

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞEY SİLİNDİRİK BİR HALKA ARALIK İÇERİSİNDE ENERJİ DEPOLAMA:  
KANATÇIK ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisi Oğuz Kaan YAĞCI**

**HAZİRAN 2017  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞEY SİLİNDİRİK BİR HALKA ARALIK İÇERİSİNDE ENERJİ DEPOLAMA:  
KANATÇIK ETKİSİ**

**Makina Müh. Oğuz Kaan YAĞCI**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 05 / 2017**

**Tezin Savunma Tarihi : 09 / 06 / 2017**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mete AVCI**

**Trabzon 2017**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Oğuz Kaan YAĞCI Tarafından Hazırlanan**

**DÜŞEY SİLİNDİRİK BİR HALKA ARALIK İÇERİSİNDE ENERJİ DEPOLAMA:  
KANATÇIK ETKİSİ**




başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 / 05 / 2017 gün ve 1702 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN**

**Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**

**Üye : Doç. Dr. Mete AVCI**

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Termal enerji depolama, enerjinin etkin, sürdürülebilir ve verimli bir şekilde kullanılması ayrıca enerji arayışında konvansiyonel yakıtlara olan bağılılığın azaltılması konusunda önemli bir rol üstlenmektedir. Termal enerji depolama sistemlerinden bu süreçler içerisinde en verimli şekilde yararlanılması, bu sistemlerin akılcı ve gözlemci dizaynını gerektirmektedir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, düşey konumlu silindirik bir hacim içerisindeki faz değiştiren maddenin ısı depolama ve ısı geri kazanım süreçlerine, ilgili maddenin ergime davranışı gözlemlenerek tasarlanan farklı kanatçık profillerinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın, termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan ısıtıcı yüzey dizaynına yenilikçi bir yaklaşım getireceği düşünülmektedir.

Çalışmam süresince bilgi birikimini, tecrübesini ve yardımlarını benden esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Mete AVCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirmesi konusunda yaptıkları bilimsel katkılardan dolayı kıymetli hocalarım sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a, sayın Yrd. Doç. Dr. Mithat AKGÜN'e ve deney düzeneğimin kurulum aşamasında bilgi birikimini, tecrübesini ve yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa Yusuf YAZICI'ya teşekkür ederim.

Aynı zamanda, maddi ve manevi her daim yanımda olan, aileme ve eşim Arş.Gör. Esra YAĞCI'ya tüm kalbimle teşekkür ederim. Bu çalışmayı, benimle birlikte sabır gösteren ve emek harcayan sevgili eşim Esra YAĞCI'ya adıyorum.

Oğuz Kaan YAĞCI

Trabzon, 2017



## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Düşey Silindirik Bir Halka Aralık İçerisinde Enerji Depolama: Kanatçık Etkisi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mete AVCI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 09/05/2017

Oğuz Kaan YAĞCI

## İÇİNDEKİLER

**Sayfa No:**

ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Enerji Depolama Yöntemleri .....	2
1.2.1. Termal Enerji Depolama.....	3
1.2.1.1. Termokimyasal Isı Depolama .....	5
1.2.1.2. Duyulur Termal Enerji Depolama.....	5
1.2.1.3. Gizli Isı Depolama.....	10
1.3. Literatür Araştırması .....	18
1.3.1. FDM Türü, Depo Geometrisi ve Konum Etkisi.....	18
1.3.2. Kanatçık Etkisi .....	24
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	29
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi .....	31
2.2. Test Bölgesi .....	36
2.3.1. Şarj ve Deşarj Deneyleri.....	42
3. BULGULAR VE İRDELEME .....	45
3.1 Isı Depolama (Şarj) Sürecinin İncelenmesi .....	45
3.1. Isı Geri Kazanım (Deşarj-Katılma) Sürecinin İncelenmesi.....	65
4. SONUÇLAR .....	90
5. ÖNERİLER.....	91
6. KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DÜŞEY SİLİNDİRİK BİR HALKA ARALIK İÇERİSİNDE ENERJİ DEPOLAMA:  
KANATÇIK ETKİSİ

Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mete AVCI  
2017, 95 Sayfa

Bu çalışmada, düşey konumlu silindirik bir halka aralıktaki faz değiştiren maddenin (FDM) ergime (şarj) ve katılaşma (deşarj) davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Halka aralık eş merkezli bir dış gövde ve farklı kanatçık kenar uzunluk oranlarına sahip ( $a/b = 0/0, 20/20, 15/25, 10/30, 5/35, 0/40$ ) kanatçıklı bir ısı transfer borusundan oluşmaktadır. Her bir kanatçık konfigürasyonu için sabit hacimsel debide ( $Q = 300$  l/h), üç farklı akış giriş sıcaklığında ( $T_g = 75, 80$  ve  $85^\circ\text{C}$ ) şarj ve tek bir akışkan giriş sıcaklığında ( $T_g = 25^\circ\text{C}$ )deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, faz değiştiren madde olarak ticari parafin (Merck/107337) ve ısı transfer akışkanı olarak ise saf su kullanılmıştır. Kanatçık kenar oranının azalışına bağlı olarak şarj sürecinde ergime süresi kısalırkendeşarj sürecinde katılaşma süresinin uzadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termal enerji depolama, Gizli ısı depolama, Faz değiştiren madde (FDM), Ergime, Katılaşma, Kanatçık etkisi.

Master Thesis

SUMMARY

ENERGY STORAGE USING PHASE CHANGE MATERIAL IN AN ANNULI OF A  
VERTICAL TUBE-IN-SHELL UNIT: FIN EFFECT

Oğuz Kaan YAĞCI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mete AVCI  
2017, 95 Pages

In this study, the melting (charge) and solidification (discharge) behaviors of a phase change material (PCM) in an annuli of a vertical tube-in shell unit are investigated experimentally. The annular space is composed of a finned heat transfer tube with different fin side length ratios ( $a/b = 0/0, 20/20, 15/25, 10/30, 5/35, 0/40$ ) and a coaxial outer shell. For each fin configuration, experiments are carried out for a constant volumetric flow rate ( $Q = 300$  l/h) at three different values of inlet temperature of heat transfer fluid ( $T_g = 75, 80$  and  $85^\circ\text{C}$ ) for charging and a single value of inlet temperature of HTF ( $T_g = 25^\circ\text{C}$ ) for discharging. Paraffin used as phase change material (Merck/107337) while pure water as heat transfer fluid. It is disclosed that an decrease in the fin length ratio shortens the melting time for the charging process while extends the solidification time for the discharging process.

**Keywords:** Thermal energy storage, Latent heat storage, Phase Change Material (PCM), Melting, Solidification, Fin effect.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Depolanan enerji türüne göre enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.2.	Termal enerji depolama sürecine ait adımlar .....	4
Şekil 1.3.	Binalarda hacim ısıtmasında kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi .....	9
Şekil 1.4.	Binalarda hacim ısıtmasında kullanılan kayalı duyulur ısı depolama .....	9
Şekil 1.5.	Saf FDM'ye ait sıcaklık - entalpi değişimi (a), saf olmayan FDM'ye ait sıcaklık-entalpi değişimi (b). .....	11
Şekil 1.6.	Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması.....	14
Şekil 1.7.	FDM ile güneş enerjisi depolama sistemi. ....	18
Şekil 2.1.	Deney düzeneğinin şematik resmi.....	32
Şekil 2.2.	Deney düzeneğinin fotoğrafı. ....	33
Şekil 2.3.	Keithley 2701 veri toplama cihazı (a), Keithley 7702 veri toplama kartı (b). ..	35
Şekil 2.4	Test Bölgesi, demontaj resmi (a), kesit resmi (b). ....	36
Şekil 2.5.	Kanatçıklara ait geometrik karakteristikler .....	37
Şekil 2.6	Farklı taban ve tavan genişliklerine sahip kanatçık profilleri a/b=20/20(a), 15/25(b), 10/30(c), 5/35(d), 0/40(e). ....	38
Şekil 2.7.	Sıcaklık ölçüm noktalarının depo içerisindeki yerleşim planı. ....	39
Şekil 2.8.	Sıcaklık ölçüm prizlerinin depo içerisine yerleşimi, 3 boyutlu model .....	40
Şekil 2.9	Sıcaklık ölçüm prizi .....	41
Şekil 2.10.	Deneysel çalışmada kullanılan paraffin.....	41
Şekil 2.11.	Deneyde kullanılan parafine (MERCK/107337) ait DSC analiz sonucu .....	42
Şekil 2.12.	Dolum sonrasında ait FDM yüzey fotoğrafları, düzgün olmayan yüzey (a), ısı tabancası uygulaması sonunda elde edilen yüzey (b). ....	43
Şekil 3.1.	Kanatçıksız duruma ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). ....	49
Şekil 3.2.	Kanatçıksız duruma ait farklı aksenal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri(şarj). ....	50
Şekil 3.3.	Kanatçıksız duruma ait depo içerisindeki sıcaklık dağılımları 30 dk. (a), 60 dk. (b), 120 dk. (c), 180 dk. (d), 240 dk. (e), 360 dk. (f) (şarj). ....	51
Şekil 3.4.	a/b=20/20'ye ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). ....	52
Şekil 3.5.	a/b=15/25'e ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). ....	53

Şekil 3.6.	$a/b=10/30$ 'a ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	54
Şekil 3.7.	$a/b=5/35$ 'e ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	55
Şekil 3.8.	$a/b=0/40$ 'a ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	56
Şekil 3.9.	$a/b=20/20$ 'ye ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	57
Şekil 3.10.	$a/b=15/25$ 'e ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). ...	58
Şekil 3.11.	$a/b=10/30$ 'a ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	59
Şekil 3.12.	$a/b=5/35$ 'e ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	60
Şekil 3.13.	$a/b=0/40$ 'a ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj). .....	61
Şekil 3.14.	Farklı kanatçık profilleri için ( $T_g=80^\circ\text{C}$ ) bazı istasyonlardaki sıcaklık değişimleri $T_{63}$ (a), $T_{65}$ (b), $T_{33}$ (c), $T_{35}$ (d), $T_{13}$ (e), $T_{15(\text{kritik})}$ (f). .....	62
Şekil 3.15.	Farklı kanatçık profilleri kritik yerel istasyonların sıcaklık değişimleri $T_g=75^\circ\text{C}$ (a), $T_g=80^\circ\text{C}$ (b), $T_g=85^\circ\text{C}$ (c). .....	63
Şekil 3.16.	Kanatçık kenar oranının ergime süresi üzerindeki etkisi .....	64
Şekil 3.17.	Kanatçiksız duruma ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	67
Şekil 3.18.	Kanatçiksız duruma ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	69
Şekil 3.19.	Kanatçiksız durum için farklı zaman adımlarına ait depo içerisindeki sıcaklık haritaları, 10dk. (a), 30dk.(b), 60dk. (c), 120dk. (d), 180dk. (e), 240dk. (f), 300dk. (g), 360dk.(h) (deşarj). .....	70
Şekil 3.20.	$a/b = 20/20$ 'ye ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	71
Şekil 3.21.	$a/b = 15/25$ 'e ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	73
Şekil 3.22.	$a/b = 10/30$ 'a ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	75
Şekil 3.23.	$a/b = 5/35$ 'e ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	77
Şekil 3.24.	$a/b = 0/40$ 'a ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	79
Şekil 3.25.	$a/b=20/20$ 'ye ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	81
Şekil 3.26.	$a/b=15/25$ 'e ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	82
Şekil 3.27.	$a/b=10/30$ 'a ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	83
Şekil 3.28.	$a/b=5/35$ 'e ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	84
Şekil 3.29.	$a/b=0/40$ 'a ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj). .....	85
Şekil 3.30.	Depo içerisindeki farklı noktaların sıcaklıklarının farklı kanatçık profilleri için karşılaştırılması (deşarj). .....	86
Şekil 3.31.	Kritik yerel istasyonların farklı kanatçık profilleri için zaman bağımlı değişimleri (deşarj). .....	88
Şekil 3.32.	Farklı kanatçık profilleri ve kanatçiksız durum içindeşarj sürelerinin karşılaştırılması. ....	88

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No:

Tablo 1.1. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerine ait farklı depolama periyotları için uygun depolama ortamları. ....	6
Tablo 1.2. Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı sıvı malzemeler. ....	7
Tablo 1.3. TED sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı malzeme 20°C sıcaklıktaki termal kapasiteleri. ....	8
Tablo 1.4. Bazı duyulur ve gizli ısı depolama ortamlarının enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması. ....	12
Tablo 1.5. Bazı organik FDM'lere ait ergime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri ....	15
Tablo 1.6. Bazı inorganik FDM'lere ait ergime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri ....	15
Tablo 1.7. FDM'lerin faz dönüşüm sıcaklık aralıklarına uygun bazı uygulamalar ....	17
Tablo 1.8. FDM türü, depo geometrisi ve konum etkisinin incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar ....	19
Tablo 1.9. Kanatçık geometrisi ve diziliminin etkisi üzerine yapılan çalışmalar.....	25
Tablo 2.1. Kullanılan ölçüm cihazları ve cihazların özellikleri ....	35
Tablo 2.2. Gövde ve ısı transfer borusuna ait geometrik karakteristikler.....	37
Tablo 2.3. Farklı kanatçık profillerine ait geometrik karakteristikler.....	38
Tablo 2.4. Kullanılan faz değiştiren maddenin termofiziksel özellikleri.....	41
Tablo 3.1. Her bir kanatçık düzenlemesine ait FDM ergime süreleri.....	64
Tablo 3.2. Her bir kanatçık düzenlemesine ait deşarj süreleri. ....	89

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dünya nüfusunun hızla artması, buna paralel olarak artan kentleşme, sanayileşme ve tüketime bağlı üretim sistemlerinin hızla gelişmesi, enerji ihtiyacını giderek artmasına neden olmaktadır. Enerji üretim sistemlerin oluşturduğu enerji ihtiyacının çoğunlukla fosil kaynaklı yakıtlardan temin edilmesi ise bu yakıtlara olan bağılılığı giderek artırmaktadır.

Fosil kaynakların çok yavaş bir yenilenme sürecine sahip olması, artan enerji ihtiyacıyla birlikte hızla tükenmesi ve kullanımları esnasında oluşturdukları ciddi çevre kirlilikleri (zehirli gaz salınımı, iklim değişiklikleri vb.) ve diğer yandan, giderek büyüyen enerji ihtiyacının bu kaynaklarla karşılanamaz hale gelmesi (arz-talep) alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına önemli bir ivme kazandırmakta, devletleri kısa veya uzun vadeli sürdürülebilir enerji politikaları gerçekleştirmeye ve bununla birlikte araştırmacıları, alternatif enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir.

Sürdürülebilir enerji kavramı, var olan kaynakları bir sonraki kuşaklara aktarabilmek amacıyla tüketmeksizin enerjinin temin edilmesidir. Diğer bir ifadeyle, gerekli enerjinin temininde yenilenebilir enerji kaynakları tercihinin ön planda tutulması durumunu ifade etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal, biokütle, hidrojen ve dalga enerjisi verilebilir. Bu enerji kaynaklarının çevre kirliliği yaratmaması ve belirli aralıklarla veya sürekli mevcut olmaları önemli üstünlükleridir.

Doğada bulunan yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra, sanayide oluşan atık ısıların değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Sanayide oluşan atık ısıların üretim proseslerinde başka çevrimlere yönlendirilmesine ek olarak ilgili atık enerjinin ihtiyaç anında başka bir zaman diliminde kullanılmak üzere ısı olarak depolanması araştırmacılar tarafından artan bir ilgi görmektedir.

Fosil yakıtların aksine, yenilenebilir enerji kaynaklarından genellikle belirli zaman aralıklarında yararlanılabildiği göz önüne alındığında (örneğin rüzgar enerjisi), mevcut



enerjiyi korumak ve verimli bir şekilde yararlanmak, ilgili kaynakların erişiminin kolay veya sınırlı olduğu zaman aralıklarında ihtiyaç olunan başka bir zaman diliminde kullanılmak üzere enerji olarak depolanmasını gerekli kılmaktadır. Bu gereklilik, enerji depolama üzerine yapılan çalışmaların temel hedefini, kısıtlı bir süre içerisinde var olan enerji girdisini en kısa sürede ve verimli şekilde depolanması haline getirmektedir.

## 1.2. Enerji Depolama Yöntemleri

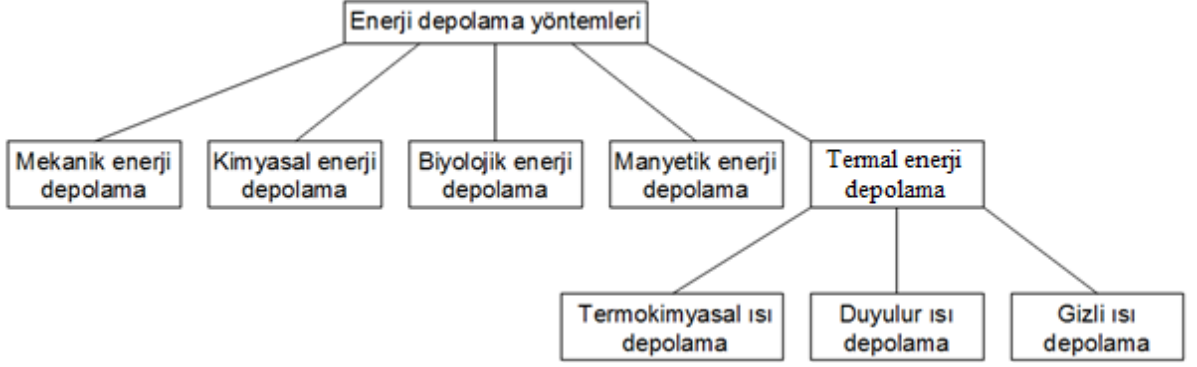
Gelişen teknoloji ile birlikte enerji depolamanın (ED) önemi gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle süreksiz olan enerji kaynaklarından etkin ve verimli bir şekilde yararlanılması, enerji depolama sistemlerinin verimli bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Örneğin, güneş enerjisinin yalnız belirli aralıklarla (gündüz vakti) erişilebilir olması, ilgili enerjiden en verimli şekilde yararlanılması, diğer bir ifade ile daha sonra kullanılması için ısı enerjisi olarak depolanmasını gerekli kılmaktadır.

Enerji depolama sistemleri, doğada var olan temiz enerjinin (örneğin, binalarda ısıtma veya soğutma amacıyla kullanılması gibi) çevre dostu yöntemlerle kullanılması konusunda yarar sağlamaktadır. Enerji depolama sistemlerinin yararları genel olarak şu şekilde sıralanabilir (Dinçer ve Rosen, 2002);

- Enerji maliyetinin azalması
- Gereksiz enerji kullanımının azalması
- Binalarda iç hava kalitesinin iyileşmesi
- İşletmelerin iyileşmesi
- Ekipman boyutlarının küçülmesi
- İlgili ekipmanların daha etkin ve verimli kullanımının sağlanması
- Fosil yakıtların kullanımlarının azalması
- Çevre kirliliğinin azaltılması

Ülkemizin fosil yakıtlar yönünden dışa bağılılığı göz önüne alınırsa, belirli sürelerde var olan temiz veya atık enerjinin depolanması yoluyla sağlanacak enerji tasarrufunun ülke ekonomisine yapacağı pozitif etki açıktır.

Depolanacak enerji türüne göre enerji depolama sistemleri, mekanik, kimyasal, biyolojik, manyetik ve ısı enerjisi depolama olarak kategorize edilebilir. İlgili sınıflandırma Şekil 1.1.'de verilmektedir.



Şekil 1.1. Depolanan enerji türüne göre enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması [1]

Tez kapsamıyla doğrudan ilişkili olması nedeniyle bu bölümde sadece termal enerji depolama yöntemleri detaylı bir şekilde incelenecektir.

### 1.2.1. Termal Enerji Depolama

Termal enerji depolama temel olarak var olan termal enerjinin daha sonra kullanılmak üzere geçici olarak genellikle kapalı hacimler içerisinde tutulmasıdır. Termal enerji depolama ile belirli bir hacmin ısıtılması, soğutulması, sıcak su temini ve iklimlendirme gibi konular üzerine yapılan çalışmalar artan bir ilgi görmektedir.

Termal enerji depolama sistemleri, sanayi, enerji üretim sistemleri, binalarda hacimlerin ısıtılması soğutulması, sıcak-soğuk su temini, elektronik cihazların soğutulması ve uzay araçlarında kullanımları gibi birçok uygulama alanında kendine yer bulmaktadır. Bu uygulamalar, termal enerji depolama sistemlerinin çalışma doğası gereği çevrim-temelli olarak dizayn edilmektedirler. Termal enerji depolama sistemlerinin belirli sistemler üzerindeki faydaları özetle şu şekilde sıralanabilir [1]:

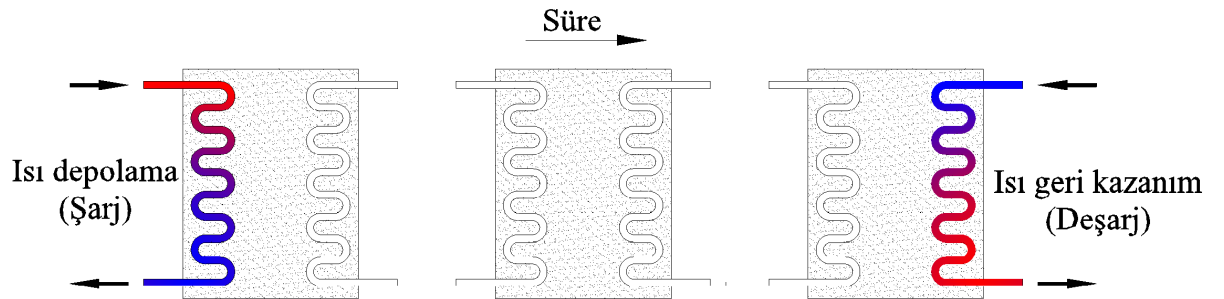
- Enerji üretim sistemlerinde, enerji talebinin daha düşük olduğu zaman aralıklarında üretilen fazla enerjinin ısı olarak depolanıp ihtiyaç durumlarında kullanılmasını sağlayarak verimi artırmaktadır.
- Sabit ısı girdisiyle çalışan kojenerasyon sistemlerinde enerji talebinin düşük olduğu zaman aralıklarında üretilen fazla enerjinin (örneğin elektrik enerjisinin)

depolanmasını sağlayarak ilgili sistemlerin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

- Enerjinin daha ucuz olduğu zaman periyotlarında ısı enerjisi formunda depolanarak, daha pahalı olduğu (örneğin elektriğin gece vakti gündüz vaktine oranla daha ucuz olması) zaman aralıklarında kullanılmasını sağlamak ve böylece kullanıcı ekonomisine katkı sağlamaktadır.
- Depolanan enerji sayesinde sistemlerin enerji ihtiyaçlarındaki kesintileri önleyerek güvenilirliklerini artırmaktadır.

