-ilavesiz ısı alıcı düzenlemesine kıyasla, FDM-ilaveli durumda daha düşük yerel ısıtıcı yüzey sıcaklıklarına ve daha yüksek iç ortam sıcaklıklarına ulaşılmaktadır. Bu davranış, FDM'nin sahip olduğu yüksek gizli ısı depolama kabiliyeti ile ilişkilidir.

6. FDM-ilaveli tüm ısı alıcı düzenlemeleri için kanatçık sayısının artışıyla yerel ısıtıcı yüzey sıcaklıkları önemli düşüşler sergilemektedir. Bu davranış, kanatçık sayısının (n) 3 değerine kadar yüksek bir azalış hızı göstermekte iken, $n > 3$ için ek akış direnciyle (kanatçıklar arası mesafenin azalmasıyla) artış hızı önemli düzeyde azalmaktadır.

7. FDM-ilaveli ısı alıcı düzenlemelerine ($n = 1 - 5$) ait ısıtıcı yüzey sıcaklıkları, konum açısının artışıyla $\theta = 0^\circ - 60^\circ$ aralığında hızlı bir şekilde azalmakta, $\theta = 60^\circ$ 'de minimum değerine ulaşmakta ve $\theta > 60^\circ$ 'den sonra bir miktar artış sergilemektedir.

8. Konum açısının artışıyla, tüm yerel istasyonlarda, katı/sıvı arayüz ilerleme hızı artmakta ve düşey konuma kıyasla ($\theta = 0^\circ$) daha büyük miktarda katı FDM faz dönüşümüne katılmaktadır.

9. Kanatçık genişlik oranının azalmasıyla, kapalı hacmin üst yarı – bölgesinde etkin olan doğal taşınım hücreleri alt-yarı bölgeye doğru genişlemektedir. Bu davranış, sabit kesitli kanatçık geometrisine kıyasla, ısı alıcı boyunca daha üniform katı/sıvı arayüz hızlarının oluşumuna katkı sunmaktadır.

10. Kanatçıksız ısı alıcı düzenlemesi için konum açısının artışıyla ($\theta = 0^\circ$ ve 90°) güvenilir çalışma süreleri % 553 düzeyinde uzamaktadır. Benzer şekilde, ısı iletkenlik değeri % 168 düzeyinde iyileşmektedir.

11. Düşey ısı alıcı konumu için ($\theta = 0^\circ$), kanatçık sayısının artışıyla ($n = 0$ ve 5) güvenilir çalışma süreleri % 586 düzeyinde uzamaktadır. Benzer şekilde, ısı iletkenlik değeri % 215 düzeyinde iyileşmektedir.

12. Sabit kesitli kanatçık düzenlemeleri için ($S = 1$), termal performans açısından optimum çözümü, kanatçık sayısının ve konum açısının, sırasıyla, 3 ve 60° değerleri sunmaktadır.

13. Kanatçık genişlik oranının azalmasıyla ($S = 0,5, 0,2$ ve 0) güvenilir çalışma süreleri ve ısı iletkenlik değeri sırasıyla % 15 ve % 38 düzeylerinde iyileşmektedir.

14. Kanatçık genişlik oranı ve kanatçık sayısının, sırasıyla, $S = 0$ ve $n = 3$ ve $S = 1$ ve $n = 5$ değerleri için aynı güvenilir çalışma sürelerine ulaşılmaktadır. Bu durumun, ağırlık, hacim ve maliyet gibi diğer tasarım parametreleri dikkate alındığında, önerilen özgün kanatçık geometrisine literatürde ve uygulamada önemli bir yer açacağı açıktır.



5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, sabit kesitli levha forma kanatçık profiline sahip FDM-ilaveli bir ısı alıcının termal davranışı farklı konum açısı, kanatçık sayısı ve kanatçık genişlik oranları için geniş bir parametre aralığında deneysel olarak incelenmiştir. Ulaşılan bulguların genelleştirilmesi ve çalışmalara yön vermesi açısından aşağıdaki önerilerin dikkate alınması faydalı olacaktır.

1. Akış görüntüleme teknikleri kullanılarak doğal taşınım hareketinin yapısı daha net olarak ortaya konulabilir.
2. Farklı ısı yüklemeler için (periyodik, atımlı, kısa süreli vb.) termal davranış incelenebilir.
3. Mevcut ısı alıcı düzenlemeleri için FDM içerisine nano partikül veya metal/grafit matris ilavesi yapılarak ısı transfer süreci incelenebilir.
4. Farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM'lerin termal performans üzerindeki etkileri incelenebilir.
5. Isı depolayıcı madde olarak farklı FDM türleri (parafin olmayan, inorganik vb.) test edilebilir.
6. Farklı en/boy oranlarına sahip ısı alıcı geometrileri incelenebilir.
7. Farklı kanatçık geometrileri (dairese/kare kesitli iğne form vb.) için deneysel çalışma tekrarlanabilir.
8. İncelenen problem sayısal olarak modellenebilir.