Termal enerji depolama sistemi olarak, depolama ortamının, sıcaklığının artması veya azalması şeklinde gerçekleştirilen duyulur ısı depolama, faz dönüşüm ısısını temel alan gizli ısı depolama ve kimyasal reaksiyonlar sonucu depolanan veya açığa çıkan ısıyı temel alan termokimyasal ısı depolama olmak üzere yaygın olarak üç farklı sistem yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Doğru ısı enerji depolama yönteminin seçimi, yapılacak olan depolamanın süresine (günlük veya mevsimlik depolama), sistemin çalışma şartlarına, yatırım maliyetleri vb. durumlara bağlıdır. Termal enerji depolama uygulamalarına örnek olarak, gündüz var olan güneş enerjisinin depolanarak gece kullanılması, yaz mevsimi boyunca depolanan termal enerjinin kış mevsiminde hacim ısıtması için kullanılması veya tersinin gerçekleştirilerek kışın depolanan termal enerjinin yaz mevsiminde hacim soğutması amacı ile kullanılması verilebilir. Tüm bu uygulamaların enerji temininde arz-talep arasındaki farkı kapatacağı açıktır [1].

Termal enerji depolama sistemlerinin kullanılması temel olarak şarj, depolama ve deşarj olmak üzere üç adımda gerçekleşmektedir (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. Termal enerji depolama sürecine ait adımlar

Şekilden görüldüğü üzere belirli zaman aralığında var olan ısı enerji depo içerisine aktarılmakta ve gerekli olduğu zaman aralığında kullanılmak üzere geri kazanılmaktadır. İlgili şekilde şarj ve deşarj sıralamasının kullanılacak çevrime göre (ısıtma veya soğutma amacıyla kullanılması durumunda) yer değiştirebileceği belirtilmelidir.

### 1.2.1.1. Termokimyasal Isı Depolama

Isı enerjisinin kimyasal reaksiyonlar yardımı ile depolanmasına kimyasal ısı depolama adı verilmektedir. Kimyasal ısı depolama temel olarak, kimyasal bir bileşiğin endotermik tepkimeler yoluyla bileşenlerine ayrılması ve bu bileşenlerin tekrar ekzotermik tepkimeler yardımıyla bir bileşik oluşturması ve bu esnada ısı açığa çıkarması ilkesine dayanmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, depolanmak istenen ısıyla depo içerisindeki  $AB$  bileşiği  $AB + Q = A + B$  şeklinde endotermik tepkimeler yardımıyla bileşenlerine ayrılmakta, ilgili bileşenler ayrı hacimler içerisinde depolanmakta ve ihtiyaç anında etkileşime sokularak  $A + B = AB + Q$  şeklinde açığa çıkan ısı enerjisi gerekli yerlerde kullanılmaktadır. Bu durumdan da anlaşıldığı üzere, termokimyasal ısı depolama için kullanılacak maddenin tersinebilir (endotermik ve ekzotermik) tepkimelere girebilmesi gerekmektedir.

İlgili ısı depolama sisteminde kullanılan maddelerin, kimyasal bağlarının tersinebilir olarak ayrışması veya birleşmesi esnasında depoladıkları ve açığa çıkardıkları ısı enerjisi yüksek olduğundan bu maddelerin genellikle ısı depolama kapasiteleri yüksektir. Depolanan ısı enerjisi, bileşiğin bağlarının ayrıştırılmasında kullanıldığından, ortam içerisinde duyulur ısı artışı teorik olarak gerçekleşmemektedir. Bu durum, deponun bulunduğu ortama ısı kaybı gerçekleşmeksizin çok uzun süreler depolanan enerjinin tutulabilmesini sağlamaktadır. İlgili sistemlerde kullanılan kimyasal maddelerin düşük maliyete sahip olmalarına karşın, depolama sistemlerindeki karmaşıklıklar ve kimyasal tepkimelerin getirdiği belirsizlikler en önemli dezavantajlarıdır [3].

### 1.2.1.2. Duyulur Termal Enerji Depolama

Depolama ortamının sıcaklığının değiştirilmesi suretiyle yapılan termal enerji depolamaya duyulur termal enerji depolama denilmektedir. İlgili sistemlerde depolanan

enerji girdisi, enerji depolama ortamının, ilk ve son (depolamanın tamamlandığı süre içinde) sıcaklık farkıyla, kütlesiyle ve ısı depolama kapasitesi ile doğru orantılıdır. Belirli bir kütledeki materyal içerisinde depolanan ısı miktarı şu şekilde ifade edilmektedir;

$$Q = mc_p \Delta T = \rho c_p V \Delta T \quad (1.1)$$

Burada, depolama materyaline ait  $m$  kütleyi,  $c_p$  özgül ısıyı,  $\Delta T$  sıcaklık değişimini,  $V$  hacmini ve  $\rho$  yoğunluğunu ifade etmektedir. Eşitlik (1.1) dikkatle incelendiğinde duyulur ısı depolama sistemine ait ısı depolama kabiliyetinin büyük oranda kullanılan materyalin özgül ısısına bağlı olduğu açıktır.

Duyulur ısı depolama sıvı, katı veya her ikisinin birlikte bulunduğu ortamlar içerisinde yapılabilmektedir. Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan depolama ortamlarına örnek olarak su, hava, yağ, taş yatakları, tuğla ve toprak verilebilir. Uygun depolama ortamının seçiminde, depolama periyotları da göz önüne alınmalıdır. Tablo 1.1.'de farklı depolama periyotlarında yaygın olarak kullanılan materyaller sunulmaktadır.

Tablo 1.1. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerine ait farklı depolama periyotları için uygun depolama ortamları [1].

Kısa süreli (günlük-haftalık) duyulur termal depolama	Uzun süreli (yıllık) termal ısı depolama	Kısa süreli (günlük-haftalık) gizli termal depolama
Taş yatakları	Taş yatakları	İnorganik maddeler
Toprak yatakları	Toprak yatakları	Organik maddeler
Su tankları	Büyük su tankları	Yağ asitleri
---	Akiferler	Aromatik asitler
---	Güneş havuzları	---

Termal enerji, sıvı ortamlarda duyulur ısı olarak birçok materyal içerisinde depolanabilmektedir. İlgili sistemlerde depolama ortamı olarak kullanılan bazı sıvılar ve bu sıvılara ait termofiziksel özellikler Tablo 1.2.'de verilmektedir.

Tablo 1.2. Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı sıvı malzemeler [4]

Ortam	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı (J/kgK)	Isıl iletkenlik (W/mK)
Su	0-100	1000	4190	0,63
Su-etilen glikol	---	1050	3479	---
Terminol 55	(-18) - (315)	---	2400	---
Terminol 66	(-9)-(343)	750	2100	0,106
Etilen glikol	---	1116	2382	0,249
Motor yağı	<160	888	1880	0,145
Lityum	180-1300	510	4190	38,1
Sodyum	100-760	960	1300	67,5
Etanol	<78	790	2400	---
Propanol	<97	800	2500	---
Bütanol	<118	809	2400	---
İzobütanol	<100	808	3000	---
İzopentanol	<148	831	2200	---
Oktan	<126	704	2400	---

Termal enerji, duyulur olarak sıvı ortamlarda depolanabildiği gibi katı veya sıvı ve katı materyallerin birlikte bulunduğu ortamlarda da depolanabilmektedir. Katı ortamda duyulur ısı depolama yapan sistemler genellikle sıvı ortamda depolama yapan sistemlere oranla daha yüksek ısı gereksinimlerine cevap verebilmektedirler. Sıvı ortamda yapılan depolamanın getirdiği sızma, korozyon vb. problemlerin katı depolamada büyük oranda bulunmaması bu sistemleri cazip kılmaktadır. Tablo 1.3.'de katı ortam içerisinde termal enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan materyaller ve bu materyallere ait termofiziksel özellikler verilmektedir.

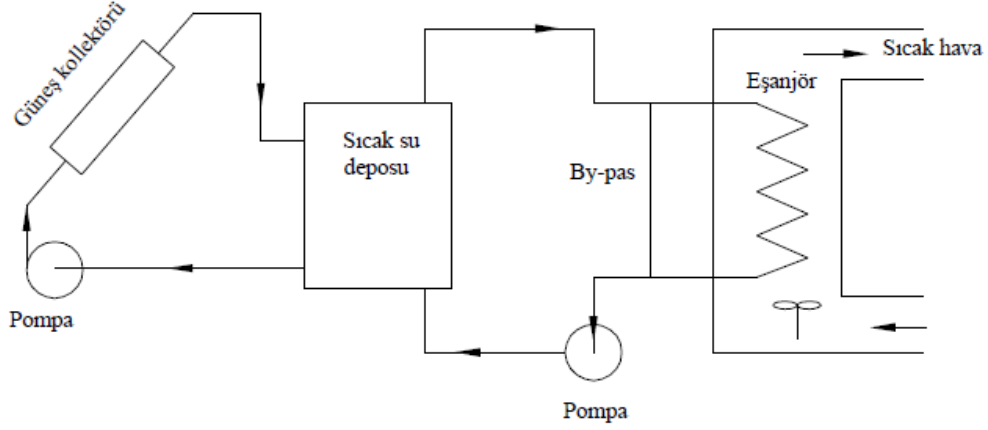
İlgili sistemlerde, kullanılan depolama ortamlarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, suyun özgül ısısının (4,2 kJ/kg°C) taş ve toprağın özgül ısısına oranla yaklaşık iki katı olması, ve çalışma sıcaklık aralığının uygun olması depolama ortamı seçiminde yüksek özgül ısıları sayesinde suyu binalarda ısıtma-soğutma uygulamalarında avantajlı bir hale getirmektedir. Fakat, toprak ve seramik türlerinin

yüksek ısı dayanımları, suyun aksine yüksek sıcaklıklı sistemlerde kullanılabilmelerini sağlamaktadır [1].

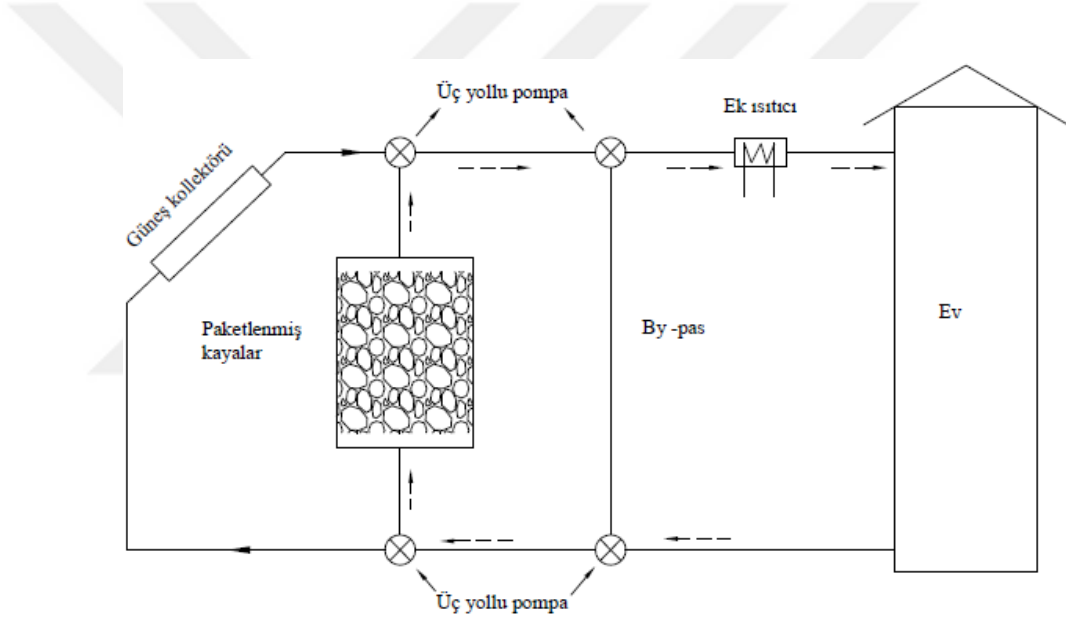
Tablo 1.3. TED sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı malzeme 20°C sıcaklıktaki termal kapasiteleri [5]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı (J/kgK)	Hacimsel termal kapasite (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K)
Kil	1458	879	1,28
Tuğla	1800	837	1,51
Kum taşı	2200	712	1,57
Tahta	700	2390	1,67
Çimento	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	465	3,68
Çakıllı toprak	2050	1840	3,77
Manyetit	5177	752	3,89

Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan depolama malzemesinin özgül ısılarının yüksek olmasının yanı sıra, ilgili materyalin ucuz, erişilebilir olması, yanma, alevlenme ve depolandığı ortam içerisinde korozif özellikler göstermemesi ve termofiziksel özelliklerini uzun süre muhafaza edebilmesi de istenmektedir. Duyulur ısı depolama sistemlerinde, ucuzluğu ve kolay temin edilebilmeleri nedeniyle genellikle depolama materyali olarak su ve çakıl taşı tercih edilmektedir. Binalarda hacim ısıtmasında depolama ortamı olarak su ve kaya kullanan örnek sistemlere ait şematik resimler sırasıyla Şekil 1.3. ve Şekil 1.4.'de verilmektedir.



Şekil 1.3. Binalarda hacim ısıtmasında kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi [6]



Şekil 1.4. Binalarda hacim ısıtmasında kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sistemi [6]

Duyulur ısı depolama sistemlerinin sahip olduğu en önemli özelliklerden biri şarj ve deşarj işlemlerinin tersinir olarak gerçekleştirilebilmesidir. Sahip oldukları birçok avantajlarına karşın, ilgili sistemlerin ait bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Termal ısı depolama materyalinin depolama esnasında sıcaklığının artışı veya azalışı (kullanım amacına göre) ortama gerçekleşen ısı kaybını ya da kazanımını artırmaktadır.



- Isı kayıplarının önlenmesi için ilgili depolar üzerinde iyi bir yalıtım yapılması şarttır.
- Isı depolama veya geri kazanımı sürecinde sıcaklığın büyük ölçüde değişmesi sıcaklık gradyanının büyümesine neden olmaktadır.

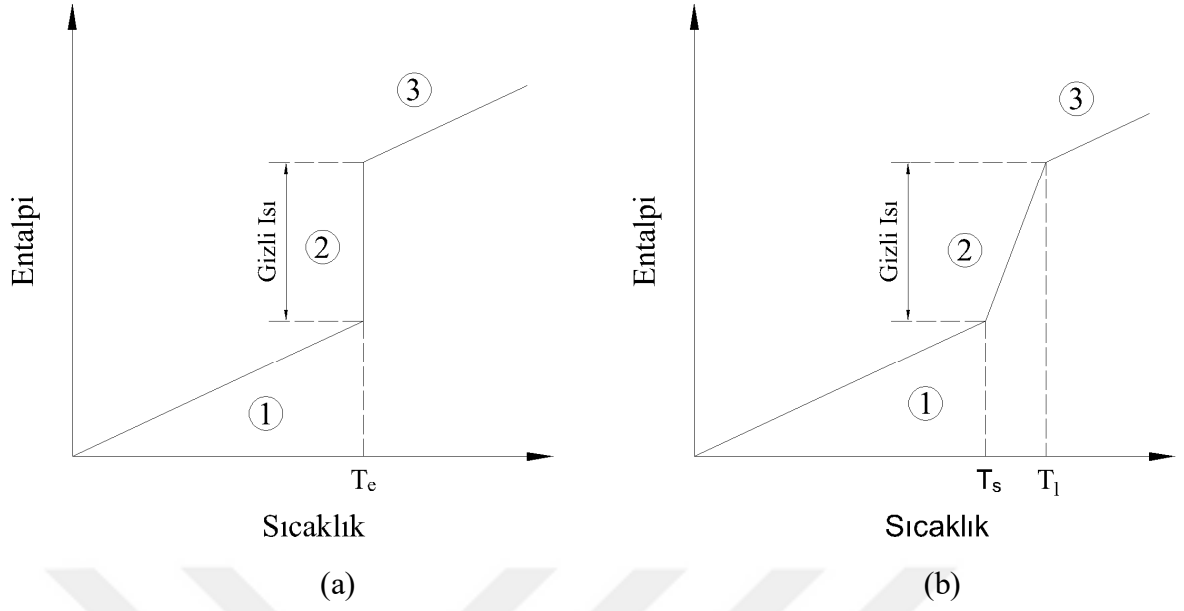
### 1.2.1.3. Gizli Isı Depolama

Bir maddenin bulunduğu fazdan başka bir faza geçerken bünyesine aldığı veya bünyesinden verdiği ısı, gizli ısı olarak ifade edilmektedir. Duyulur ısı-temelli çalışan ısı enerji depolama sistemlerinin aksine, gizli ısı depolama sistemlerinde depolama ortamı olarak kullanılan madde ilgili süre içerisinde en az bir faz dönüşümü gerçekleştirmektedir. Bu faz dönüşümleri, kullanılan ısı depolama ortamına bağlı olmakla birlikte katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz veya ısı geçiş yönüne bağlı olarak bunların tersi şeklinde olabilmektedir. İlgili sistemlerde, bünyesinde ısı depolama ya da bünyesinden ısı geri kazanımının gerçekleştirilmesi esnasında faz değişimine uğrayan bu maddelere genel olarak faz değiştiren maddeler (FDM) olarak isimlendirilmektedir.

FDM'lerin faz dönüşümlerini gerçekleştirdiği esnada bünyesine aldığı (depoladığı) ısı miktarı, ilgili maddenin gizli ısı depolama kapasitesi olarak ifade edilmektedir. FDM üzerine faz dönüşüm sıcaklık aralığından önce ve sonra yapılan ısı depolamanın duyulur ısı depolama olduğu belirtilmelidir. Genel olarak FDM'lerin ısı enerji depolama kapasiteleri şu şekilde ifade edilmektedir.

$$Q = \int_{T_i}^{T_e} mc_p dT + mH_e + \int_{T_e}^{T_s} mc_s dT = m[H_e + c_k(T_e - T_i) + c_s(T_s - T_e)] \quad (1.2)$$

İlgili denklemlerde,  $T_i$  (K) FDM'nin ilk sıcaklığını,  $T_e$  (K) ergime sıcaklığını,  $T_s$  (K) son sıcaklığını,  $c_p$  (kJ/kgK) katı fazda sabit basınçtaki özgül ısı değerini,  $c_s$  (kJ/kgK) sıvı fazda sabit basınçtaki özgül ısı değerini ve  $H_e$  (kJ/kg) ise ergime gizli ısını ifade etmektedir. FDM'lerin faz değişimleri esnasındaki entalpi değişimleri temsili olarak Şekil 1.5.'de verilmiştir. İlgili şekillerde 1 ve 3 numaralı bölgeler, FDM üzerinde duyulur ısı depolamanın yapıldığı, 2 numaralı bölge ise gizli ısı depolamanın yapıldığı aralığı temsil etmektedir.



Şekil 1.5. Saf FDM'ye ait sıcaklık - entalpi değişimi (a), saf olmayan FDM'ye ait sıcaklık-entalpi değişimi (b) [7].