6. KAYNAKÇALAR

- Agostini, B., Fabbri, M., Park, J.E., Wojtan, L., Thome, J.R. ve Michel, B., 2007. State of the art of high heat flux cooling Technologies, Heat Transf Eng., 28, 258-281.
- Akeiber, H. , Nejat, P., Majid, M., Wahid, M.A., Jomehzadeh, F., Famileh, I.Z., Calautit, J.C., Hughes, B.R. ve Zaki, S.A., 2016. A Review On Phase Change Material (PCM) For Sustainable Passive Cooling in Building Envelopes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 1470–1497
- Akhilesh, R., Narasimhan, A. ve Balaji, C., 2005. Method to Improve Geometry for Heat Transfer Enhancement in PCM Composite Heat Sinks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 2759-2770.
- Alawadhi, E.S., ve Amon, C.H., 2003. PCM Thermal Control Unit for Portable Electronic Devices: Experimental and Numerical Studies, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 26, 16-124.
- Alayil, R. ve Balaji, C., 2015. Conjugate Heat Transfer in Latent Heat Thermal Storage System with Cross Plate Fins, Journal of Heat Transfer, 137, 102302-1–102302-9.
- Ali, H.M., Arshad, A., Jabbal, M. ve Verdin, P.G., 2018. Thermal Management of Electronics Devices with PCMs Filled Pin-Fin Heat Sinks: A Comparison, International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, 1199-1204.
- Ali, H.M., Ashraf, M.J., Giovannelli, A., Irfan, M., Irshad, T.B., Hamid, H.M., Hassan, F. ve Arshad, A., 2018. Thermal Management of Electronics: An Experimental Analysis of Triangular, Rectangular and Circular Pin-Fin Heat Sinks for Various PCMs, International Journal of Heat and Mass Transfer, 123, 272-284.
- Anandan, S.S. ve Ramalingam, V. 2008. Thermal Management of Electronics: A review of literature, Thermal Science, 12-2, 5-26.
- Arshad, A., Ali, H.M., Ali, M. ve Manzoor, S., 2017. Thermal Performance of Phase Change Material (PCM) Based Pin-Finned Heat Sinks for Electronics Devices: Effect of Pin Thickness and PCM Volume Fraction, Applied Thermal Engineering, 112, 143-155.
- Arshad, A., Ali, H.M., Khushnood, S. ve Jabbal, M., 2018a. Experimental Investigation of PCM Based Round Pin-Fin Heat Sinks for Thermal Management of Electronics: Effect of Pin-Fin Diameter, International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, 861-872.

- Arshad, A., Ali, H.M., Yan, W.M., Hussein, A.K. ve Ahmadlouydarab, M., 2018b. An Experimental Study of Enhanced Heat Sinks for Thermal Management Using N-Eicosane As Phase Change Material, Applied Thermal Engineering, 132, 52-66.
- Ashraf, M.J., Ali, H.M., Usman, H. ve Arshad, A., 2017. Experimental Passive Electronics Cooling: Parametric Investigation of Pin-Fin Geometries and Efficient Phase Change Materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 115, 251-263.
- Baby, R. ve Balaji, C., 2012. Experimental Investigations on Phase Change Material Based Finned Heat Sinks for Electronic Equipment Cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 1642-1649.
- Baby, R. ve Balaji, C., 2013a. Thermal Optimization of PCM Based Pin Fin Heat Sinks: An Experimental Study, Applied Thermal Engineering, 54, 65-67.
- Baby, R. ve Balaji, C., 2013b. A Neural Network-Based Optimization of Thermal Performance of Phase Change Material-Based Finned Heat Sinks – An Experimental Study, Experimental Heat Transfer, 26, 431-452.
- Baby, R. ve Balaji, C., 2013c. Experimental Investigations on Thermal Performance Enhancement and Effect of Orientation on Porous Matrix Filled PCM Based Heat Sink, International Communications in Heat and Mass Transfer, 46, 27-30.
- Baby, R. ve Balaji, C., 2014. Thermal Performance of A PCM Heat Sink Under Different Heat Loads: An Experimental Study, International Journal of Thermal Sciences, 79, 240-249.
- Binet, B. ve Lacroix, M., 2000. Melting From Heat Sources Flush Mounted on A Conducting Vertical Wall, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 10, 286-306.
- Chen, J., Yang, D., Jiang, J., Ma, A. ve Song, D., 2014a. Research Progress of Phase Change Materials (PCMs) Embedded with Metal Foam (A Review), Procedia Materials Science, 4, 389-394.
- Chen, Z., Gao, D. ve Shi, J., 2014b. Experimental and Numerical Study on Melting of Phase Change Materials in Metal Foams At Pore Scale, International Journal of Mass and Heat Transfer, 72, 646-655.
- Chintakrinda, K. Wrzoha, R.J., Weinstein, R.D. ve Fleischer, A.S., 2012. Quantification of The Impact of Embedded Graphite Nanofibers on The Transient Thermal Response of Paraffin Phase Change Material Exposed to High Heat Fluxes, Journal of Heat Transfer, 134, 1-10.
- Chintakrinda, K., Weinstein, R.D. ve Fleischer, A.S., 2011. A Direct Comparison of Three Different Material Enhancement Methods on The Transient Thermal Response of Paraffin Phase Change Material Exposed to High Heat Fluxes, International Journal of Thermal Sciences, 50, 1639-1647.

- Chow, L.C., Zhong, J.K. ve Beam, J.E., 1996. Thermal Conductivity Enhancement for Phase Change Storage Media, International Communications in Heat and Mass Transfer, 23, 91-100.
- Dhaidan, N.S., Khodadadi, J.M., Al-Hattab, T.A. ve Al-Mashat, S.M., 2013. Experimental and Numerical Investigation of Melting of Phase Change Material/Nanoparticle Suspensions in A Square Container Subjected to A Constant Heat Flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 66, 672-683.
- Diaz, L.A. ve Viskanta, R., 1984. Visualization of The Solid-Liquid Interface Morphology Formed by Natural Convection During Melting of A Solid From Below, International Communications in Heat and Mass Transfer, 11, 35-43.
- Dukhan, N. ve Bodke, S., 2010. An Improved PCM Heat Storage Technology Utilizing Metal Foam, 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Haziran, Las Vegas, USA, Bildiriler kitabı: 978-984.
- El Omari, K., Kousksou, T. ve Guer, Y.L., 2011. Impact of Shape of Container on Natural Convection and Melting Inside Enclosures Used for Passive Cooling of Electronic Devices, Applied Thermal Engineering, 31, 3022-3035.
- El Qarnia, H., Draoui, A. ve Lakhel, E.K., 2013. Computation of Melting with Natural Convection Inside A Rectangular Enclosure Heated by Discrete Protruding Heat Sources, Applied Mathematical Modelling, 37, 3968-3981.
- Fan, L.W., Zhu, Z.Q., Zeng, Y., Xiao, Y.Q., Liu, X.L., Wu, Y.Y., Ding, Q., Yu, Z.T. ve Cen, K.F., 2015. Transient Performance of A PCM-Based Heat Sink with High Aspect Ratio Carbon Nanofillers, Applied Thermal Engineering, 75, 532-540.
- Fan, L.W., Xiao, Y.Q., Zeng, Y., Fang, X., Wang, X., Xu, X. Yu, Z.T., Hong, R.H., Hu, Y.C. ve Cen, K.F., 2013. Effects of Melting Temperature and The Presence of Internal Fins on The Performance of A Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sink, International Journal of Thermal Sciences, 70, 114-126.
- Faraji, M. ve El Qarnia, H. 2010. Numerical Study of Free Convection Dominated Melting in An Isolated Cavity Heated by Three Protruding Electronic Components, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 33, 167-177.
- Faraji, M. ve El Qarnia, H. 2010. Numerical Study of Melting in An Enclosure with Discrete Protruding Heat Sources, Applied Mathematical Modelling, 34, 1258-1275.
- Faraji, M. ve El Qarnia, H., 2009. Passive Cooling of Protruding Electronic Components by Latent Heat of Fusion Storage, Journal of Electronic Packaging, 131, 1-10.
- Fleischer, A.S., Weinstein, R.D. ve Kopec, T., 2006. Analysis of Transient Thermal Management Characteristics of PCM with An Embedded Carbon Fiber Heat Sink, Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference

on Phenomena in Electronics Systems (ITHERM), Mayıs, San Diego, USA, Bildiriler Kitabı: 1265-1268