Isı depolama sistemlerinde faz değiştiren madde kullanılmasındaki en temel sebep, ilgili maddelerin faz değişim sürecinde sergiledikleri yüksek ısı enerjisi depolama kabiliyetleridir. Bu maddelerin, birim hacim baz alındığında, duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan maddelere oranla çok yüksek ısı depolama kapasitelerine sahip oldukları görülmektedir. Örneğin, FDM olarak kullanılan  $0,18 \text{ m}^3$  glauber tuzunun faz dönüşüm esnasında depolayabildiği ısı enerjisi miktarı, yaklaşık olarak  $0,72 \text{ m}^3$  suyun depolayabildiği duyulur ısı enerjisi miktarına denk gelmektedir (Dinçer ve Rosen, 2002). Tablo 1.4.'de bazı duyulur ve gizli ısı depolama ortamlarının kütle, hacim ve depolama kabiliyetleri yönünden karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1.4. dikkatle incelenirse,  $10^6 \text{ kJ}$  ısı depolamak için 67 ton taş, 16 ton su, 5,3 ton organik FDM ve 4,3 ton inorganik FDM gerektiği görülebilir. İlgili ısı enerjisi depoları için gerekli hacim ise sırası ile 30, 16, 6,6 ve  $2,7 \text{ m}^3$  olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, birim kütle başına inorganik maddenin depoladığı aynı miktarda enerjiyi depolamak için 15 kat taş ve 6 kat su gerekmektedir. Yapılan karşılaştırma ve ilgili tablo, ısı depolama sistemlerinin FDM kullanımının kütle ve hacimsel yönden avantajlarını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 1.4. Bazı duyulur ve gizli ısı depolama ortamlarının enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması [8]

	Isı depolama ortamı			
	Duyulur ısı depolama		Gizli ısı depolama	
	Taş	Su	Organik FDM	İnorganik FDM
Gizli ısı (kJ/kg)	---	---	190	230
Özgül ısı	1	4,2	2	2
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2240	1000	800	1600
10 <sup>6</sup> kJ ısı enerji depolama için gerekli kütle (kg)	67000	16000	5300	4350
İnorganik FDM'ye göre bağlı kütle	15	4	1,25	1
10 <sup>6</sup> kJ ısı enerji depolama için gerekli hacim (m <sup>3</sup> )	30	16	6,6	2,7
İnorganik FDM'ye göre bağlı hacim	11	6	2,5	1

FDM'ler üzerinde faz geçisi esnasında ısı enerji depolama, daha önce de bahsedilen katı-katı, katı-sıvı ve sıvı-gaz üzere üç farklı faz geçişi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Katı-katı faz değişimi, belirli bir kristal yapıya sahip FDM'nin, katı faz durumunu bozmaksızın farklı bir kristal yapıya bünyesine ısı alarak veya bünyesinden ısı vererek geçmesini ifade etmektedir. İlgili FDM'lerin düşük gizli ısı ve yüksek faz dönüşüm sıcaklıklarına sahip olmaları uygulama alanlarının kısıtlı olmasına neden olmaktadır. Fakat, katı-katı faz dönüşümü gerçekleştirmeleri sebebiyle hacimsel genleşmenin çok düşük olması ve sıvı fazlarda bulunan sızdırma problemlerinin olmayışı gibi avantajları da bulunmaktadır.

Katı-sıvı faz değişimi, katı fazda bulunan FDM'nin bünyesine gizli ısı alarak (ısı depolayarak) sıvı faza geçmesini ifade etmektedir. İlgili geçişi temel alan ve istenilen birçok faz geçiş aralıklarına sahip (çalışma sıcaklıklarına uygun) çok sayıda FDM bulunması ve FDM'lerin kolay ve ucuz temin edilebilir olması, katı-sıvı faz geçişli depolama sistemlerini uygulamada en yaygın tercih edilen sistemler haline getirmektedir.

FDM'lerin tüm bu avantajlarının yanında, faz değişim esnasında hacimsel genişleme ve uzun süreli kullanımda (çok sayıda çevrim sonucunda) termal özelliklerin zayıflaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Literatürde faz geçişi ile ısı depolamanın katı-sıvı faz geçişini ifade ettiği vurgulanmalıdır.

Sıvı-gaz faz değişimi, sıvı fazda bulunan FDM'nin ısı olarak gaz fazına geçişini ifade etmektedir. Sıvı-gaz faz değişimini temel alan sistemler, yüksek sıcaklıkta depolama ihtiyaçlarına karşılık verebilmektedirler. Fakat sıvı fazdan gaz faza geçiş esnasında oluşan büyük orandaki hacimsel genişlemeler, FDM deposu içerisinde yüksek basınçların oluşmasına neden olmaktadır. İlgili durum göz önüne alınarak depo tercihinde, yüksek basınçlara dayanıklı tanklar tercih edilmelidir.

Isıl enerji depolama sistemlerinde FDM kullanılmasının bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar temel olarak şu şekilde sıralanabilir:

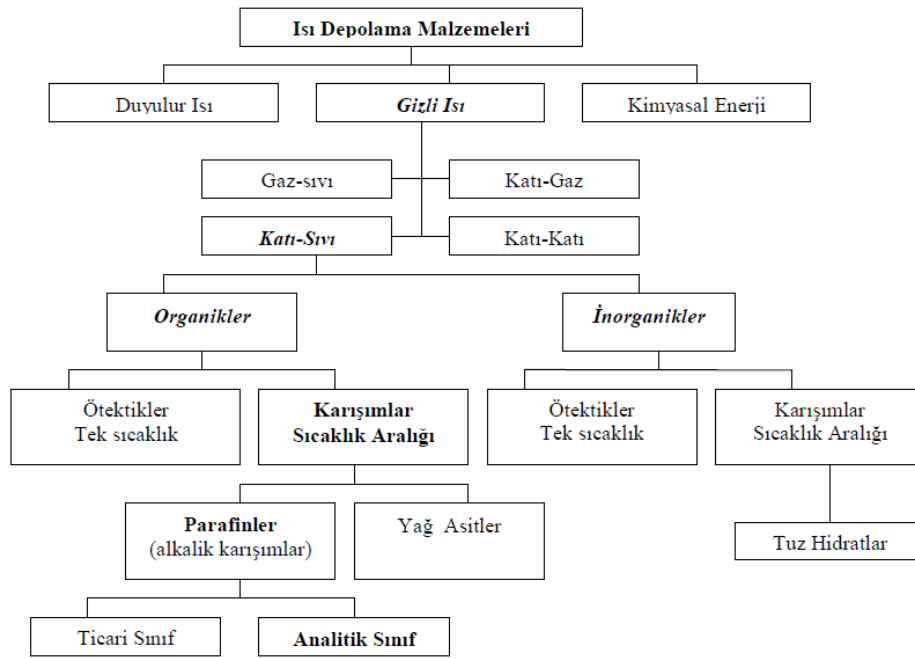
- Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan maddelere oranla yüksek ısı depolama kapasitelerine sahiptirler.
- Duyulur ısı depolama sistemlerine oranla daha küçük depolama hacimlerine gereksinim duymaktadırlar.
- Faz değişimlerinin sabit veya dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesi, bu maddeleri sabit sıcaklık uygulamaları için uygun kılmaktadır.
- Faz dönüşümünün sabit bir sıcaklıkta veya dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesi, enerjilenmiş FDM deposunun çevreye olan ısı kayıplarının, duyulur ısı depolamalı sistemlere oranla düşük seviyelerde kalmasını sağlamaktadır.

FDM kullanımına ait dezavantajlar ise temel olarak şu şekilde sıralanabilir [9].

- Düşük ısıl iletkenlik
- Faz değişim esnasında meydana gelen yoğunluk değişimi
- Uzun süreli kullanımda termofiziksel özelliklerine olumsuz yönde etkilemesi
- Faz ayrışması ve aşırı soğuma

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan FDM'leri organik ve inorganik olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Organik FDM'lere örnek olarak parafinler ve yağ asitleri, inorganik FDM'lere örnek olarak ise tuz hidratları verilebilir. Şekil 1.6.'da gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan FDM'lere ait sınıflandırma verilmiştir. İki grup FDM'nin de termofiziksel ve kimyasal özellikler yönünden birbirlerine göre avantaj ve

dezavantajları bulunmaktadır. İnorganik FDM'lerin, organik FDM'lere oranla yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri, yüksek ısı iletkenlikleri ve daha kolay temin edilebilir olmaları gibi avantajlarının yanı sıra faz ayrışması, aşırı soğuma ve korozif davranış gibi dezavantajları bulunmaktadır. Organik FDM'lerin ise, kararlı kimyasal yapıya sahip olmaları, korozif davranış ve aşırı soğuma göstermemeleri gibi avantajlarına karşın, inorganik FDM'lere oranla düşük gizli ısı depolama kapasiteleri, düşük ısı iletkenlikleri ve yanıcı özellik göstermeleri gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Uygulamalarda kullanılan bazı organik ve inorganik FDM'ler sırasıyla Tablo 1.5. ve Tablo 1.6.'da verilmektedir.



Şekil 1.6. Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması [10].

Tablo 1.5. Bazı organik FDM'lere ait ergime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri [11]

Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)	Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
N-Tetradecane	5,5	226	N-Pentacosane	53,7	164
Formic acid	7,8	247	Myristic acid	54,0	199
N-Pentadecane	10,0	205	Oxolate	54,3	178
Acetic acid	16,7	273	Tristearin	54,5	191
N-Hexadecane	16,7	237	O-Xylene dichloride	55,0	121
Caprilone	40,0	260	Chloroacetic acid	56,0	147
Docasyle bromide	40,0	201	N-Hexacosane	56,3	255
N-Henicosane	40,5	161	Nitro naphthalene	56,7	103
Phenol	41,0	120	a-Chloroacetic acid	61,2	130
N-Lauric acid	43,0	183	N-Octacosane	61,4	134
P-Joluidine	43,3	167	Palmitic acid	61,8	164
Cynamide	44,0	209	Bees wax	61,8	177
N-Docosane	44,5	157	Glyolic acid	63,0	109
N-Tricosane	47,6	130	P-Bromophenol	63,5	86
Hydrocinnamic acid	48,0	118	Azobenzene	67,1	121
Cetyl alcohol	49,3	141	Acrylic Acid	68,0	115
O-Nitroaniline	50,0	93	Dintro toluene (2,4)	70,0	111
Camphene	50,0	239	Phenylacetic acid	76,7	102
Diphenyl amine	52,9	107	Thiosinamine	77,0	140
P-Dichlorobenzene	53,1	121	Benzylamine	78,0	174

Tablo 1.6. Bazı inorganik FDM'lere ait ergime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri [11]

Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)	Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
H <sub>2</sub> O	0,0	333	BI <sub>3</sub>	31,8	10
POCl <sub>3</sub>	1,0	85	SO <sub>3</sub>	32,3	151
D <sub>2</sub> O	3,7	318	TiBr <sub>4</sub>	38,2	23
SbCl <sub>5</sub>	4,0	33	H <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	55,0	213
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10,4	100	SO <sub>3</sub>	62,1	331
IC l(B)	13,9	56	SbCl <sub>3</sub>	73,4	25

Tablo 1.6.'nin devamı

Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)	Materyal	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
MOF <sub>6</sub>	17,0	50	NaNO <sub>3</sub>	307	199
SO <sub>3</sub> (a)	17,0	108	KNO <sub>3</sub>	380	266
IC l(a)	17,2	69	KOH	380	149
P <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	23,7	64	MgCl <sub>2</sub>	800	492
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	26,0	147	NaCl	802	492
C <sub>s</sub>	28,3	15	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	854	275
Ga	30,0	80	KF	857	452
AsBr <sub>3</sub>	30,0	38	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	897	235

Bir FDM-temelli ısı deposu dizaynında en önemli parametrelerden biri uygun faz değiştiren madde seçimidir. İlgili sistemlerde kullanılacak olan FDM'nin, uygun termofiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması gerekmektedir. Gizli ısı depolama sistemine uygun olarak seçilen FDM'nin sahip olması gereken termofiziksel özellikler şu şekilde sıralanabilir [11]:

- FDM'nin faz dönüşüm sıcaklık aralığının sistemin çalışma aralığına uygun olması
- Yüksek gizli ısı depolama kapasitesi
- Gizli ısı depolamaya ek olarak duyulur ısı depolamanın da yüksek miktarda gerçekleşebilmesi için yüksek özgül ısıya sahip olması
- Isı transferinin hızlı bir şekilde gerçekleşebilmesi için hem katı hem sıvı fazda yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması
- Faz dönüşümü esnasında düşük seviyelerde hacimsel genleşme meydana getirmesi
- Faz dönüşüm çevrimlerinde düzgün bir ergime-katılaşma göstermesi

Kimyasal özellikler ise şu şekilde sıralanabilir [11]:

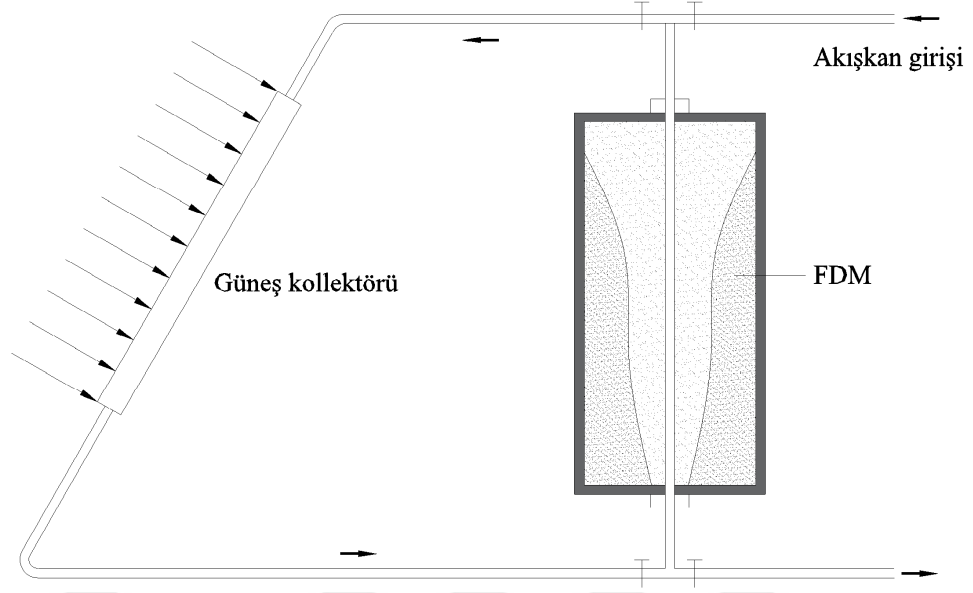
- Kimyasal yapısının stabil olması
- Katı-sıvı ve sıvı-katı faz dönüşümünün tam olarak tersinir gerçekleşebilmesi
- Sahip olduğu özellikleri uzun çevrimler boyunca koruyabilmesi
- Depo gövdesi üzerinde korozif özellikler göstermemesi
- Zehirli, yanıcı ve patlayıcı özellikler taşıması

Isı depolama sistemlerinde FDM kullanımının sahip olduğu birçok avantaj, ilgili sistemlerin geniş bir uygulama alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Tablo 1.7.'de FDM'lerin faz dönüşüm sıcaklık aralıklarına uygun olan bazı uygulamalar, Şekil 1.7.'de ise güneş enerjili FDM ile ısı depolama uygulamasına ait bir örnek şematik olarak verilmiştir.

Tablo 1.7. FDM'lerin faz dönüşüm sıcaklık aralıklarına uygun bazı uygulamalar [12]

Faz dönüşüm sıcaklığı (°C)	Uygulamalar
$5 < T_m < 15$	FDM'nin, elektriğin ucuz olduğu gece saatlerinde bir soğutucu yardımıyla katılaştırılıp, gündüz elektriğin pahalı olduğu saatlerde hacim soğutmasında kullanımı.
$20 < T_m < 35$	Hacimlerin gün içerisindeki (gece-gündüz) sıcaklık değişimlerinden etkilenme düzeyini azaltarak konforlu seviyelerde kalması amacıyla bina duvarlarında yalıtım olarak kullanılması.
$40 < T_m < 60$	Hava bazlı sistemlerde güneş enerjisi yardımıyla gece hacim ısıtmasında kullanılması.
$55 < T_m < 70$	Konutlarda kullanım suyu ısıtmasında kullanılması.
$60 < T_m < 95$	Su bazlı ısıtma sistemlerinde hacim ısıtmak amacıyla kullanılması.
$100 < T_m < 175$	Konsantre güneş enerjili sistemler aracılığı ile absorpsiyonlu bir iklimlendirme sisteminin çalıştırılmasında kullanımı.





Şekil 1.7. FDM ile güneş enerjisi depolama sistemi [11]

### 1.3. Literatür Araştırması

Isıl enerji depolama sistemleri; enerji depolama yöntemleri (duyulur, gizli ve termokimyasal), uygulama alanları (çevre, otomotiv, inşaat, gıda, tekstil, uzay vb.) ve bünyelerinde yer alan farklı donanımlar nedeniyle birçok disiplinin üzerinde çalıştığı bir konu haline almıştır.

Çalışma kapsamında ısıl enerji depolama sistemleri ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması yapılmasına karşın, bu bölümde sadece tez konusu ile doğrudan ilişkili olan FDM-temelli ısıl enerji depolama çalışmalarına yer verilmiştir. İlgili çalışmalar, FDM türü-depo geometrisi ve konum etkisi, ve kanatçık etkisi olmak üzere iki alt başlık altında sunulmuştur.

#### 1.3.1. FDM Türü, Depo Geometrisi ve Konum Etkisi

FDM türünün, depo geometrisi ve konumunun sistem performansı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar özet halinde Tablo 1.8.de ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Tablo 1.8. FDM türü, depo geometrisi ve konum etkisinin incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar

Yazar	Depo geometrisi	FDM	Araştırma konusu
Carlsson ve Wettermark (1979)	Düşey silindirik depo	Kalsiyum Klorür Hekzahidrat	Ergime ve katılma süreçlerinin deneysel olarak incelenmesi
Katayama vd. (1981)	Yatay silindirik depo	Naftalin	Yatay olarak konumlandırılmış silindirik bir depo içerisindeki FDM'nin ergime ve katılma süreçlerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi
Dietz (1984)	Dikdörtgen kesitli depo	Kalsiyum Klorür Hekzahidrat	Çok borulu FDM-temelli bir ısı enerji deposunun ısı performansının, farklı boru çapları ve yerleşim planları için deneysel ve sayısal olarak incelenmesi
Choi vd. (1989)	Düşey silindirik depo	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Akışkan giriş sıcaklığının ve FDM içerisine yapılan su katkı oranlarının faz ayrışması ve ısı geri kazanım süreci üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması
Cao vd. (1991)	Yatay olarak konumlandırılmış, eş merkezli üç borulu silindirik depo	LiH	Eş merkezli olarak yerleştirilmiş üç borulu enerji depolama sisteminin, ısı transfer akışkanının paralel ve karşıt akışlı olmasının ısı depolama sürecine etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Hasan (1994)	Yatay ve düşey silindirik depo	Sterik asit	Silindirik bir forma sahip halka aralık içerisindeki FDM'nin ergime ve katılma süreçlerine yatay ve düşey konumlandırmanın etkisinin deneysel incelenmesi
Akgün vd. (1994)	Düşey silindirik depo	Kalsiyum klorür hekhahidrat	Düşey konumlu silindirik depo içerisindeki kalsiyum klorür hekhahidratın ergime-katılma davranışının farklı akışkan giriş sıcaklık ve debi değerleri için deneysel olarak karşılaştırılması
Esen ve Ayhan (1996)	Düşey silindirik paketli modül	Kalsiyum klörür hekhahidrat, Sodyum sülfat dekahidrat, Parafin, Parafin wax	Farklı türdeki FDM'lerin ısı depolama karakteristikleri üzerindeki etkisinin sayısal incelenmesi

Tablo 1.8.'in devamı

Yazar	Depo geometrisi	FDM	Araştırma konusu
Khilarkara vd. (2000)	Yatay olarak konumlandırılmış dikdörtgen ve dairesel kesitli depo	n-Octadecane	Yatay olarak konumlandırılan farklı halka geometrilerinin enerji depolama karakteristiklerinin sayısal olarak karşılaştırılması
A. Trp (2005)	Düsey silindirik depo	Teknik Parafin	Akışkan giriş sıcaklığı, debisi ve ısı transfer borusunun en boy oranının FDM'nin ergime ve katılma davranışına etkisinin deneysel incelenmesi
Akgün vd. (2007)	Düsey silindirik depo	P1 (MERCK)	Depo dış kabuk açısının ısı depolama performansı üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi
Adine ve Qarnia (2009)	Yatay silindirik depo	P-116	Ardışık FDM yerleşim düzenine sahip bir ısı depolama ünitesinin ısı performansının, farklı akışkan giriş sıcaklık, debi değerlerinde ve depo uzunlukları için sayısal olarak incelenmesi
Longeon vd. (2013)	Düsey silindirik depo	Rubitherm-35	Isı transfer akışkanı yönünün ergime ve katılma sürecine etkisinin deneysel ve sayısal incelenmesi
Başal ve Ünal (2013)	Yatay olarak konumlandırılmış, eş merkezli üç borulu depo	Rubitherm-52	Yatay olarak konumlandırılmış eş merkezli üç borulu ısı deposunun ısı performansının farklı çap oranları için sayısal olarak araştırılması
Avcı ve Yazıcı (2013)	Yatay silindirik depo	Merck/P56-58	Yatay olarak konumlandırılmış halka aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma davranışının farklı akışkan giriş sıcaklıklarında deneysel incelenmesi
Yazıcı vd. (2014a)	Yatay silindirik depo	n-Hexacosane	Yatay silindirik bir depoda, ısı transfer borusunun aşağı yönlü kaçık eksenli olarak konumlandırılmasının ergime sürecine etkisinin incelenmesi
Yazıcı vd. (2014b)	Yatay silindirik depo	n-Hexacosane	Yatay silindirik bir depoda, ısı transfer borusunun yukarı yönlü kaçık eksenli olarak konumlandırılmasının katılma sürecine etkisinin incelenmesi

Tablo 1.8.'in devamı

Yazar	Depo geometrisi	FDM	Araştırma konusu
Hosseini vd. (2014)	Yatay silindirik depo	Rubitherm-50	Farklı akışkan giriş sıcaklıklarının yatay olarak konumlandırılmış halka aralıkta depolanan RT-50'nin ergime ve katılma davranışına etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Mahdi ve Nsofor (2016)	Yatay olarak konumlandırılmış, eş merkezli üç borulu depo	Rubitherm -82	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) nano partikül katkısının sistem performansı üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Pahamli vd. (2016)	Yatay silindirik depo	Rubitherm -50	Silindirik bir halka aralıktaki FDM'nin ergime ve katılma davranışının farklı eksen kaçıklıklarında sayısal olarak test edilmesi
Kousha (2017)	Silindirik depo	Rubitherm -35	Depo yerleşim açısının ve Stefan sayısının şarj ve deşarj süreçlerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

Calrsson ve Wettermark [13], düşey olarak konumlandırılmış silindirik bir halka aralık içerisinde depolanan FDM'nin ergime ve katılma süreçlerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Duyulur ve gizli ısı miktarının belirlenmesine yönelik matematiksel model önermişlerdir.