- Fok, S.C., Shen, W. ve Tan, F.L., 2010. Cooling of Portable Hand-Held Electronic Devices Using Phase Change Materials in Finned Heat Sinks, International Journal of Thermal Sciences, 49, 109-117.
- Gapolan, K.S. ve Eswaran, V., 2016. Numerical Investigation of Thermal Performance of PCM Based Heat Sink Using Structured Porous Media As Thermal Conductivity Enhancers, International Journal of Thermal Sciences, 104, 266-280.
- Gau, C. ve Viskanta, R., 1986. Melting and Solidification of A Pure Metal on A Vertical Wall, Journal of Heat Transfer, 108, 174-181.
- Gharbi, S., Harmand, S. ve Jabrallah, S.B., 2015. Exoerimental Comparison Between Different Configurations of PCM Based Heat Sinks for Cooling Electronic Components, Applied Thermal Engineering, 87, 454-462.
- Gharbi, S., Harmand, S. ve Jabrallah, S.B., 2017. Experimental Study of The Cooling Performance of Phase Change Material with Discrete Heat Sources – Continuous and Intermittent Regimes, Applied Thermal Engineering, 111, 103-111.
- Gurram, S.P., Joshi, Y.K. ve Kim, J., 2002. Thermal Management of High Temperature Pulsed Electronics Using Metallic Phase Change Materials, Numerical Heat Transfer, 42, 777-790.
- Ho, C.J. ve Gao, J.Y., 2013. An Experimental Study on Melting Heat Transfer of Paraffin Dispersed with Al₂O₃ NanoParticles in A Vertical Enclosure International Journal of Heat and Mass Transfer, 62, 2-8.
- Hodes, M., Weinstein, R.D., Pence, S.J., Piccini, J.M., Manzione, L. ve Chen, C., 2002. Transient Thermal Management of A Handset Using Phase Change Material (PCM), Journal of Electronic Packaging, 124, 419-426.
- Hosseinizadeh, S.F., Tan, F.L. ve Moosania, S.M., 2011. Experimental and Numerical Studies on Performance of PCM-Based Heat Sink with Different Configurations of Internal Fins, Applied Thermal Engineering, 31, 3827-3838.
- iNEMI, 2004. International Electronics Manufacturing Initiative Technology Roadmap.
- Jaworski, M., 2012. Thermal Performance of Heat Spreader for Electronics Cooling with Incorporated Phase Change Material, Applied Thermal Engineering, 35, 212-219.
- Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F.H. ve Duan, F., 2018. Non-Uniform Heat Transfer Suppression to Enhance PCM Melting by Angled Fins, Applied Thermal Engineering, 129, 269-279.

- Jianhua, Z., Zhongqi, C., Dengying, L. ve Ji, L., 2000. Experimental Study on Melting in A Rectangular Enclosure Heated Below with Discrete Heat Sources, Journal of Thermal Science, 10, 254-259.
- Joneidi, M.H., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. ve Bahrampoury, R., 2017. Experimental Investigation of Phase Change in A Cavity for Varying Heat Flux and Inclination Angles, Experimental Thermal and Fluid Science, 88, 594-607.
- Ju, Y., Chen, Z. ve Zhou, Y., 1998. Experimental Study of Melting Heat Transfer in An Enclosure with Three Discrete Protruding Heat Sources, Experimental Heat Transfer, 11, 171-186.
- Kalbasi, R. ve Salimpour, M.R., 2015a. Constructal Design of Phase Change Material Enclosures Used For Cooling Electronic Devices, Applied Thermal Engineering, 84, 339-349.
- Kalbasi, R. ve Salimpour, M.R., 2015b. Constructal Design of Horizontal Fins to Improve the Performance of Phase Change Material Rectangular Enclosures, Applied Thermal Engineering, 91, 234-244.
- Kamkari, B. ve Amlashi, H.J., 2017. Numerical Simulation And Experimental Verification of Constrained Melting of Phase Change Material In Inclined Rectangular Enclosures, International Communications in Heat and Mass Transfer, 88, 211-219.
- Kamkari, B. ve Groulx, D., 2018. Experimental Investigation of Melting Behaviour of Phase Change Material in Finned Rectangular Enclosures Under Different Inclination Angles, Experimental Thermal and Fluid Science, 97, 94-108.
- Kamkari, B. ve Shokouhmand, H., 2014b. Experimental Investigation of Phase Change Material Melting in Rectangular Enclosures with Horizontal Partial Fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, 78, 839-851.
- Kamkari, B., Shokouhmand, H. ve Bruno, F., 2014a. Experimental Investigation of The Effect of Inclination Angle on Convection-Driven Melting of Phase Change Material in a Rectangular Enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 72, 186-200.
- Kandasamy, R., Wang, X.Q. ve Mujumbar, A.S., 2007. Application of phase change materials in thermal management of electronics, Applied Thermal Engineering, 27, 2822-2832.
- Kandasamy, R., Wang, X.Q. ve Mujumbar, A.S., 2008. Transient Cooling of Electronics Using Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sinks, Applied Thermal Engineering, 28, 1047-1057.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A. ve Biwole, P.H., 2017. Heat Transfer Study of Phase Change Materials with Graphene Nano Particle for Thermal Energy Storage, Solar Energy, 146, 453-463.