Katayama vd. [14], yatay silindirik bir hacim içerisindeki naftalinin ergime ve katılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Şarj ve deşarj süreçleri boyunca FDM'ye aktarılan ısı miktarını deneysel olarak belirlemişlerdir. Deşarj süreci için belirlenen ısı geçişi miktarının, sayısal model sonuçları ile uyum içerisinde olduğunu, buna karşın şarj süreci için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların farklılık gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bu uyumsuzluğu, sayısal modelde dikkate alınmayan taşınım etkileriyle ilişkilendirmişlerdir.

Dietz [15], metal bir tank içerisine yerleştirilen kalsiyum klorür heksahidratın ergime ve katılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Tüm süreçler için ısı depolama ünitesinin performansın belirlenmesine yönelik, depo kapasitesi ve tüp hacmi etkisini içerecek formda bir matematiksel model önermiştir.

Choi vd. [16], düşey bir halka aralık hacimde FDM olarak depolanan sodyum difosfat dekahidrat'ın ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) ısı geri kazanım sürecini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, akışkan giriş sıcaklığını (8, 10, 15 ve  $20^\circ\text{C}$ ), su ve  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  karışımlarının çalışma parametresi olarak seçmişlerdir. %37,5-37,75 su katkısının ısı geri kazanım süreci açısından en iyi cevabı verdiğini ortaya koymuşlardır.

Cao vd [17], yatay olarak konumlandırılmış eş merkezli üç borulu bir ısı enerji deposunda orta halka aralıkta depolanan FDM'nin ısı depolama süreçlerini sayısal olarak araştırmıştır. Isı transfer akışkan yönünün araştırma parametresi olarak tanımlandığı çalışmada, karşıt akışlı durumun paralel akışlı duruma kıyasla kısa süreli ısı depolama süreçleri için daha etkin cevap verdiğini ortaya koymuşlardır.

Hasan [18], silindirik bir halka aralıkta depolanan sterik asitin ısı depolama ve geri kazanım süreçlerini deneysel olarak incelemiştir. Akışkan giriş sıcaklığı ( $74^\circ\text{C}$ ,  $78^\circ\text{C}$ ,  $81^\circ\text{C}$ ) ve depo konumunun (yatay ve düşey) ergime ve katılma sürelerine etkisini araştırma parametresi olarak tanımlamıştır. Yatay konumlanmasının düşey konumlandırmaya kıyasla ergime ve katılma sürelerini kısalttığını ortaya koymuştur.

Akgün [19], düşey olarak yerleştirilmiş silindirik bir halka aralıkta depolanan kalsiyum klorür heksahidratın termal performansına ısı transfer akışkanının farklı debi (4, 6 ve 8 kg/dk) ve sıcaklık değerleri ( $60^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  ve  $75^\circ\text{C}$ ) için karşılaştırmıştır.

Esen ve Ayhan [20], silindirik bir tank içerisine yerleştirilmiş belirli çap ve adetlerde silindirik depolardan oluşan ısı depolama ünitesi içerisinde ayrık formda yerleştirilen dört farklı FDM'nin ısı depolama sürecini sayısal olarak incelemiştir. Farklı akışkan giriş sıcaklık ( $35^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$  ve  $50^\circ\text{C}$ ) ve debi değerlerinde (600, 800, 1000, 1100 kg/sa), ilgili dört FDM üzerinde depolanan enerji miktarını zaman bağımlı olarak ortaya koymuşlardır.

Khillarkar vd. [21], saf bir FDM'nin ergime sürecini, yatay olarak konumlandırılan farklı iki halka aralıkta (kare kesitli depo içerisinde silindirik ısı transfer borusu ve dairesel kesitli depo içerisinde yerleştirilen kare kesitli ısı transfer borusu) test etmiştir. Isı deposu üzerinde sırasıyla dış kabuk, ısı transfer borusu ve dış kabuk + ısı transfer borusunda olmak üzere üç farklı ısıtma durumu öngörülmüştür. Birleşik ısıtma durumunun tekil ısıtma durumuna kıyasla daha kısa şarj sürelerine cevap verdiğini ortaya koymuşlardır.

Trp [22], düşey silindirik halka aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma davranışını farklı akışkan giriş sıcaklığı ve debi değerleri için deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Artan akışkan giriş sıcaklığının ( $45^\circ\text{C}$ 'den  $55^\circ\text{C}$ 'ye) ısı depolama süresini, azalan akışkan giriş sıcaklığının ( $20^\circ\text{C}$ 'den  $5^\circ\text{C}$ 'ye) ısı geri kazanım süresini kısalttığını,

akışkan debisinin ise bu süreler üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Akgün vd. [23], düşey silindirik bir aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma davranışını farklı kabuk (depo dış yüzeyi) açıları ( $0^\circ$  ve  $5^\circ$ ) için test etmiştir. Kabuk açısının ısı depolama-geri kazanım karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Önerilen geometrik düzenlemenin, ergime sürecine katılmayan FDM hacmini azalttığını ve ergime sürecini  $\theta=0^\circ$  'ye kıyasla %30 oranında azalttığını belirtmişlerdir.

Adine ve Qarnia [24], yatay olarak konumlandırılan silindirik bir aralıkta, ardışık formda depolanmış farklı özellikteki(ergime sıcaklığı açısından) FDM düzenlemesinin sistem performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir.

Longeon vd. [25], düşey olarak konumlandırılmış silindirik halka aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Isı transfer akışkanının depoya giriş yönünün çalışma parametresi olarak tanımlandığı çalışmada, süre açısından ergime için aşağı yönlü akışın, katılma ise yukarı yönlü akışın daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca ergime ve katılma bölgelerinden görüntüler alınarak fiziksel mekanizma irdelenmiştir.

Başal ve Ünal [26], yatay ve eş merkezli olarak konumlandırılmış halka aralıkta depolanan RT-52'nin ergime sürecini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, akışkan giriş sıcaklığı ( $65, 80$  ve  $90^\circ\text{C}$ ), debisi ( $1, 2$  ve  $3$  kg/s) ve farklı çap oranlarını araştırma parametreleri olarak tanımlamışlardır. Tüm akışkan giriş sıcaklığı ve debi değerlerinde ortak karakter olarak çap oranının azalmasıyla ısı depolama hızının arttığını belirtmişlerdir.

Avcı ve Yazıcı [27], yatay olarak konumlandırılmış halka aralıkta depolanan P56-58'in (MERCK) ergime ve katılma davranışı deneysel olarak incelemiştir. Farklı akışkan giriş sıcaklıkları ( $75, 80, 85^\circ\text{C}$ ) için yapılan testlerde ergime ve katılma sürelerinin ergime ve katılma sürecine katılmayan FDM'ye bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Yazıcı vd. [28], yatay olarak konumlandırılmış silindirik bir halka aralıkta depolanan n-hexacosane'nin ergime davranışını, farklı eksen kaçıklıkları ve akışkan giriş sıcaklıkları ( $75, 80$  ve  $85^\circ\text{C}$ ) için deneysel olarak incelemiştir. Akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak aşağı yönlü eksen kaçıklığının eş merkezli düzenlemeye kıyasla ergime süresini %67 düzeyinde kısalttığını belirtmişlerdir. Aynı geometri için katılma davranışının

incelendiği diğer bir çalışmada ise, Yazıcı vd. [29], eş merkezli duruma kıyasla kaık eksenli geometrik düzenlemenin daha uzun katılaşma süreleri sunduğunu belirtmişlerdir.

Hosseini, M., J., vd., [30], yatay konumlu silindirik bir halka aralıkta depolanan RT-50'nin ergime ve katılaşma sürelerini farklı akışkan giriş sıcaklıkları altında (70, 75 ve 80°C) deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Akışkan giriş sıcaklığının artışına bağlı olarak ergime süresinin 80°C giriş sıcaklığına kıyasla sırasıyla %81,1 ve %88,4'e düştüğünü belirtmişleridir.

Mahdi, M., J., ve Nsofor, E., C., [31], yatay olarak konumlandırılan  borulu bir ısı depo geometrisinde, RT-82'nin katılaşma davranışını farklı nanopartikül ( $Al_2O_3$ ) katkı oranlarında incelemiştir. Nanopartikül katkı oranının FDM içerisindeki iletimi önemli düzeyde değiştiridiğini ve buna bağlı olarak FDM'nin katılaşma süresini önemli düzeyde kısalttığını belirtmişlerdir.

Pahamli vd. [32], yatay olarak yerleştirilmiş silindirik bir depo içerisinde depolanan RT-50 nin ısı depolama sürecini farklı eksen kaçıklıkları için sayısal olarak incelemiştir. Yazıcı vd. (2014a) alışmasıyla benzer olarak aşağı yönlü artan eksen kaçıklığının ergime süresini %64'e kadar kısalttığını belirlemiştir.

Kousha vd. [33], silindirik bir aralık içerisinde depolana FDM'nin farklı depo konumları (0°, 30°, 60°, 90°) ve Stefan sayılarındaki ısı davranışını ve sistem performansı üzerindeki etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmıştır. Depolanan ve geri kazanılan ısı miktarı açısından, en kısa ergime ve katılaşma sürelerinin sırasıyla, yatay ve düşey geometrilerde ulaşıldığını belirlemişlerdir.

### 1.3.2 Kanatçık Etkisi

FDM-temelli ısı enerji depolama sistemlerinin ısı performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli unsur, FDM'nin sahip olduğu düşük ısı iletkenliktir. Bu olumsuzluğun giderilmesine yönelik literatürde sunulan zmler; FDM içerisine metal partikül ilavesi, mikrokapsülleme ve genişletilmiş yüzey (kanatçık) olarak sıralanabilir. Kanatçık etkisini dikkate alan çalışmalar detaylı bir şekilde Tablo 1.9.'da sunulmaktadır.

Tablo 1.9 Kanatçık geometrisi ve diziliminin etkisi üzerine yapılan çalışmalar

Yazar	Depo geometrisi	FDM	Araştırma konusu
Choi vd. (1992)	Düşey silindirik depo	Magnezyum klorür heksahidrat	Kanatçık ilavesinin ısı enerji depolama karakteristikleri üzerindeki etkisinin deneysel incelenmesi
Lacroix vd. (1992)	Yatay silindirik depo	n-Oktadekan	Kanatçık yerleşim düzeninin ısı performans üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Ismail vd. (2001)	Düşey silindirik depo	Parafin (55-57°C Ergime nok.)	Kanatçık geometrisi ve depo en boy oranının ısı geri kazanım üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Stritih vd. (2004)	Dikdörtgen kesitli depo	Rubitherm-30	İç yüzeyi dikdörtgen kesitli kanatçıklarla iliştilmiş düşey konumlu bir ısı depolama ünitesinin ısı performansının farklı Fourier sayıları için test edilmesi
Mosaffa vd. (2012)	Düşey silindir/dikdörtgen depo	Kalsiyum klorür heksahidrat	Aynı hacme ve ısı transfer yüzey alanına sahip düşey konumlandırılmış dairesel ve dikdörtgen kesitli ısı depolarının ısı performanslarının farklı kanatçık geometrileri için karşılaştırılması
Mat vd. (2013)	Yatay olarak konumlandırılmış, eş merkezli üç borulu depo	Rubitherm-82	Isıtma koşulu ve kanatçık uzunluğunun depolama karakteristikleri üzerinde etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Abduljalil vd. (2014)	Yatay olarak konumlandırılmış, eş merkezli üç borulu depo	Rubitherm -82	FDM-temelli bir ısı deposunun ısı performansının farklı kanatçık düzenlemeleri, akışkan giriş sıcaklıkları ve debi değerleri için deneysel olarak incelenmesi
Rathod ve Banerjee (2015)	Düşey silindirik depo	Sterik asit	Farklı akışkan giriş sıcaklıkları için, ısı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumlarının (dikdörtgen kesitli, eksenel doğrultuda üç kanatçık), FDM'nin ergime ve katılma süreleri üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi



Tablo 1.9'un devamı

Yazar	Depo geometrisi	FDM	Araştırma konusu
Sciacovelli vd. (2015)	Düşey silindirik depo	Parafin (55-60)	Isı transfer borusu üzerine farklı adet ve şekillerde yerleştirilen Y profilli kanatçıkların yerleşim düzeni ve sayısının ısı performans üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Li ve Wu (2015)	Yatay silindirik depo	Saf NaNO <sub>3</sub> ve kompozit NaNO <sub>3</sub>	Saf NaNO <sub>3</sub> ve kompozit NaNO <sub>3</sub> 'ün ergime ve katılma davranışının kanatçıklı ve kanatçıksız depo durumları için sayısal olarak incelenmesi
Jmal ve Baccar. (2015)	Düşey olarak konumlandırılmış, eş merkezli 3 borulu depo	C <sub>18</sub>	Düşey olarak konumlandırılmış eş merkezli üç borulu bir ısı deposunda farklı kanatçık yerleşim düzenlerinin deşarj karakteristikleri üzerindeki etkisinin sayısal incelenmesi
Khan (2016)	Yatay silindirik depo	Parafin (41-44)	FDM deposu içerisine yerleştirilen farklı sayı, uzunluk ve dizilimlere sahip U profilli ısı transfer borusunun kanatçıklı ve kanatçıksız durumlarının sistem performansı üzerindeki etkisinin sayısal olarak incelenmesi
Darzi vd. (2016)	Yatay silindirik depo	n-Eicosane	Nanopartikül katkı oranı, kanatçık ilavesi ve kesit geometrisinin şarj ve deşarj süreçlerine etkisinin sayısal olarak incelenmesi

Choi vd. [34], düşey bir halka aralık içerisinde depolanan magnezyum klorür heksahidratın katılma davranışını kanatçıklı ve kanatçıksız durumları için deneysel olarak karşılaştırmıştır. Kanatçıklı durumun kanatçıksız duruma kıyasla ısı performansı 3,5 kat arttırdığını belirtmişlerdir.

Lacroix [35], yatay olarak konumlandırılan silindirik aralıktaki n-octadecane'nin ısı depolama davranışını, farklı akışkan giriş sıcaklık ve debi değerleri için incelemişlerdir. Çalışmada kanatçıksız ve kanatçıklı olmak üzere iki geometrik düzenleme sayısal olarak incelenmiştir. Choi vd. [34],'nin çalışmasına benzer şekilde kanatçık ilavesinin ısı transferini önemli düzeyde iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır.

İsmail vd. [36], düşey olarak konumlandırılmış bir ısı deposu ve üzerine eksenal kanatçıklar yerleştirilmiş bir ısı transfer borusundan oluşan ısı depolama-geri kazanım ünitesinin soğutma performansını sayısal olarak incelemiştir. Kanatçık sayısı, uzunluğu, kalınlığı ve depo en boy oranını araştırma parametresi olarak tanımlamışlardır. Artan kanatçık sayısı ve uzunluğunun katılma süresini belirgin bir şekilde kısalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, depo en boy oranının 2'den 5'e çıkarılması durumunda katılma süresinin 8 kat kısaldığını belirtmişlerdir.

Stritih vd. [37], dikdörtgen kesitli bir depo ve düşey doğrultuda belirli aralıklarla yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli kanatçıklardan oluşan bir ısı depolama ünitesinin sistem performansını deneysel olarak incelemiştir. Kanat etkinliğini Fourier sayısına bağlı olarak ortaya koymuşlardır. Ergime sürecinde artan Fourier sayısı ile birlikte kanat etkinliği artarken, katılma sürecinde ise belirsiz bir davranış göstermiştir.

Mosaffa vd. [38], aynı hacme ve ısı transfer yüzey alanına sahip düşey konumlu, dairesel ve dikdörtgen kesitli ısı depolarına, depo kesitleri ile eş (dairesele ve dikdörtgen), yatay kanatçıklar ekleyerek oluşturdukları ısı enerjisi deposunun ısı geri kazanım performansını analitik olarak incelemiştir. Dairesel kesitli ısı deposunun soğutma performansının dikdörtgen kesitliye oranla daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Mat vd. [39], yatay ve eş merkezli üç borulu bir ısı deposunun, orta bölgesine yerleştirilen FDM'nin ergime sürecini sayısal olarak incelemiştir. FDM nin depolandığı bölgenin yüzeylerinde üç farklı ısıtma koşulu öngörölmüş (iç, dış, iç ve dış) ve bu yüzeylere her bir ısıtma koşulu için eksenal doğrultuda iliştirilen farklı uzunluktaki dikdörtgen kesitli kanatçıkların ısı performans üzerindeki etkisini test etmişlerdir. ısıtma koşulu ve kanatçık uzunluğuna bağlı olarak doğal taşınım mekanizmasının ısı geçişi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. İç ve dış yüzeylerden ısıtma yapılması durumunda, 42 mm kanat uzunluğu için ergime süresinin, kanatçiksız duruma göre %43,3 kısaldığını belirtmişlerdir. Benzer depo geometrisi için akışkan giriş sıcaklığı ve debisinin sistem performansı üzerindeki etkisi, ergime ve katılma süreci için Abduljalil vd. (2014) tarafından incelenmiştir.

Abduljalil A., A., vd., [40], yatay olarak konumlandırılmış eş merkezli üç borulu bir ısı deposunun orta bölgesine yerleştirilen FDM'nin ergime sürecini farklı akışkan giriş sıcaklıkları (84, 90 ,95 ve 100°C) ve debi değerleri (4, 8 ve 16 kg/dk) altında deneysel olarak incelemiştir. Artan akışkan giriş sıcaklık değeri ile ergime sürelerinin %86'ya, artan akışkan debisiyle ise %58'e varan düzeylerde kısaldığını belirtmişlerdir. Ergime

süresi üzerinde akışkan giriş sıcaklığının, debiye oranla daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Rathod ve Banerjee [41], düşey olarak konumlandırılmış bir halka aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma sürelerini, ısı transfer borusunun kanatçıklı (dikdörtgen kesitli üç kanatçık) ve kanatçıksız durumları için deneysel olarak karşılaştırmıştır. Isı transfer giriş sıcaklığının 80°C ve 85°C değerleri için ergime sürelerinin kanatçıksız duruma kıyasla sırasıyla %12,5 ve %24,52 oranlarında azalma gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca her bir akışkan giriş sıcaklığı için kanatçık ilavesinin katılma süresini %46 düzeyinde azalttığını ortaya koymuşlardır.

Sciacovelli vd. [42], Y formunda kanatçık profiline sahip, silindirik bir ısı deposunun ısı performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, kanatçık sayısı ve profilinin dizilimi çalışma parametresi olarak seçilmiştir. Kanatçık profillerindeki optimizasyon Y-profilli kanatçıkların farklı şekillerde çatallandırılması ile elde edilmiş olup bu profillerin ergime-katılma davranışına etkisini araştırmışlardır. Kısa süreli çalışma aralıkları için geniş açılı kanatçık profilinin, dar açılı profillere kıyasla daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Li ve Wu [43], yatay olarak yerleştirilmiş silindirik bir halka aralıkta saf  $\text{NaNO}_3$  ve kompozit  $\text{NaNO}_3$  ün ergime ve katılma davranışını sayısal olarak incelemiştir. Isı transfer borusunun kanatçıksız ve kanatçıklı durumları için iki farklı ısı transfer akışkanı türü (sentetik yağ ve eriyik tuzun) kullanımında ve farklı akışkan debilerinde karşılaştırma testleri yapmışlardır. Saf  $\text{NaNO}_3$  kullanılması durumunda kanatçıklı durum için kanatçıksız duruma kıyasla ergime ve katılma sürelerinin %14 oranında azaldığını, kompozit  $\text{NaNO}_3$  kullanılması durumunda ise %20 oranında azaldığını ortaya koymuşlardır.

Jmal ve Baccar [44], düşey olarak konumlandırılmış bir halka aralıkta (eş merkezli üç borulu sistem) depolanan FDM nin ergime davranışını sayısal olarak incelemiştir. Halka aralığın iç ve dış yüzeylerine farklı sayılarda yerleştirilen dairesel kesitli kanatçıkların katılma süreci üzerindeki etkisini test etmişlerdir. Artan kanatçık sayısı ile katılma sürelerinin kısaldığını, eklenen kanatçık sayısının dokuzu aşması durumunda ise doğal taşınım mekanizmasının etkisini yitirmesi sebebiyle katılma sürelerinin değişmediğini belirtmişlerdir.

Khan vd. [45], yatay konumlu silindirik bir ısı deposunun ısı performansını, kanatçık uzunluğu, kanatçık kalınlığı, ısı transfer borusu ve sayısı olmak üzere geniş bir parametre aralığında sayısal olarak incelemiştir. Depo içerisinden geçen ısı transfer boru

sayısının 12'den 21'e çıkması durumunda ergime süresinin %48,5, kanat uzunluğunun 12,7 mm'den 38,1 mm'e çıkması durumunda %57, 32, kanatçık kalınlığının 1 mm'den 5 mm'ye çıkması durumunda ise %5,7 oranında kısaldığını ortaya koymuşlardır.

Darzi vd. [46], yatay olarak konumlandırılmış silindirik bir halka aralıkta depolanan FDM'nin ergime ve katılma davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Isı transfer borusu üzerine farklı sayılarda, eksenel doğrultuda eklenen farklı sayıdaki dikdörtgen kesitli kanatçıkların ve FDM içerisine ilave edilen nano partiküllerin ergime ve katılma süreçlerine etkisini araştırmıştır. Artan kanatçık sayısı ile ergime ve katılma sürelerinin, kanatçiksız duruma kıyasla sırasıyla %82 ve %85'e varan oranlarda, artan nanopartikül yüzdesi ile ise sırasıyla %46 ve %16'ya varan oranlarda azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, ısı transfer borusunun, farklı en-boy oranlarına ve yukarı yönlü eliptik kesite sahip olmasının, ergime süresini kısaltırken katılma süresini uzattığını belirtmişlerdir.