- Karami,R. ve Kamkari, B., 2019. Investigation of The Effect of Inclination Angle On The Melting Enhancement Of Phase Change Material In Finned Latent Heat Thermal Storage Units, Applied Thermal Engineering, 146, 45-60.
- Khodadadi, J.M., Fan, L. ve Babaei, H., 2013. Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 418-444.
- Kline, S.J. ve McClintock, F.A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Engineering, 75, 3-8.
- Khodadadi, J.M. ve Hosseinizadeh, S.F., 2007. Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials (NEPCM) with Great Potential for Improved Thermal Energy Storage, International Communications in Heat and Mass Transfer, 34, 534-543.
- Krishna, J., Kishore, P.S. ve Solomon, A.B., 2017. Heat Pipe with Nano Enhanced-PCM for Electronic Cooling Application, Experimental Thermal and Fluid Science, 81, 84-92.
- Krishnan, S. ve Garimella, S.V., 2004. Thermal Management of Transient Power Spikes in Electronic – Phase Change Energy Storage or Copper Heat Sink? Journal of Electronic Packaging, 126, 308-316.
- Krishnan, S. ve Garimella, S.V., 2004. Anaysis of a Phase Change Energy Storage System for Pulsed Power Dissipation, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 27, 191-199.
- Krishnan, S., Garimella, S.V. ve Kang, S.S., 2005. A Novel Hybrid Heat Sink Usig Phase Change Materials for Transient Thermal Management of Electronics, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 28, 281-289.
- Krishnan, S., Murthy, J. ve Garimella, S.V., 2007. Analysis of Solid-Liquid Phase Change Under Pulsed Heating, Journal of Heat Transfer, 129, 395-400.
- Krum A., 2004. Thermal management,. In Harper C A (ed) Electronic packaging and interconnection handbook, 4th edn. McGraw-Hill Professional, New York.
- Kumar, R. Misra, M.K., Kumar, R., Gupta, D., Sharma, P.K., Tak, B.B. ve Meena, S.R., 2011. Phase Change Materials: Technology Status an Potential Defence Applications, Defence Science Journal, 61,576-582.
- Lafdi, K., Mesalhy, O. ve Elgafy, A., 2008. Merits of Employing Foam Encapsulated Phase Change Materials for Pulsed Power Electronics Cooling Applications, Journal of Electronic Packaging, 130, 021004-1–021004-8.
- Lafdi, K., Mesalhy, O. ve Shaikh, S., 2007. Experimental Study on The Influence of Foam Porosity and Pore Size on The Melting of Phase Change Materials, Journal of Applied Physics, 102,083549-1–083549-6.

- Levin, P.P., Shitzer, A. ve Hetsroni, G., 2013. Numerical Optimization of A PCM-Based Heat Sink with Internal Fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, 61, 638-645.
- Li, W.Q., Qu, Z.G., He, Y.L. ve Tao, W.Q., 2012. Experimental and Numerical Studies on Melting Phase Change Heat Transfer in Open-Cell Metallic Foams Filled with Paraffin, Applied Thermal Engineering, 37, 1-9.
- Ling, Z., Zhang, Z., Shi, G., Fang, X., Wang, L., Gao, X., Fang, Y., Xu, T., Wang, S. ve Liu, X., 2014. Review on Thermal Management Systems Using Phase Change Materials for Electronic Components, Li-ion Batteries and Photovoltaic Modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31, 427-438.
- Lu, F., Fan, L., Zeng, Y., Xiao, Y, Xu, X. ve Yu, Z., 2014. Effect Of The Inclination Angle On The Transient Performance of A phase Change Material-Based Heat Sink Under Pulsed Heat Loads, Appl. Phys&Eng. 15, 789-797.
- Mahmoud, S., Tang, A., Toh, C., Al-Dadah, R. ve Soo, S.L., 2013. Experimental Investigation of Insert Configurations and PCM Type on The Thermal Performance of PCM Based Heat Sinks, Applied Energy, 12, 1349-1356.
- Mark, J., Amon, V. ve Amon, C.H., 1999. Transient Thermal Management of Temperature Fluctuations During Time Varying Workloads on Portable Electronics, IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 22, 541-550.
- Motahar, S., Alemrajabi, A.A. ve Khodadabandeh, R., 2017. Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristics During Melting of A Phase Change Material with Dispersed TiO₂ Nanoparticles in A Rectangular Enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 109, 134-146.
- Murshed, S.M.S ve Castro, C.A, 2016. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids forelectronics cooling, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 821-833.
- Nayak, K.C., Saha, S.K., Srinivasan, K. ve Dutta, P., 2006. A Numerical Model for Heat Sinks with Phase Change Materials and Thermal Conductivity Enhancers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, 1833-1844.
- Pakrouh, R., Hosseini, M.J. ve Ranjbar, A.A., 2015a. A Parametric Investigation of A PCM-Based Pin Fin Heat Sink, Mechanical Sciences., 6, 65-73.
- Pakrouh, R., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. ve Bahrapoury, R., 2015b. A Numerical Method for PCM-Based Pin Fin Heat Sinks Optimization, Energy Conversation and Management, 103, 542-552.
- Pal, D. ve Joshi, Y.K., 1997. Application of Phase Change Materials to Thermal Control of Electronic Modules: A Computational Study, Journal of Electronic Packaging, 119, 40-50.