Yukarıdaki literatür çalışması dikkatli bir şekilde incelendiğinde, araştırmacıların sabit kesit geometrisine sahip kanatçıklar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. İlgili çalışmalarda, kanatçık sayısı, yerleşim düzeni ve kanatçık profili değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır. Avcı ve Yazıcı [27], yatay konumlu silindirik ısı deposu çalışmalarında, FDM'nin ergime ve katılma davranışı üzerinde doğal taşınım mekanizmasının belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Yapılan literatür araştırması, ilgili mekanizmanın kanatçık dizaynında dikkate alınmadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmayla literatürde ilk kez kanatçık profilinde değişime gidilerek doğal taşınım mekanizmasının ısı depolama karakteristikleri üzerindeki etki düzeyi ortaya konacaktır.

#### **1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Kısıtlı sürelerde var olan termal enerjinin, ihtiyaç olduğu durumlarda kullanılmak üzere mümkün olan en kısa sürede depolanması, sistem verimliliği açısından büyük öneme sahiptir. Katı-sıvı faz dönüşümünü temel alan gizli ısı depolama sistemlerinde, depolama sürelerinin en aza indirgenmesi, depo içerisindeki FDM'nin tümünün ilgili süre içerisinde faz dönüşümünü gerçekleştirmesini gerektirmektedir. İlgili sistemlerdeki bu gereksinime karşın, FDM'lerin düşük ısıl iletkenliğe sahip olması, ısı kaynağı ile FDM arasındaki ısı transferinin düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluk, kısıtlı süre var olan ısıl enerjinin ilgili zaman aralığında depolanmasına engel olmakta ve sistemin ısıl

veriminin düşürmektedir. Bu olumsuzluğun giderilmesine yönelik sistemler üzerinde aktif ve pasif iyileştirmeler yoluna gidilmektedir. Aktif iyileştirmeler, ısı transfer akışkan sıcaklığının ve debisinin artırılması yoluyla sisteme birim zamandaki enerji girdisinin artırılmasını kapsamaktadır. Pasif iyileştirmelerse, ısı transfer yüzeyinin genişletilmesi (kanatçık ilavesi, metal köpük kullanımı vb.), FDM içerisine nanopartikül ilavesi yapılarak ısı iletiminin iyileştirilmesi gibi sisteme dışarıdan ek bir güç ilavesi gerektirmeksizin yapılan iyileştirmeleri kapsamaktadır. Isı depolama sistemi üzerinde yapılacak aktif iyileştirmenin ısı kaynağının gücüne bağlı olması, pasif iyileştirme yöntemlerini daha etkili kılmaktadır.

Literatür araştırmasında da belirtildiği gibi, ısı transferinin iyileştirmesine yönelik yapılan kanatçık ilavelerinde, farklı kanatçık profil, sayı ve kalınlık etkilerinin dikkate alınmasına karşın, depo içerisindeki ergime-katılma davranışları dikkate alınmaksızın sabit kesit geometrileri üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Bu bağlamda, literatürde ilk kez, yukarıda belirtilen eksiği gidermeye yönelik sabit kanatçık profilinden ısı transfer yüzey alanını korumak şartıyla değişikliğe (FDM'nin faz dönüşüm davranışı gözlemlenerek) gidilerek ısı depolama sürelerinin kısaltılması hedeflenmiştir.

Tez kapsamında, düşey silindirik bir aralıkta depolanan FDM'nin şarj vedeşarj süreçleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, ısı transfer borusuyla iliştilen kanatçıkların farklı kenar oranları ( $a/b = 20/20, 15/25, 10/30, 5/35, 0/40$ ) değişken parametre olarak tanımlanmış ve ilgili süreçlere etkisi farklı akışkan giriş sıcaklıkları (şarj için  $T_g = 75, 80, 85^\circ\text{C}$ ,deşarj için  $25^\circ\text{C}$ ) altında araştırılmıştır. Her bir süreç için depo içerisinde farklı yerel istasyonlarda radyal ve aksenal yönde zaman bağımlı sıcaklık ölçümleri yapılmış ve oluşturulan sıcaklık haritaları üzerinden kanatçık kenar oranının ergime ve katılma süreleri üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, düşey olarak konumlandırılmış, silindirik bir halka aralık içerisindeki faz değıştiren maddenin (FDM) ısı depolama (şarj), ısı geri kazanım (deşarj) süreçleri deneysel olarak incelenmiştir. Halka aralık (depo geometrisi), taban ve tavan yüzeylerinden sınırlandırılmış, eş merkezli, silindirik bir dış kabuk ve ısı transfer borusu formunda tasarlanmıştır. Isı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı (5 farklı kanatçık kenar oranı için) durumları için şarj vedeşarj süreçlerine ait performans testleri gerçekleştirilmiştir.

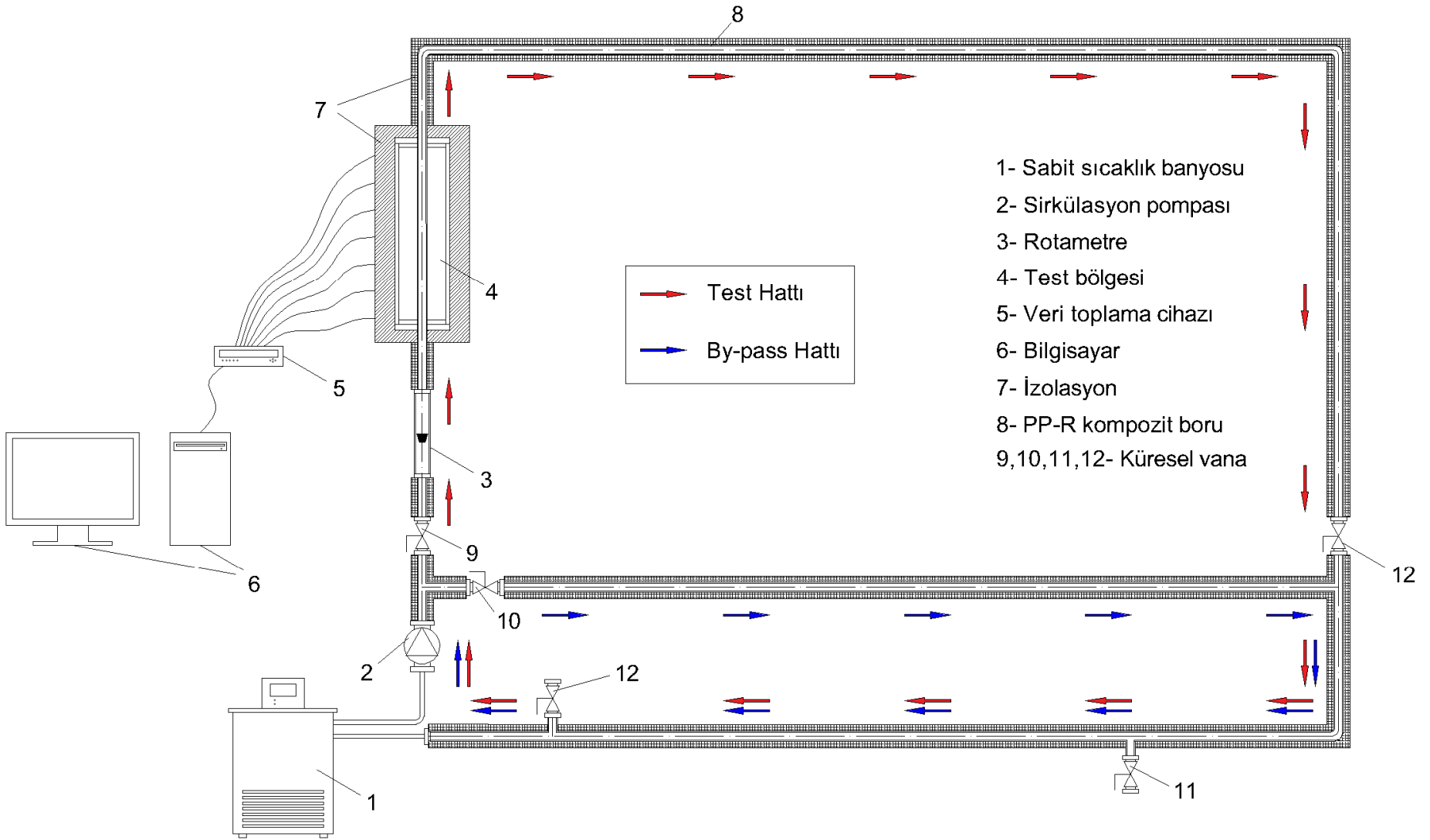
Deneylerde ısı transferi akışkanı olarak saf su, FDM olarak ise 50°C - 58°C faz dönüşüm sıcaklığı aralığına sahip ticari bir parafin olan Merck/107337 kullanılmıştır. Her bir kanatçık profili için, sabit hacimsel debide ( $Q=300$  l/h) ve akışkan giriş sıcaklığının farklı değerlerinde (şarj için  $T_g = 75^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $85^\circ\text{C}$ ,deşarj için  $T_g = 25^\circ\text{C}$ ) şarj vedeşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir.

İlgili deneyler esnasında, test bölgesi ve FDM içerisinde zaman bağımlı yerel sıcaklık ölçümleri yapılarak oluşturulan sıcaklık haritaları üzerinden kanatçık profilinin ve akışkan giriş sıcaklığının ergime ve katılma süreleri üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

### 2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

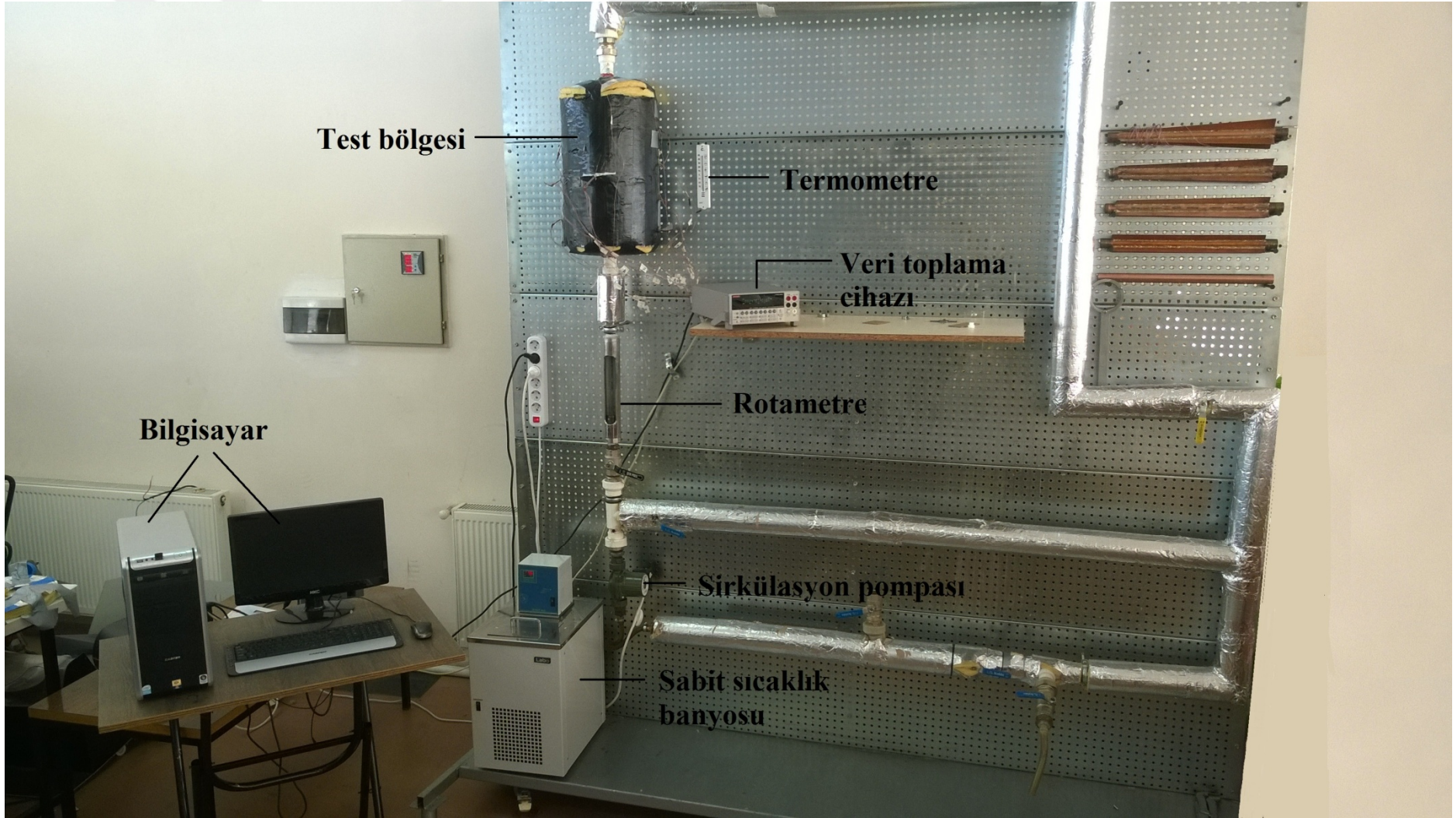
Düşey konumlu, FDM-temelli bir ısı deposunun ısı performans testine yönelik tasarlanan ve kurulan deney düzeneğinin şematik resmi ve fotoğrafı sırası ile Şekil 2.1. ve 2.2.'de verilmektedir.

Deney düzeneği temel olarak, akış sistemi, test bölgesi ve ölçüm sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Akış sistemi, ısı transfer akışkanının istenilen debi ve sıcaklıkta şartlandırılmasını sağlayan borulama sistemidir. Bu borulama sistemi test hattı ve by-pass hattı olmak üzere iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Her bir bölümün görevi ve bileşenleri şu şekilde tanımlanabilir.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik resmi





Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğrafı.



Test hattı, şarj ve deşarj deneylerinin gerçekleştirildiği ana hattır. Isı transfer akışkanının test hattında izlediği yol Şekil 2.1'de kırmızı renkli oklarla gösterilmiştir. Test hattı, ısı transfer akışkanını şartlandıran (ısıtma ve soğutma) bir sabit sıcaklık banyosundan, ısı transfer akışkanının hatlarda dolaşımını sağlayan için bir sirkülasyon pompasından, akışkan debisinin ölçülmesi için bir rotametre ve küresel vanalar içeren bir borulama sisteminden oluşmaktadır.

By-pass hattı, ısı transfer akışkanının test bölgesine yönlendirilmeden önce istenilen sıcaklık değerine ulaşmaya kadar dolandırıldığı hattır. Isı transfer akışkanının by-pass hattında izlediği yol Şekil 2.1.'de mavi renkli oklarla gösterilmiştir. By-pass hattı ana bileşenler olarak, sabit sıcaklık banyosundan, küresel vanalardan ve yalıtılmış borulardan oluşmaktadır. Gerekli hallerde ısı transfer akışkanının akış hattından tahliye edilebilmesi için by-pass hattı bünyesinde harici bir çıkışa yer verilmiştir. Akış hattında yer alan tüm borulama bileşenlerinde yüksek sıcaklıklara dayanımlı, 40 mm iç çapa sahip PP-R kompozit malzeme tercih edilmiştir. İlgili bileşenlerin montajında, vidalama ve kaynaklı birleştirme tekniği uygulanmıştır. Oluşturulan sistem, özel olarak tasarlanmış vidalı kelepçelerle Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi çelik gövde üzerine sabitlenmiştir. Ayrıca akış sistemi üzerinden çevreye gerçekleşecek ısı kaybını azaltmak amacı ile tüm boru yüzeyleri ve bağlantı elemanları, belirli kalınlıklardaki cam yünü yalıtım malzemesi ( $k=0,04$  W/mK) ile kaplanmıştır.

Test bölgesi, ısı enerjisinin depolandığı ve geri kazanıldığı bölgedir. Bu bölge ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki alt başlıkta verilecektir..

Ölçüm sistemi ise rotametre, termoeleman çiftleri, veri okuma-derleme sistemi ve bilgisayardan oluşmaktadır.

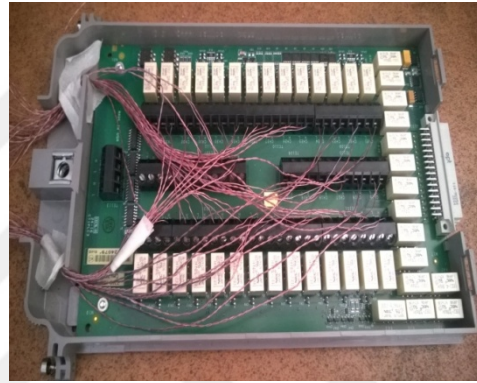
Deneyleerde, hacimsel debi ve sıcaklık olmak üzere iki ana büyüklük zaman bağımlı olarak ölçülmüştür. Hacimsel debi ölçümü ve kontrolü, test hattı üzerine yerleştirilen standart tip rotametre ve küresel vana ile gerçekleştirilmiştir. Zaman bağımlı yerel sıcaklık ölçümleri ise sırasıyla, test hattı ve by-pass hattı üzerinde iki farklı istasyonda, test bölgesi üzerinde ise 37 farklı istasyonda gerçekleştirilmiştir. Akış sistemi ile iliştilen termoelemanların konumları Şekil 2.1.'de verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, 0,1 inç çap ve 0,2°C okuma hassasiyetine sahip T-tipi (bakır-konstantan) teflon izoleli termoeleman çifti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Termoelemanların her biri, ilgili istasyona yerleştirilmeden önce 0,03°C hassasiyete sahip sabit sıcaklık kalibrasyon banyosunda test

edilmiş ve uçları reçine banyosuna daldırılmak sureti ile elektriksel iletkenliğe karşı izole edilmiştir.

Deneyleer boyunca, sıcaklık ölçüm noktalarında termoeleman çiftleri üzerinden okunan sıcaklık verileri Keithley 7702 model 40 kanallı veri toplama kartında(Şekil 2.3b) toplanmış ve Keithley 2701 integra serisi veri toplama cihazı vasıtasıyla(Şekil 2.3a) bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kullanılan veri toplama cihazının "cold junction" özelliği sayesinde cihaz üzerinde herhangi bir referans sıcaklık kontrolü gerektirmeksizin ölçümler gerçekleştirilebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.3. Keithley 2701 veri toplama cihazı (a), Keithley 7702 veri toplama kartı (b)

Sıcaklık ölçümleri birer dakikalık zaman adımı aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Her bir zaman adımı için kanallar arası geçiş süresi 0,1 saniye olarak tanımlanmış ve ilgili süre içerisinde alınan 15 ölçümün ortalaması o kanalın sıcaklık değeri olacak şekilde bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ölçüm sisteminde yer alan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri Tablo 2.1.'de verilmiştir.

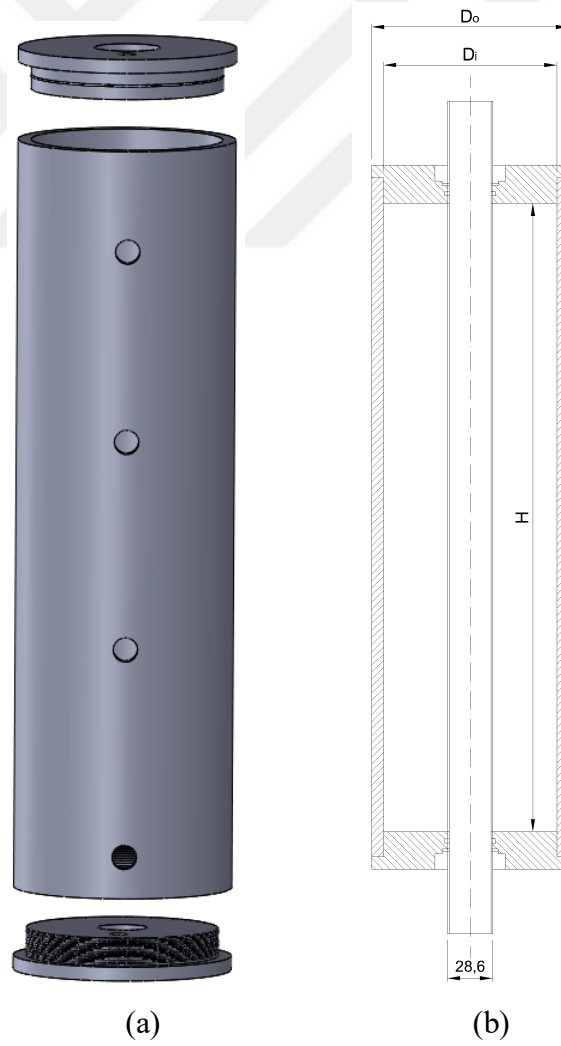
Tablo 2.1. Kullanılan ölçüm cihazları ve cihazların özellikleri

Ölçüm cihazı	Cihaz kodu	Hassasiyeti
Sabit sıcaklık banyosu	Labo CX-100	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Veri toplama cihazı/kartı	Keithley 2701 Integra /Keithley 7702	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}$
Rotametre	Y-G10-25	$\pm 0,05\text{L/dk}$

## 2.2. Test Bölgesi

Test bölgesi ana bileşen olarak, gövde (kabuk), silindirik forma sahip bir ısı transfer borusu ve iki adet flanştan oluşmaktadır (Şekil 2.4.). Her bir bileşen, bağlantı yüzeylerine o-ring ve sıvı conta kullanılarak vidalama tekniği ile birleştirilmiştir. Faz değiştiren madde, modüler olarak imal edilen bir halka aralık içerisinde depolanmaktadır.

Gövde ve flanş malzemesi olarak, 125 mm dış çapa ve düşük ısı iletim katsayısına sahip ( $k=0,2$  W/mK) polipropilen malzeme tercih edilmiştir. Böylelikle çevreye olan ısı kaybının ve gövde içerisindeki aksel iletimin en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Gövde üzerinden dış ortama gerçekleşecek ısı kaybının azaltılması için gövde üzerinde 10 cm kalınlığında cam yünü izolasyonu kullanılmıştır. Gövdenin imalatında klasik talaşlı imalat tekniği kullanılmıştır.



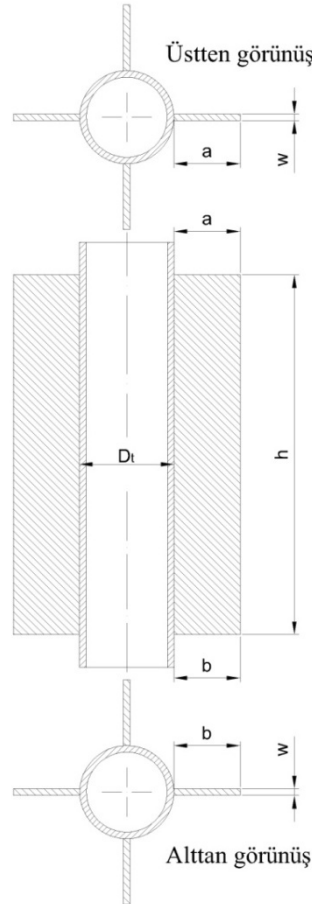
Şekil 2.4 Test Bölgesi, demontaj resmi (a), kesit resmi (b).

Tablo 2.2 Gövde ve ısı transfer borusuna ait geometrik karakteristikler

Gövde dış çapı, $D_o$ (mm)	Gövde iç çapı, $D_i$ (mm)	Depo uzunluğu, $H$ (mm)	Isı transfer borusu dış çapı, $D_t$ (mm)
125	110	400	28,6

Isı transfer borusu, ısı transfer akışkanı ve faz değiştiren madde arasında ısı transfer yüzeyi olarak görev yapan elemandır. Gövde ve ısı transfer borusuna ait geometrik karakteristikler Tablo 2.2.'de sunulmuştur.

Isı transfer borusunda kanatçiksız ve kanatçıklı olmak üzere iki farklı düzenlemeye gidilmiştir. Kanatçıklı durumda ısı transfer borusu, çevresel yönde  $90^\circ$  yerleşim aralığına sahip 4 kanatçıkla kaynaklı birleştirme tekniği kullanılarak iliştilmiştir. Kanatçık geometrisi olarak, taban ve tavan genişlikleri farklı 5 kanatçık profili test edilmiştir (Şekil 2.5. ve Tablo 2.3.). Her bir kanatçık profiline ait şematik resim Şekil 2.6.'da verilmektedir. Burada, her bir kanatçık profilinin aynı ısı transfer yüzey alanına sahip olduğu belirtilmelidir.

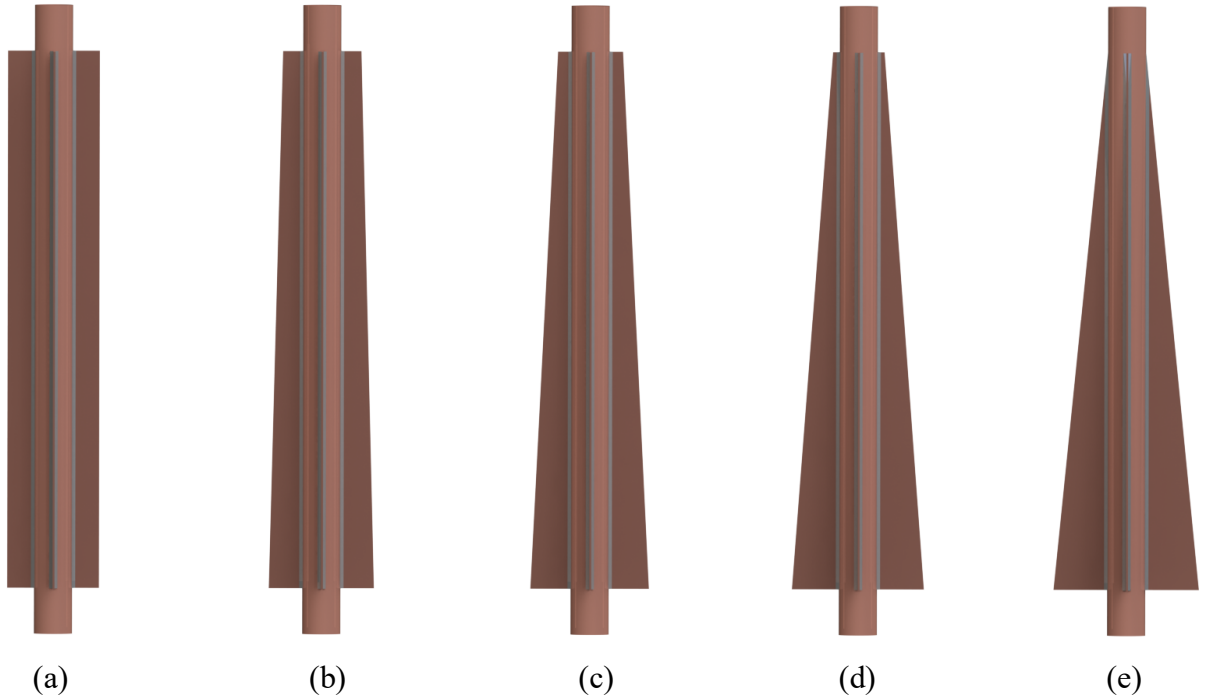


Şekil 2.5. Kanatçıklara ait geometrik karakteristikler

Tablo 2.3 Farklı kanatçık profillerine ait geometrik karakteristikler

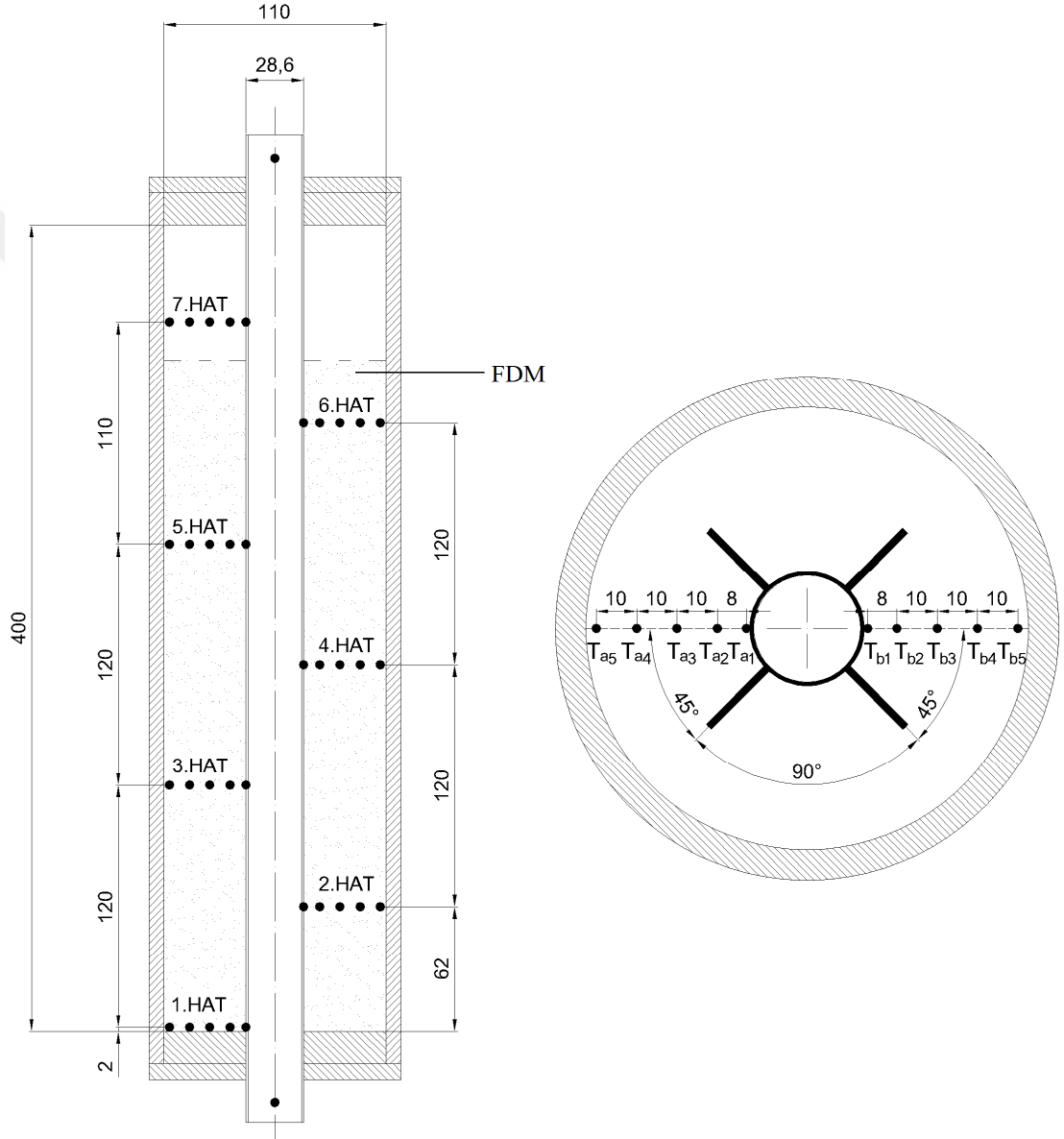
Kanat tavan genişliği, a (mm);	Kanat taban genişliği, b (mm);	Kanat uzunluğu, h (mm)	Kanat kalınlığı w (mm)
20	20	400	1,5
15	25	400	1,5
10	30	400	1,5
5	35	400	1,5
0	40	400	1,5

Kanatçıkların kaynak işlemleri, yüksek bakır oranına sahip Fortebraze marka bakır kaynak çubukları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle ısı transfer borusu ve kanatçıklar arasındaki ısı direnç en aza indirgenmiştir. Hem ısı transfer borusu hem de kanatçıklar aynı bileşime sahip bakır malzemeden ( $k = 401 \text{ W/mK}$ ) imal edilmiştir.

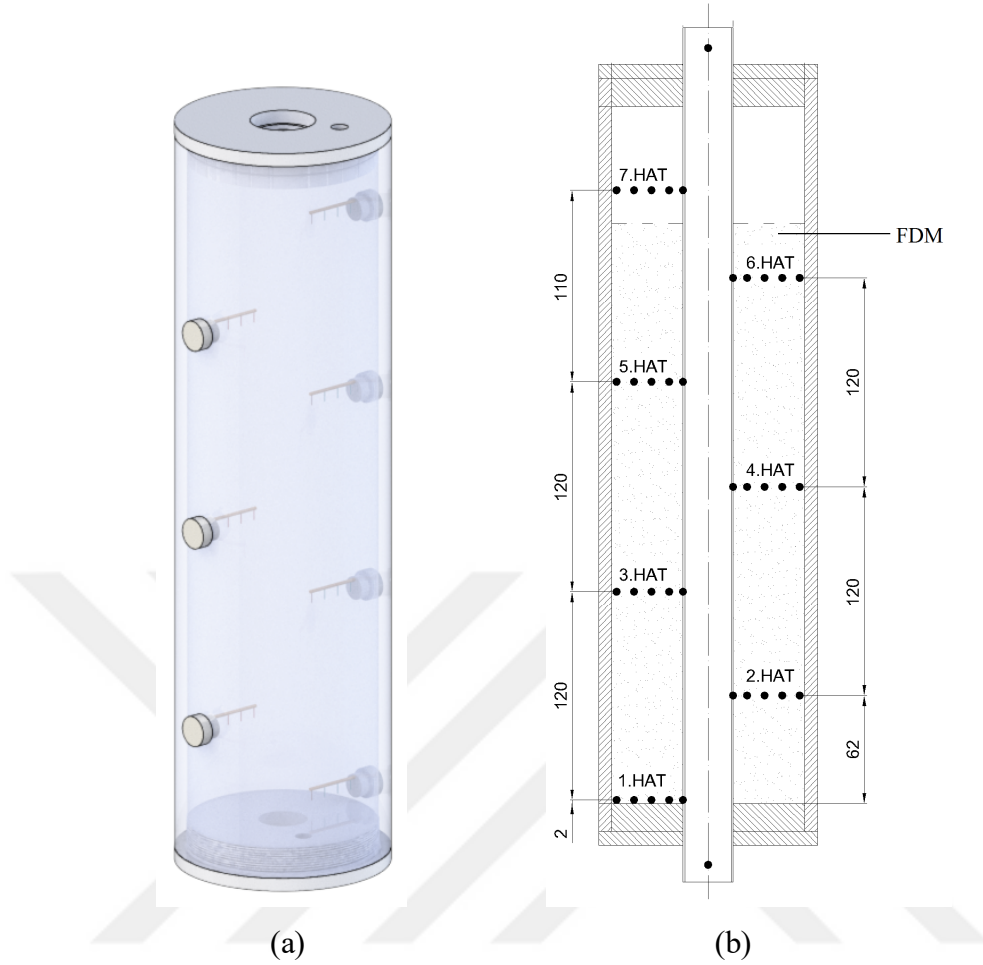


Şekil 2.6 Farklı taban ve tavan genişliklerine sahip kanatçık profilleri  $a/b=20/20$ (a),  $15/25$ (b),  $10/30$ (c),  $5/35$ (d),  $0/40$ (e).

Faz değiştiren madde ile ısı enerji depolama ve ısı geri kazanım süreçlerine ait sıcaklık haritalarının oluşturulması için ısı transfer borusu üzerinde 7 farklı istasyon, depo giriş ve çıkışında birer adet istasyon, depo içerisinde (FDM) ise 28 farklı istasyon olmak üzere toplam 37 farklı istasyonda sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm istasyonuna ait yerleşim planı Şekil 2.7.'de verilmektedir.

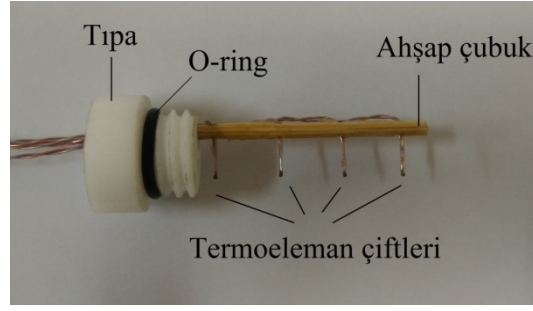


Şekil 2.7. Sıcaklık ölçüm noktalarının depo içerisindeki yerleşim planı



Şekil 2.8. Sıcaklık ölçüm prizlerinin depo içerisine yerleşimi, 3 boyutlu model resmi (a), kesit görüntüsü(b)

Şekil 2.7. de görüldüğü üzere depo içerisinde sıcaklık ölçümleri 7 farklı hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.7.'de gösterilen ölçüm noktalarında, konum tanımı için "a" veya "b" şeklinde alt indis kullanılmıştır. Burada "a" alt indisi, termoelemanın hat numarasını, "b" indisi ise hat üzerindeki radyal konumunu ifade etmektedir. Örneğin,  $T_{24}$ , 2. hatta bulunan ve bu hat üzerinde borudan dışa doğru yerleştirilmiş 4. termoelemanın konumunu ifade etmektedir. Termoeleman hatlarının depo içerisindeki yerleşimi 180°'lik açı sapmaları ile gerçekleştirilmiştir. Böylelikle ilgili hatların doğal taşınım mekanizması üzerindeki bozucu etkisi en aza indirgenmiştir. Her bir hattaki termoeleman yerleşimi özel olarak tasarlanan sıcaklık ölçüm prizleri ile sağlanmıştır (Şekil 2.9.). Prizlerin gövde üzerindeki yerleşimi sızdırmazlık elemanları kullanılarak vidalama tekniği ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.9 Sıcaklık ölçüm prizi

FDM olarak, faz dönüşüm sıcaklık aralığı 50-58°C olan ticari parafin kullanılmıştır (Şekil 2.10). İlgili parafine ait termofiziksel özellikler Tablo 2.4.'de, DSC analizi ise Şekil 2.11. de verilmektedir.

Depolanacak faz değiştiren maddenin miktarının belirlenmesinde, maksimum FDM sıcaklığı, halka aralık hacmi ve depo içerisindeki ek hacimler (kanatçıklar, sıcaklık ölçüm prizleri vb.) dikkate alınmıştır. Deneylede ulaşılabilecek maksimum FDM sıcaklığı 85°C ( $\rho_{\text{FDM}} = 762 \text{ kg/m}^3$ ) referans alınarak yapılan hesaplamayla faz değiştiren madde miktarı 2,6 kg olarak belirlenmiştir.

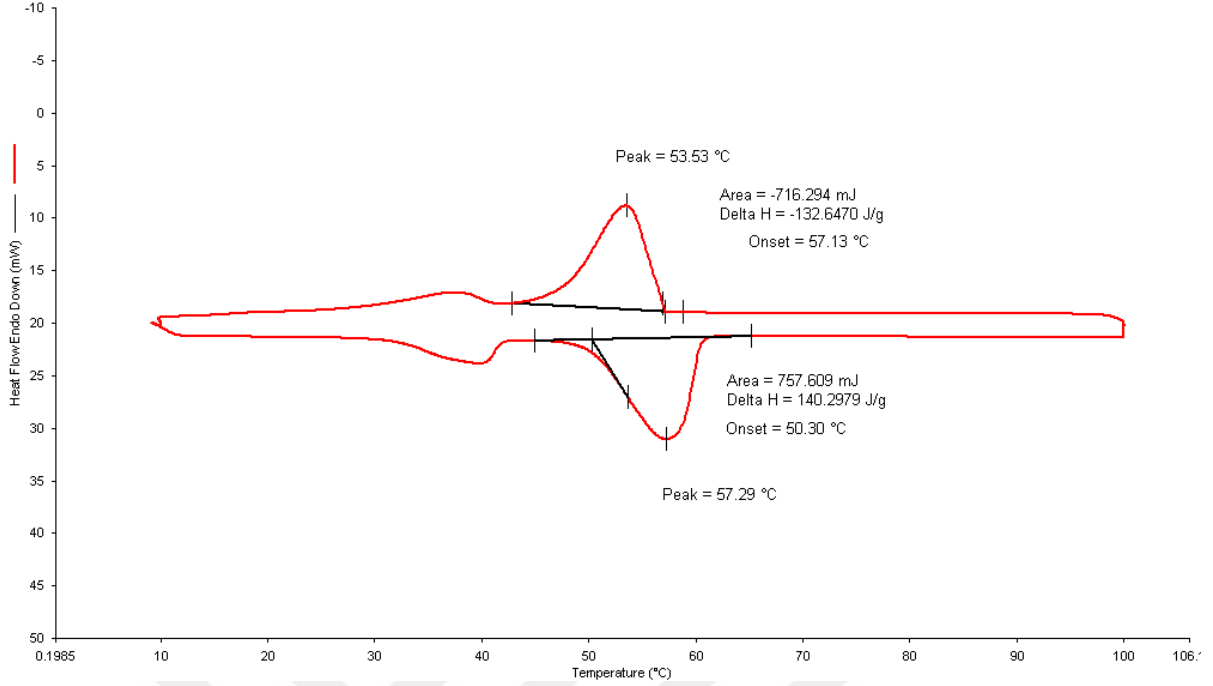


Şekil 2.10. Deneysel çalışmada kullanılan paraffin

Tablo 2.4. Kullanılan faz değiştiren maddenin termofiziksel özellikleri

Üretici firma ve kodu	Merck Millipore/107337
Ergime ve katılaşma sıcaklık aralığı	50 - 58°C
Ergime gizli ısısı	140,3 kJ/kg
Yoğunluk	880 kg/m <sup>3</sup> (25°C) - 762 kg/m <sup>3</sup> (85°C)
Özgül ısı	1,84 kJ/kg (25°C) – 2,37 kJ/kg (85°C)

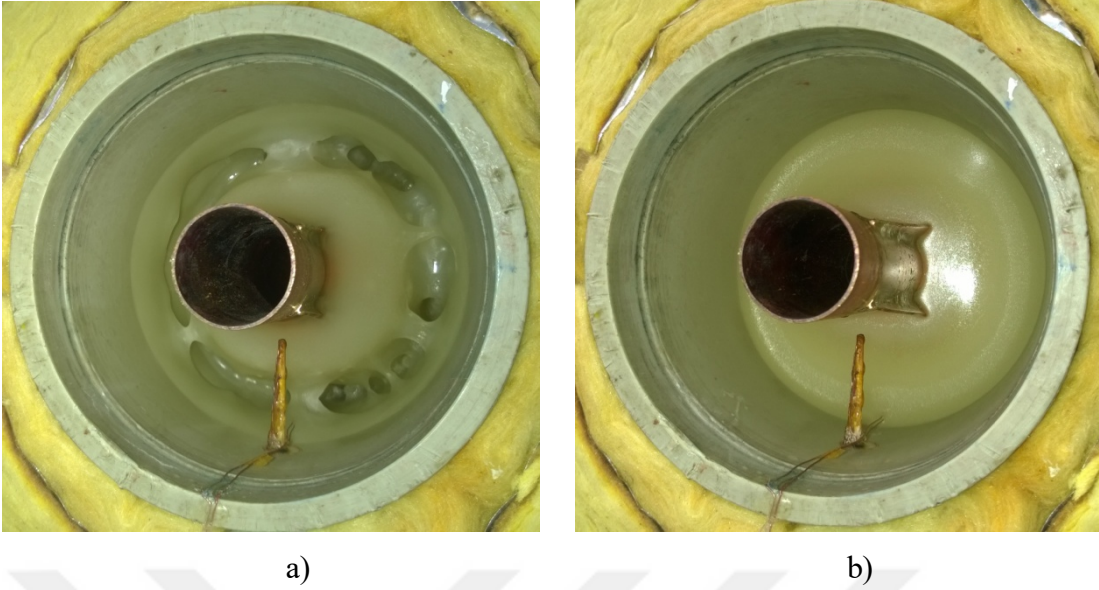




Şekil 2.11. Deneyde kullanılan parafine (MERCK/107337) ait DSC analiz sonucu

### 2.3.1. Şarj ve Deşarj Deneyleri

Kütlesi hassas bir terazide 2,6 kg olarak ayarlanan katı fazdaki FDM'nin sıvı faza dönüşümü, cam bir beher yardımıyla 80°C sıcaklığında şartlandırılmış bir fırın içerisinde sağlanmıştır. Bu işlemin ardından sıvı fazdaki FDM, ısı deposunun üst flanşını sökülerek tanka doldurulmuş ve eş zamanlı olarak test bölgesinden 25°C sıcaklıkta ITA geçirilerek FDM'nin tekrar katı faza geçmesi sağlanmıştır. Şekil 12a.'da katılaşma sonrası depo üst yüzeyinden çekilen bir fotoğraf yer almaktadır. Fotoğraf dikkatle incelendiğinde, depo üst yüzeyinin düzgün bir katılaşma yüzeyine sahip olmadığı görülmektedir. Isıl performans açısından sağlıklı bir değerlendirilmenin yapılabilmesi, her bir kanatçık profili için aynı başlangıç koşullarının oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, her bir deney öncesi FDM'nin üst yüzeyinde karşılaşılan bu düzensiz yapı bir ısı tabancası yardımı ile düzeltilmiştir (Şekil 2.12b.).