- Pal, D. ve Joshi, Y.K., 2001. Melting in A Side Heated Tall Enclosure by A Uniformly Dissipating Heat Source, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 375-387.
- Parlak, M. ve Etiz, U., 2010. Thermal Management of An Electrical Device Using PCM Embedded in a Pin Fin Heat Sink, 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Haziran, Las Vegas, USA, Bildiriler Kitabı:1-7.
- Pecht, M., 1993. The Influence of Temperature on Microelectronic Device Failure Mechanisms (Final Report), US Army Research Laboratory.
- Pedram, M. ve Nazarian S., 2006. Thermal Modeling, Analysis, and Management in VLSI Circuits: Principles and Methods, Proc IEEE, 94, 1487-518.
- Qu, Z.G., Li, W.Q., Wang, J.L. ve Tao, W.Q., 2012. Passive Thermal Management Using Metal Foam Saturated with Phase Change Material in A Heat Sink, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 1546-1549.
- Rathod, M.K. ve Banerjee, J., 2013. Thermal Stability of Phase Change Materials used in latent heat energy storage systems: A Review, 18, 246-259.
- Saha, S.K. ve Dutta, P. 2010. Heat Transfer Correlations for PCM-Based Heat Sinks With Plate Fins, Applied Thermal Engineering, 30, 2485-2491.
- Saha, S.K. ve Dutta, P. 2012. Thermal Management of Electronics Using PCM-Based Heat Sink Subjected to Cyclic Heat Load, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 23, 466-473.
- Saha, S.K. ve Dutta, P. 2013. Role of Melt Convection on Optimization of PCM-Based Heat Sink Under Cyclic Heat Load, Heat Transfer Engineering, 34, 950-958.
- Saha, S.K. ve Dutta, P. 2015. Performance Analysis of Heat Sinks with Phase-Change Materials Subjected to Transient and Cyclic Heating, Heat Transfer Engineering, 36, 1349-1359.
- Saha, S.K., Srinivasan, K. ve Dutta, P., 2008. Studies on optimum distribution of fins in heat sink filled with phase change materials, Journal of Heat Transfer, 130, 1-4.
- Sahoo, S.K., Rath, P. ve Das, M.K., 2016 a. Application of TCE-PCM Based Heat Sink For Cooling of Electronic Components: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 550-582.
- Sahoo, S.K., Rath, P. ve Das, M.K., 2016 b. Numerical Study of Phase Change Material Based Orthotropic Heat Sink for Thermal Management of Electronics Components, International Journal of Heat and Mass Transfer, 103, 855-867.