Şekil 2.12. Dolum sonrasında ait FDM yüzey fotoğrafları, düzgün olmayan yüzey (a), ısı tabancası uygulaması sonunda elde edilen yüzey (b)

Bu işlemlerin ardından, belirli bir süre daha test hattından  $25^{\circ}\text{C}$ 'de ısı transfer akışkanı geçirilerek faz değiştiren madde içerisindeki tüm istasyonların  $25^{\circ}\text{C}$ 'ye şartlandırılması sağlanmıştır. Bu işlemler esnasında ve deneyler süresince çevre sıcaklığının da  $25^{\circ}\text{C}$ 'de şartlandırıldığı not edilmelidir.

Test bölgesinin ve çevre sıcaklığının şartlandırılmasının ardından 9 ve 12 nolu vana kapatılıp 10 nolu vana açılarak ısı transfer akışkanı test hattından by-pass hattına yönlendirilmiş ve şarj deneyi öncesi ısı transfer akışkanı istenilen sıcaklığa şartlanıncaya kadar bu hatta dolaştırılmıştır.

Şarj deneyleri, ısı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumları için  $T_g=75^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $85^{\circ}\text{C}$  olmak üzere 3 farklı ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Isı transfer akışkanının istenilen sıcaklığa şartlandırılmasının ardından by-pass hattı kapatılarak test hattı açılmış ve ısı transfer akışkanının istenilen sıcaklık ve debide ( $Q=300$  l/h) test bölgesine yönlendirilmesi sağlanmıştır. Bu işlem esnasında eş zamanlı olarak 11 nolu vana açılmış ve şartlandırma süreci ardından test hattında kalan daha düşük sıcaklıktaki ısı transfer akışkanının sabit sıcaklık banyosuna ulaşmadan deney düzeneğini terk etmesi sağlanmıştır.

Isı depolama süreci boyunca, depo içerisindeki faz değiştiren maddenin tamamı eriyinceye kadar (tüm yerel istasyonların  $58^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde olması) devam ettirilmiştir. Isı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumları için gerçekleştirilen deneylerde elde

edilen sıcaklık değerleri incelendiğinde, T<sub>15</sub> istasyonunun akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak ergime sürecine en son katılan kritik nokta olduğu belirlenmiştir. İlgili noktanın 1. hatta yer alan ve ısı transfer borusuna en uzak yerel ölçüm istasyonunu temsil ettiği not edilmelidir. İlgili istasyonun 58°C ulaşılması durumunda duyulur + gizli ısı depolama sürecinin tamamlandığı kabul edilmiştir.

Şarj işleminin tamamlanmasının ardından ITA sıcaklığı 65°C'ye ayarlanarak şartlandırma sürecine geçilmiştir. Bu süreç, FDM içerisindeki tüm istasyonlarda sıcaklıklar 65°C oluncaya kadar sürdürülmüştür. Şartlandırma işlemi tamamlandıktan sonra, 9 ve 12 nolu vanalar kapatılmış ve eş zamanlı olarak by-pass hattı ve sabit sıcaklık banyosu içerisine, önceden 25°C sıcaklıkta şartlandırılmış ITA dolumu yapılmıştır.

Deşarj deneyleri, ısı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumları için tek bir ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığında (T<sub>g</sub> =25°C ) gerçekleştirilmiştir.

Bu işlemin ardından by-pass hattı kapatılarak test hattı açılmış ve ısı transfer akışkanı 25°C sıcaklık ve 300 l/h debide test bölgesine yönlendirilmesi (deşarj sürecinin başlaması) sağlanmıştır. Deşarj deneyleri, FDM içerisindeki tüm yerel istasyonlarda sıcaklık 25°C'ye düşene kadar sürdürülmüştür.

Hem şarj hem dedeşarj süreçleri boyunca sıcaklıklar, deneylerin başladığı andan itibaren birer dakikalık zaman aralıklarında bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Isı transfer borusunun hem kanatçıklı hem de kanatçiksız durumları ayrı ayrı göz önüne alındığında, katılma sürecine en son katılan kritik nokta T<sub>55</sub> nolu istasyon olarak belirlenmiştir. Bu noktanın sıcaklığının 50°C ulaşılması durumunda duyulur + gizli ısı depolama sürecinin tamamlandığı kabul edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Tez kapsamında, düşey olarak konumlandırılmış silindirik bir halka aralık içerisindeki faz değıştiren maddenin ısı depolama (şarj), ısı geri kazanım (deşarj) davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Halka aralık (depo geometrisi), taban ve tavan yüzeylerinden sınırlandırılmış, eş merkezli silindirik bir dış kabuk ve ısı transfer borusundan meydana gelmektedir. Isı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı (farklı eğim açılarında 5 farklı geometriye sahip kanatçık) durumu için şarj vedeşarj süreçlerine ait performans testleri, farklı akışkan giriş sıcaklık değerlerinde (şarj süreci için;  $T_g=75, 80$  ve  $85^\circ\text{C}$ ,deşarj için  $T_g=25^\circ\text{C}$ ) ve tek debi değerinde ( $Q=300$  l/h) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, faz değıştiren madde olarak  $50-58^\circ\text{C}$  faz dönüşüm aralığına ve  $140,3$  kJ/kg faz dönüşüm ısısına sahip ticari bir parafin olan Merck Millipore/107337 ve ısı transfer akışkanı olarak ise saf su kullanılmıştır. Performans testlerinden (şarj vedeşarj) elde edilen bulgular, ısı depolama ve ısı geri kazanım süreçleri için ayrı başlıklar altında detaylı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

#### 3.1 Isı Depolama (Şarj) Sürecinin İncelenmesi

Şarj deneyleri, üç farklı akışkan giriş sıcaklığında ( $T_g=75, 80$  ve  $85^\circ\text{C}$ ) gerçekleştirilmesine karşın bu başlık altında sadece  $T_g=80^\circ\text{C}$  için zaman bağımlı yerel sıcaklık değışimleri, ısı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı durumları için detaylı bir şekilde sunulmuştur. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarının ergime performansı üzerindeki etkisi ise karşılaştırma grafiklerinde verilmiştir.

Isı transfer borusunun kanatçiksız durumuna ait radyal sıcaklık değışimleri her bir ölçüm hattı için sırasıyla, Şekil 3.1(a-f)'de verilmektedir. Genel karakter olarak, FDM sıcaklığının tüm istasyonlarda sırasıyla, belirli bir zaman periyoduna kadar hızlı bir artış sergilediği, ilgili zaman periyodundan sonra artış hızının yavaşladığı ve tekrar ani bir sıcaklık sıçraması yaparak sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. İlgili değışimler literatürde de belirtildiği üzere sırasıyla, FDM içerisindeki duyulur, gizli ve duyulur ısı depolama davranışları ile açıklanabilir. Şekil 3.1a. dikkatli bir şekilde incelendiğinde,  $T_{12}$  istasyonunda sıcaklığın, yukarıda da belirtildiği üzere,  $50^\circ\text{C}$ 'ye hızlı bir şekilde ulaştığı,

50-58°C arasında artış hızının yavaşladığı ve 58°C'den sonra ani bir sıçrama yaparak 70°C'de yaklaşık olarak sabitlendiği görülmektedir. Diğer radyal istasyonlarda ise ilgili sıcaklık aralıklarının farklılık gösterdiği bazı istasyonlarda ise (örnek olarak T<sub>64</sub>) ortadan kalktığı açıktır. Bu davranış, ilgili istasyondaki gizli ve duyulur ısı depolama süreçleri arasındaki hızlı geçişin bir sonucudur.

Her bir ölçüm hattı kendi içinde kıyaslandığında ise, radyal doğrultuda içten dışa doğru (ısı transfer borusundan dış cidara doğru) FDM sıcaklıklarının azalan bir davranış sergilediği görülmektedir. Örnek olarak, t=300dk. için 2 nolu ölçüm hattında T<sub>21</sub>, T<sub>22</sub>, T<sub>23</sub>, T<sub>24</sub>, T<sub>25</sub> sırasıyla 61°C, 49°C, 45°C ve 43°C değerlerini almaktadır. Bu durum, ısı geçiş yönü ve FDM'nin sahip olduğu düşük ısı yayılım davranışı ile açıklanabilir. "Daha açık bir ifadeyle, belirli zaman adımı içerisinde FDM'ye aktarılan ısı, ortamın düşük ısı iletkenliğinden dolayı komşuluğundaki FDM tabakasına eş zamanlı olarak aktarılamamakta kendisini sıcaklık artışı olarak göstermektedir". Grafikler dikkatle incelendiğinde, 1 nolu istasyonun şarj başlangıcında ani bir sıcaklık sıçraması göstererek ölçüm hatlarından bağımsız bir şekilde çok kısa bir zaman adımında (yaklaşık 10dk.) aynı değere yakınsadığı görülmektedir. Bu durum, şarj başlangıcında etkin olan iletim mekanizmasının ve buna bağlı olarak gerçekleşen eş dağılımlı ergime davranışının bir sonucudur. Burada, ilgili istasyonun ısı transfer borusuna 2 mm uzaklıkta olduğu ve eriyik halka aralığın doğal taşınım hücresi oluşumuna müsaade etmediği not edilmelidir.

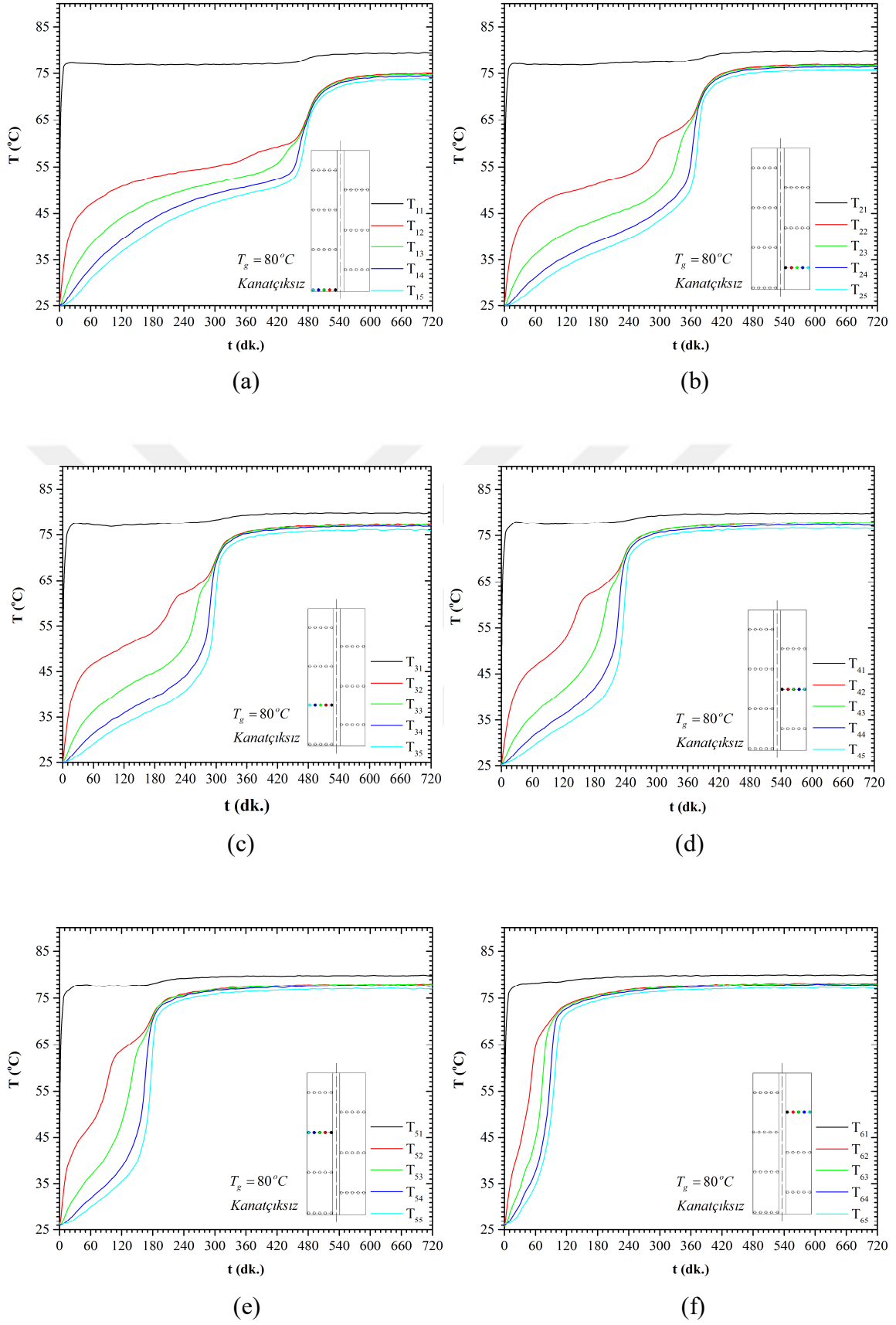
Kanatçık ilavesiz durum için, aynı radyal ve farklı aksenal mesafelerdeki FDM'nin zaman bağımlı sıcaklık değişimleri Şekil 3.2(a-e)'de verilmektedir. Genel karakter olarak, 7 nolu istasyon hariç diğer tüm istasyonlarda, FDM sıcaklıklarının belirli bir zaman adımına kadar eş dağılımlı bir artış sergilediği ve ilgili zaman adımından sonra sıcaklık artışlarının sırasıyla 6, 5, 4, 3, 2 ve 1 nolu istasyonlarda daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Eş dağılımlı sıcaklık davranışı, yukarıdaki bölümde de ifade edildiği üzere, şarj başlangıcında etkin olan iletim mekanizmasının bir sonucudur. İlgili grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, eş dağılımlı davranışın 2. radyal hatta en uzun zaman periyoduna sahip olduğu ve dış cidara yaklaşıldıkça azaldığı görülmektedir. Ergimenin ilerleyen zaman adımlarında (t >10dk.) aksenal doğrultudaki yukarı yönlü sıcaklık artışı, iletim mekanizmasına ek olarak ortaya çıkan doğal taşınım mekanizmasıyla açıklanabilir. Bu sıcaklık artışına nicel örnek olarak, 2. radyal hattaki FDM sıcaklıkları verilebilir. Şekil 3.2b'de dikkate alındığında, t = 30dk için T<sub>12</sub>, T<sub>22</sub>, T<sub>32</sub>, T<sub>42</sub>, T<sub>52</sub>, T<sub>62</sub> istasyonlarındaki FDM sıcaklığı yaklaşık olarak 43°C düzeyinde iken, t = 180 dk.'da ilgili istasyonlardaki FDM

sıcaklıkları sırasıyla, 51°C, 52°C, 54°C, 62°C, 71°C, 75°C değerlerine ulaşmaktadır. Bu durum, sıvı FDM'nin sıcaklık artışına bağlı olarak yoğunluğunun azalması ve artan kaldırma kuvveti ile yukarı yönlü hareketinin bir sonucudur. Daha açık bir ifadeyle, eriyik FDM kaldırma kuvveti etkisiyle depo üst bölgelerine doğru hareket etmekte (doğal taşınım) ve bünyesinde depolamış olduğu ısı enerjisi eşzamanlı olarak komşuluğundaki FDM tabakalarına aktarmaktadır. Böylelikle, iletim mekanizmasına ek olarak ortaya çıkan doğal taşınım mekanizması, FDM içerisindeki katı-sıvı faz dönüşümünü hızlandırmaktadır. Yukarıda da belirtildiği üzere, 7 nolu hattaki sıcaklık dağılımı bu davranışla benzer bir karakter sergilememektedir. Bu farklılık, ilgili hattın Şekil 2.7'de görüleceği üzere, şarj süreci başlangıcında FDM ile temasta olmamasından kaynaklanmaktadır. İlerleyen süreçte ( $t > 300$  dk.), eriyik FDM'nin ilgili ölçüm istasyonlarına ulaştığı ve sıcaklık artışının beklenen davranışı sergilediği açıkça görülmektedir.

FDM sıcaklıklarının farklı eksenel istasyonlardaki değişimleri dikkatli bir şekilde incelendiğinde, en son katı-sıvı faz dönüşümünün depo alt konumunda yer alan T<sub>15</sub> nolu istasyonda (kritik nokta) gerçekleştiği görülmektedir. Burada FDM katı-sıvı faz dönüşüm sıcaklık üst limitinin 58°C alındığı not edilmelidir. İlgili zaman adımı, diğer istasyonlardaki FDM sıcaklıklarının 58°C'nin üzerinde olduğu, diğer bir ifadeyle daha önce faz dönüşümlerini tamamladıkları görülmektedir. Bu durum, depo içerisinde eşzamanlı homojen bir ergime davranışının olmadığını ortaya koymaktadır. İlgili davranışın daha net bir biçimde anlaşılması için farklı zaman adımlarına ait eş sıcaklık eğrileri ve katı-sıvı ara yüzey gelişimleri Şekil 3.3.'de verilmektedir. Şekillerde de görüldüğü üzere, şarj başlangıcında ( $t = 30$  dk.) etkin olan iletim mekanizması nedeniyle katı-sıvı ara yüzünde radyal doğrultuda üniform bir ilerleme kaydedilirken, ilerleyen zaman adımlarında ilerleme yukarı yönlü genişleyen bir davranış sergilemektedir. Bu davranış yukarıda da belirtildiği üzere iletim mekanizmasına ek olarak ortaya çıkan doğal taşınım mekanizması ile ilişkilidir. Grafiklerde göze çarpan diğer önemli bir bulgu ise,  $t=360$  dk.'da ergime sürecine katılmayan FDM'nin (ölü bölge) varlığıdır. İlgili zaman adımı, depo üst bölgesinde ergime süreci tamamlanmış olmasına karşın, depo alt konumunda ergime süreci devam etmektedir. FDM-temelli ısı enerjisi depolarının performansları, içerisindeki tüm FDM'nin ergime süresi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, şekilde yeşil renkle karakterize edilen ölü bölgenin ısı enerjisi depolama süresini uzatacağı açıktır. Ölü bölgenin ergime sürecine eşzamanlı katılıma yönelik, literatürde sıklıkla genişletilmiş yüzey (kanatçık) kullanımı ve kısıtlı olarak nano parçacık ilavesi ve metal köpük kullanımı gibi pasif yöntemler tercih

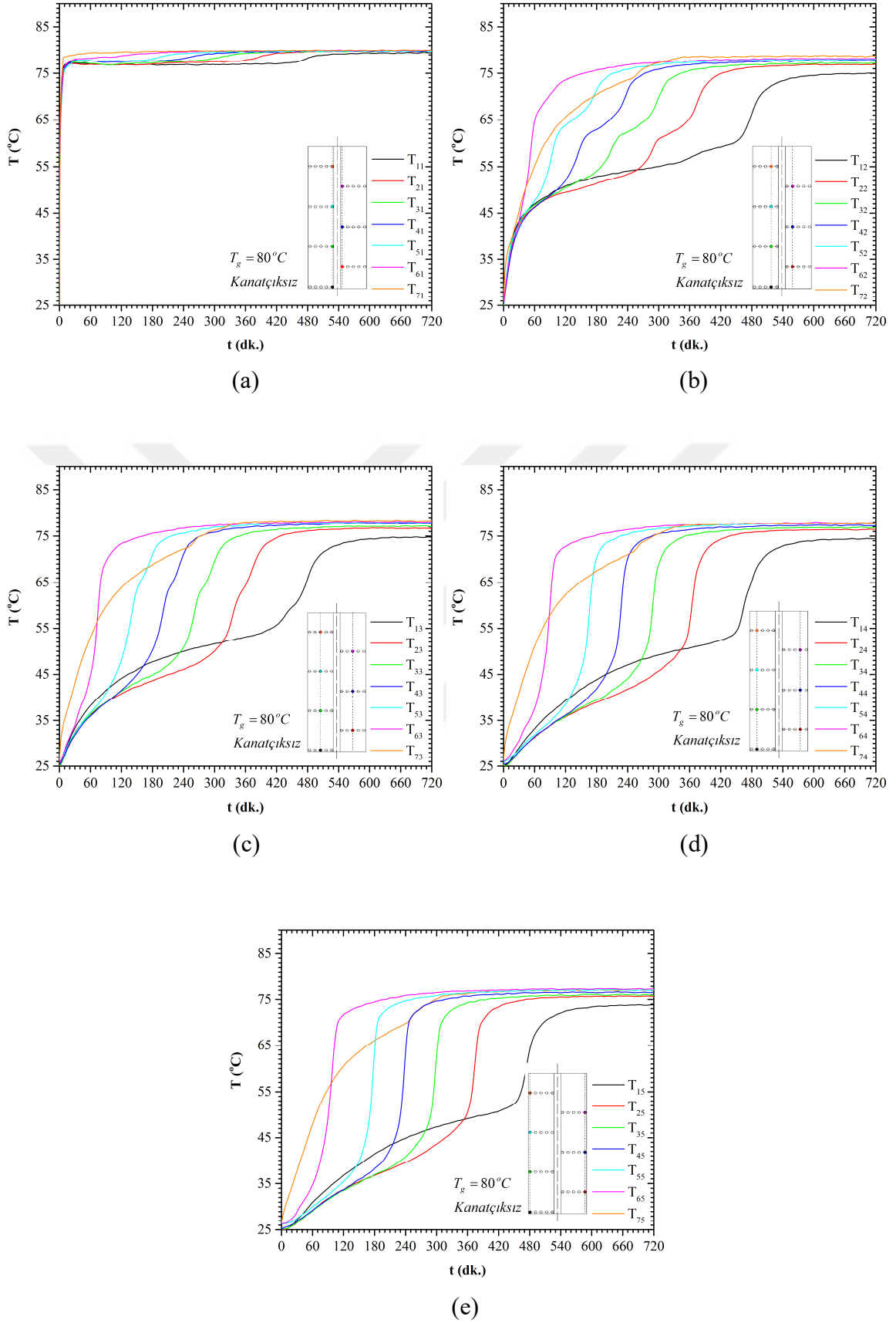
edilmektedir. Literatür araştırmasında da vurgulandığı üzere, ilgili yöntemlerin sadece iletim mekanizmasını hedef alması diğer bir ifadeyle doğal taşınım mekanizmasını göz ardı etmesi önemli bir eksiklik olarak ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, hem ölü bölge hem de katı-sıvı ara yüz gelişimi dikkate alınarak tasarlanan 5 farklı kanatçık düzenlemesi tez kapsamında test edilmiştir. Her bir kanatçık profiline ait şematik resim Şekil 2.5.'de verilmektedir. Yapısal olarak aşağı yönlü genişleyen kanatçık profiliyle ölü bölgenin daha kısa bir süre içerisinde ergime sürecine katılması hedeflenmiştir. Burada, her bir kanatçık düzenlemesinin aynı ısı transfer yüzey alanına sahip olduğu not edilmelidir.