- Sanusi, O., Warzoha, R. ve Fleischer, A.S., 2011. Energy Storage and Solidification of Paraffin Phase Change Material Embedded with Graphite Nanofibers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 4429-4436.
- Schmidt, R., 2000. Low Temperature Electronic Cooling, Electronics cooling, 6 (3).
- Scott, W.A., 1974. Cooling of Electronic Equipment, John Wiley and Sons, New York.
- Sebti, S.S., Mastiani, M., Mirzaei, H., Dadvand, A., Kashani, S. ve Hosseini, S.A., 2013. Numerical Study of The Melting of Nano-Enhanced Phase Change Material in A Square Cavity, Appl. Phys. & Eng., 14, 307-316.
- Semiconductor Industry Association, 2006. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS).
- Setoh, G., Tan, F.L. ve Fok, S.C., 2010. Experimental Studies on The Use of A Phase Change Material for Cooling Mobile Phones, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 1403-1410.
- Sharma, S.D. ve Sagara, K., 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, International Journal of Green Energy, 2, 1-56.
- Shatikian, V., Ziskind, G. ve Letan, R., 2005. Numerical Investigation of A PCM-Based Heat Sink with Internal Fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 3689-3706.
- Shatikian, V., Ziskind, G. ve Letan, R., 2008. Numerical Investigation of A PCM-Based Heat Sink with Internal Fins: Constant Heat Flux, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 1488-1493.
- Shen, W. ve Tan, F.L., 2010. Thermal Management of Mobile Devices, Thermal Science, 14,1,115-124.
- Shokouhmand, H. ve Kamkari, B., 2013. Experimental Investigation on Melting Heat Transfer Characteristics of Lauric Acid in A Rectangular Thermal Storage Unit, Experimental Thermal and Fluid Science, 50, 201-212.
- Srikanth, R. ve Balaji, C., 2017. Experimental Investigation on The Heat Transfer Performance of A PCM Based Pin Fin Heat Sink with Discrete Heating, International Journal of Thermal Sciences, 111, 188-203.
- Srikanth, R., Nemani, P. ve Balaji, C., 2015. Multi-Objective Geometric Optimization of A PCM Based Matrix Type Composite Heat Sink, Applied Energy, 156, 703-714.
- Stupar, A., Drofenik, U. ve Kolar, J.W., 2012. Optimization of Phase Change Material Heat Sinks for Low Duty Cycle High Peak Load Power Supplies, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2, 102-115.

- Sundarram, S.S. ve Li, W., 2014. The Effect of Pore Size and Porosity on Thermal Management Performance of Phase Change Material Infiltrated Microcellular Metal Foams, Applied Thermal Engineering, 64, 147-154.
- Suresh, S., Selvakumar, P., Salyan, S. ve Sriram, V., 2013. Experimental Investigation of PCM-Based Heat Sink with Different Configurations of Internal Fins, International Conference on Advance Research in Mechanical, Aeronautical and Civil, Eylül, Pattaya, Bildiriler Kitabı: 54-59.
- Tan, F.L. ve Fok, S.C., 2007. Thermal Management of Mobile Phone Using Phase Change Material, 9th Electronics Packaging Technology Conference, Aralık, Singapur, Bildiriler Kitabı:836-842.
- Tan, F.L. ve Tso, C.P., 2004. Cooling of Mobile Electronic Devices Using Phase Change Materials, Applied Thermal Engineering, 24, 159-169.
- Tiari, S., Qiu, S. ve Mahdavi, M., 2015. Numerical Study of Finned Heat Pipe-Assisted Thermal Energy Storage System with High Temperature Phase Change Material, Energy Conversion and Management, 89, 833-842.
- Tong, X.C., 2011. Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging, Springer Series in Advanced Microelectronics.
- Wang, X.Q., Mujumbar, A.S. ve Yap, C., 2007. Effect of Orientation for Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sinks for Transient Thermal Management of Electric Components, International Communications in Heat and Mass Transfer, 34, 801-808.
- Wang, X.Q. ve Yap, C., Mujumbar, A.S., 2008. A Parametric Study of Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sinks, International Journal of Thermal Sciences, 47, 1055-1068.
- Wang, Y.H. ve Yang, Y.T., 2011. Three-Dimensional Transient Cooling Simulations of a Portable Electronic Device Using PCM (Phase Change Materials) in Multi-Fin Heat Sink, Energy, 36, 5214-5224.
- Webb, B.W. ve Viskanta, R., 1986. Natural-Convection-Dominated Melting Heat Transfer in An Inclined Rectangular Enclosure, Int. J. Heat Mass Transfer, 292, 183-192.
- Weinstein, R.D., Kopec, T.C., Fleischer, A.S., D'Addio, E. ve Bossel, C.A., 2008. The Experimental Exploration of Embedding Phase Change Materials with Graphite Nanofibers for The Thermal Management of Electronics, Journal of Heat Transfer, 130, 042405-1–042405-8.
- Weng, Y.C., Cho, H.P., Chang, C.C. ve Chen, S.L., 2011. Heat Pipe with PCM for Electronic Cooling, Applied Energy, 88, 1825-1833.

- Wirtz, R.A., Zheng, N. ve Chandra, D., 1999. Thermal Management Using “Dry” Phase Change Materials, Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Mart, San Diego, USA, Bildiriler Kitabı: 74-82.
- Yang, J., Yang, L., Xu, C. ve Du, X., 2015. Numerical Analysis on Thermal Behaviour of Solid-Liquid Phase Change Within Copper Foam With Varying Porosity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 84, 1008-1018.
- Yang, X.H., Tan, S.C., Ding, Y.J., Wang, L., Liu, J. ve Zhou, Y.X., 2017. Experimental And Numerical Investigation of Low Melting Point Metal Based PCM Heat Sink with Internal Fins, International Communications in Heat and Mass Transfer, 87, 118-124.
- Yang, X.H., Tan, S.C. ve Liu, L., 2016. Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal, International Journal of Heat and Mass Transfer, 100, 899-907.
- Yang, Y.T. ve Wang, Y.H., 2012. Numerical Simulation of Three-Dimensional Transient Cooling Application on A Portable Electronic Device Using Phase Change Material, International Journal of Thermal Sciences, 51,155-162.
- Yeh, L.T. 1995. Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment, Journal of Electronic Packaging, 17, 333-339.
- Yin, H., Gao, X., Ding, J. ve Zhang, Z., 2008. Experimental Research on Heat Transfer Mechanism of Heat Sink with Composite Phase Change Materials, Energy Conversion and Management, 49, 1740-1746.
- Yin, H., Gao, X., Ding, J., Zhang, Z. ve Yutang, F., 2010. Thermal Management of Electronic Components with Thermal Adaptation Composite Material, Applied Energy, 87, 3784-3791.
- Yoo, D.W. ve Joshi, Y.K., 2004. Energy Efficient Thermal Management of Electronic Components Using Solid-Liquid Phase Change Materials, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 44, 641-649.
- Zalba, B., Marín, J., M., Cabeza, L., F. ve Mehling, H., 2003. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 251-283.
- Zeng, Y., Fan, L.W., Xiao, Y.Q., Yu, Z.T. ve Cen, K.F., 2013. An Experimental Investigation of Melting of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials (NePCMs) in A Bottom-Heated Vertical Cylindrical Cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 66, 111-117.
- Zennouhi, H., Benomar, W., Kousksou, T., Ait Msaad, A., Allouhi, A., Mahdaoui, M. ve El Rhafiki, T., 2017. Effect of Inclination Angle on The Melting Process of Phase Change Material, Case Studies in Thermal Engineering, 9, 47-54.

- Zhang, Y., Chen, Z. ve Wang, Q., 1994. Melting in An Enclosure with Discrete Heating at A Constant Rate, Int. J. Heat and Fluid Flow, 15, 79-82.
- Zhang, Y., Chen, Z., Wang, Q. ve Wu, Q., 1993. Melting in An Enclosure with Discrete Heating at A Constant Rate, Experimental Thermal and Fluid Science, 6, 196-201.
- Zhang, Z. ve Bejan, A., 1989. Melting In An Enclosure Heated At Constant, International Journal of Heat and Mass Transfer, 32, 1063-1076.
- Zhang, Z. ve He, X., 2017. Three-Dimensional Numerical Study on Solid-Liquid Phase Change Within Open-Celled Aluminum Foam with Porosity Gradient, Applied Thermal Engineering, 113, 298-308.
- Zhao, C.Y., 2012. Review on Thermal Transport in High Porosity Cellular Metal Foams with Open Cells, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 3618-3632.
- Zhao, C.Y., Lu, W. ve Tian, Y., 2010. Heat Transfer Enhancement for Thermal Energy Storage Using Metal Foams Embedded Within Phase Change Materials (PCMs), Solar Energy, 84, 1402-1412.
- Zhao, C.Y. ve Wu, Z.G., 2011. Heat Transfer Enhancement of High Temperature Thermal Energy Storage Using Metal Foams and Expanded Graphite, Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 636-643.
- Zhao, J., Zhai, J., Lu, Y. Ve Liu, N., 2018. Theory and Experiment of contact melting of Phase Change Materials in A Rectangular Cavity at Different Tilt Angles, International Journal of Heat and Mass Transfer, 120, 241-249.
- Zheng, N., Wirtz, R.A., 2000. Methology for Desingning A Hybrid Thermal Energy Storage Heat Sink, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Kasım,Orlando, USA,Bildiriler Kitabı:1-8.
- Zhu, F., Zhang, C. ve Gong, X., 2016. Numerical Analysis and Comparison of The Thermal Performance Enhancement Methods for Metal Foam/Phase Change Material Composite, Applied Thermal Engineering, 109, 373-383.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yusuf YAZICI, 1986 yılında Ankara'da doğdu. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2010 yılında ve Metalurji-Malzeme Mühendisliği Bölümünden (ÇAP) 2011 yılında lisans derecelerini başarı ile tamamladı. 2013 yılında KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim dalında Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı. 2011-2019 yıllarında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

Tezden üretilen ve SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanan makaleler:

1. Avcı M., Yazıcı M.Y., 2018. An experimental study on effect of inclination angle on performance of a PCM-based flat-type heat sink" Applied Thermal Engineering, 131, 806-814.