Azalan kanatçık genişlik oranına bağlı olarak ( $a/b = 20/20, 15/25, 10/30, 5/35, 0/40$ ) her bir depo geometrisi için radyal ve aksenal doğrultudaki zaman bağımlı sıcaklık değişimleri sırasıyla, Şekil 3.(4-8) ve 3.(9-13)'de verilmektedir. Grafikler dikkatle incelendiğinde, genel karakter olarak, her bir istasyondaki katı-sıvı faz dönüşümünün ( $T > 58^{\circ}\text{C}$ ) kanatçiksiz duruma kıyasla daha kısa zaman adımlarında gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, ısı transfer yüzey alanının ölü bölgelere yönlendirilmesinin bir sonucudur. Kanatçık ilaveli durumlar kendi içinde kıyaslandığında ise, depo yarı üst bölgesinde (5, 6 ve 7 nolu hat) FDM sıcaklıklarının kanatçık yapısından bağımsız bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu duruma örnek, 6 nolu hattın 3. ve 5. radyal istasyonlarındaki zaman bağımlı FDM sıcaklık değişimleri verilebilir (Şekil 3.14a-b). Depo alt yarı bölgesinde ise (1, 2, 3 ve 4 nolu hatlar), FDM sıcaklıklarının azalan kanatçık genişlik oranı ile daha büyük değerler almaktadır. Bu durum, 1 ve 3 nolu hatlardaki 3. ve 5. radyal için Şekil 3.14(c-f)'de net bir şekilde görülmektedir. Azalan kanatçık genişlik oranına bağlı olarak, kanatçığın ölü hacim içerisine girmesi ve ilgili bölgedeki iletim ve doğal taşınım mekanizmasını tetiklenmesi bu davranışın ana nedenidir. Şekil 3.15'de ise her bir kanatçık profiline ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının ( $T_{15}$ ) farklı akışkan giriş sıcaklıklarındaki ( $75^{\circ}\text{C}, 80^{\circ}\text{C}$  ve  $85^{\circ}\text{C}$ ) değişimleri verilmektedir. İlgili grafiklerdeki kesikli çizgiler, kritik yerel noktanın katı-sıvı faz dönüşüm sıcaklığına ( $58^{\circ}\text{C}$ ) ulaştığı süreyi göstermektedir. Artan akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak ilgili süreler önemli düzeyde azalmaktadır. Kanatçık genişlik oranının ( $a/b$ ) ergime süresine verdiği cevap özet halinde Şekil 3.16'da sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, kanatçık genişlik oranının azalmasına bağlı olarak ısı depolama sürelerinde önemli düzeyde kısalmalar meydana gelmektedir. Oransal olarak bu kısalma düzeyleri akışkan giriş sıcaklığından yaklaşık olarak bağımsız bir davranış sergilemektedir. Her bir kanatçık düzenlemesine ait depolama süreleri ve oransal azalımlar  $T_g = 80^{\circ}\text{C}$  değeri için Tablo 3.1'de verilmektedir.

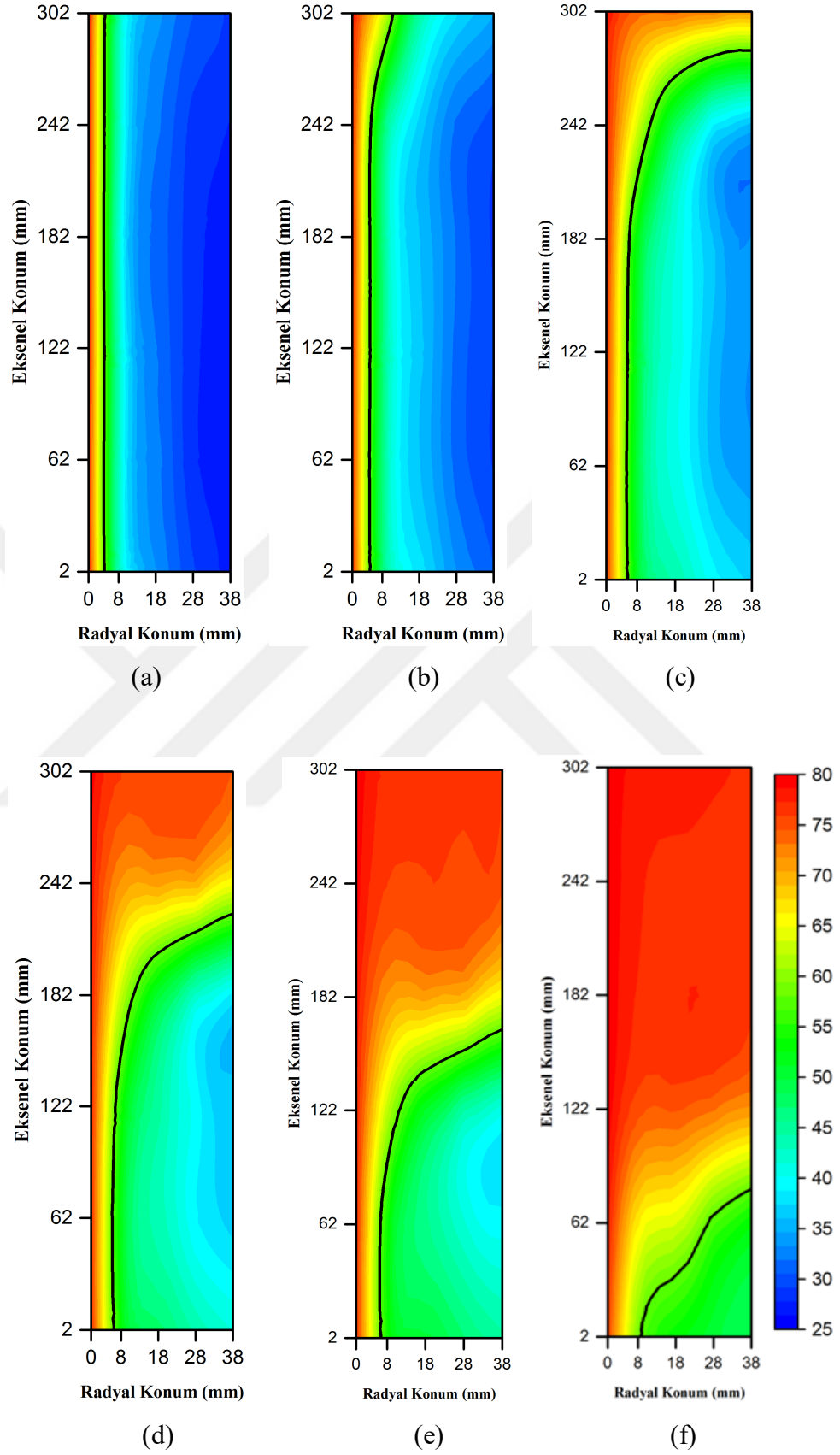


Şekil 3.1. Kanatçiksız duruma ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değışimleri (şarj)

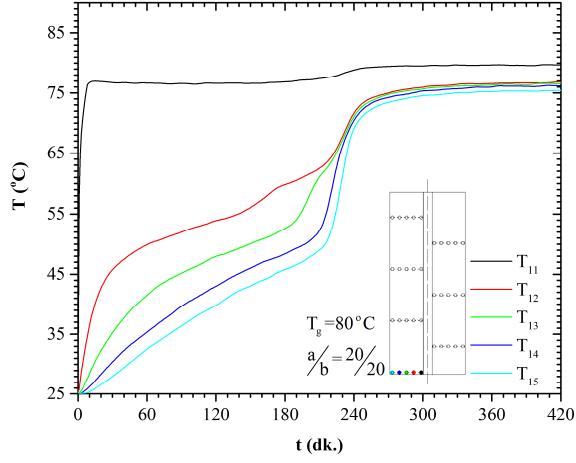




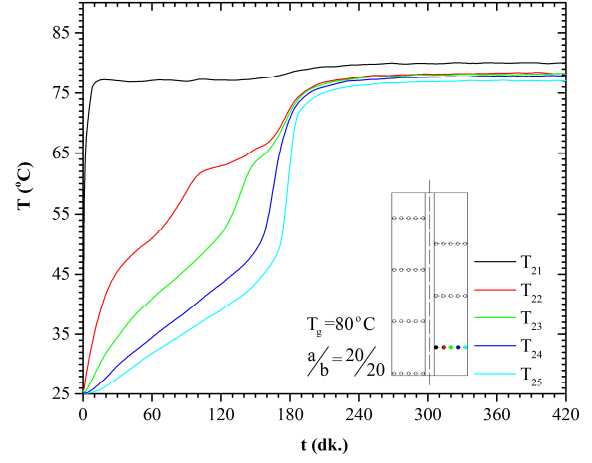
Şekil 3.2. Kanatçiksız duruma ait farklı aksenal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri(şarj)



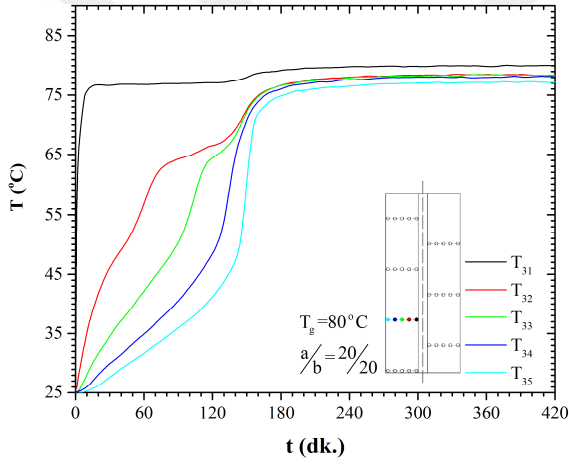
Şekil 3.3. Kanatçksız duruma ait depo içerisindeki sıcaklık dağılımları 30 dk. (a), 60 dk. (b), 120 dk. (c), 180 dk. (d), 240 dk. (e), 360 dk. (f) (şarj)



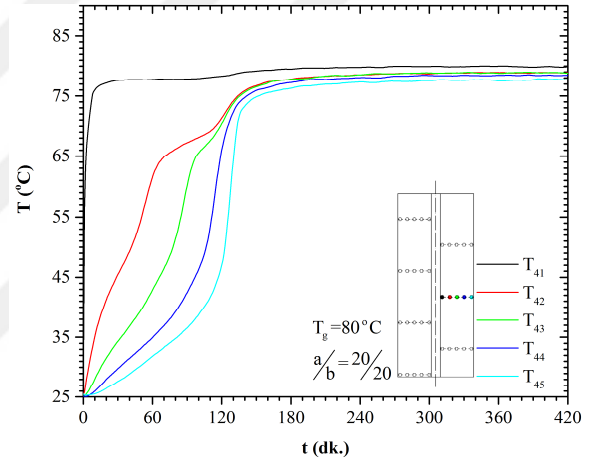
(a)



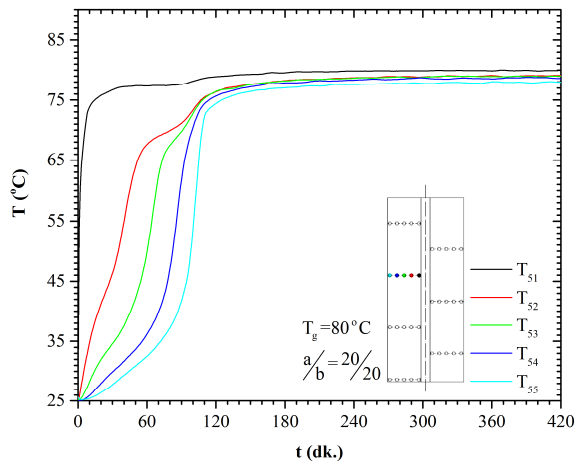
(b)



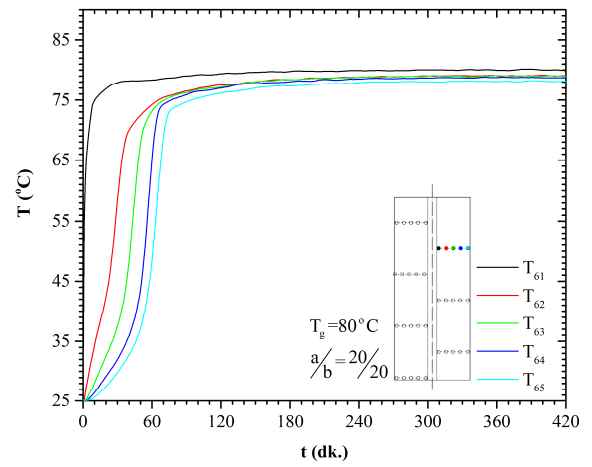
(c)



(d)

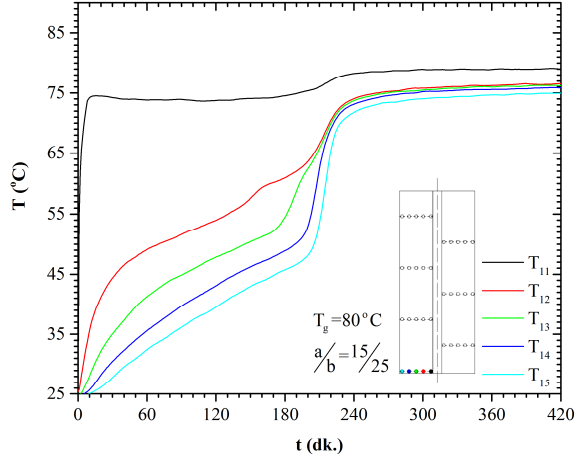


(e)

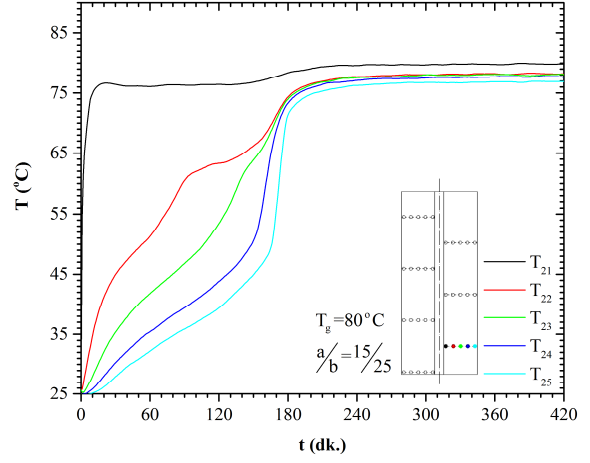


(f)

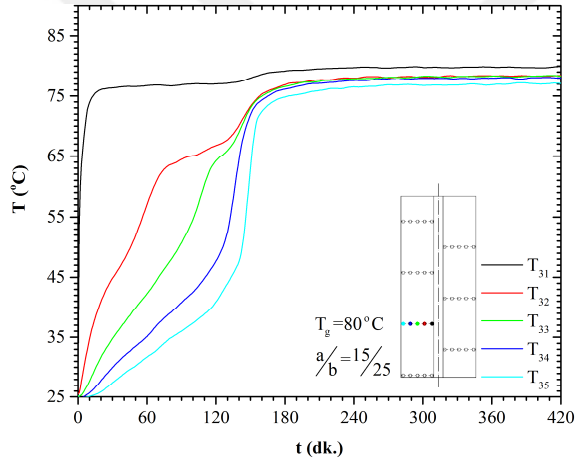
Şekil 3.4.  $a/b=20/20$ 'ye ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



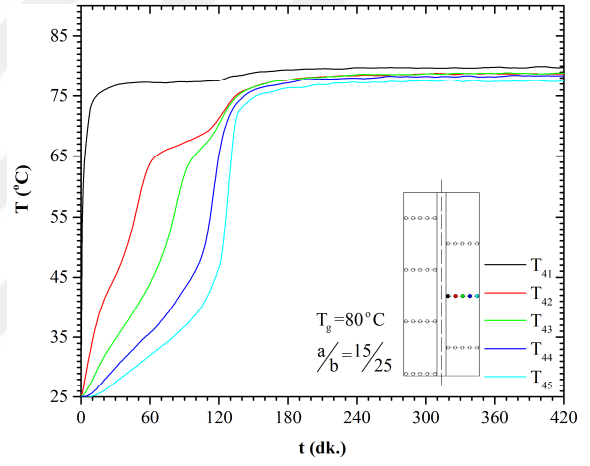
(a)



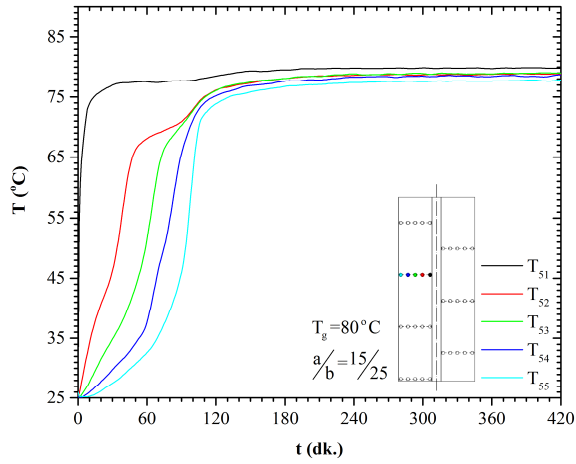
(b)



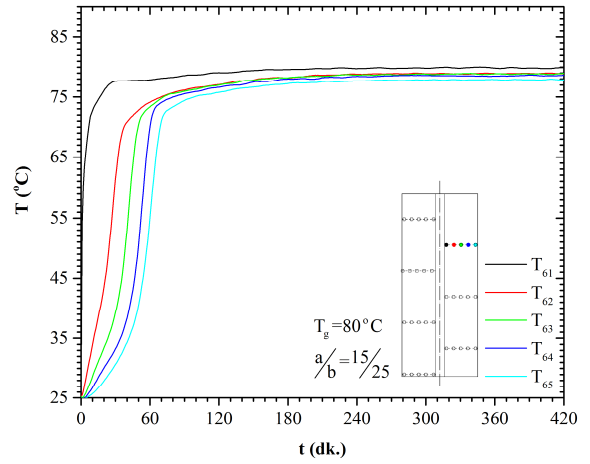
(c)



(d)

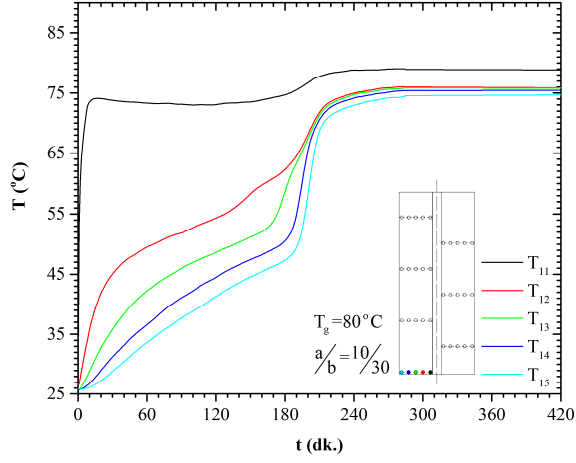


(e)

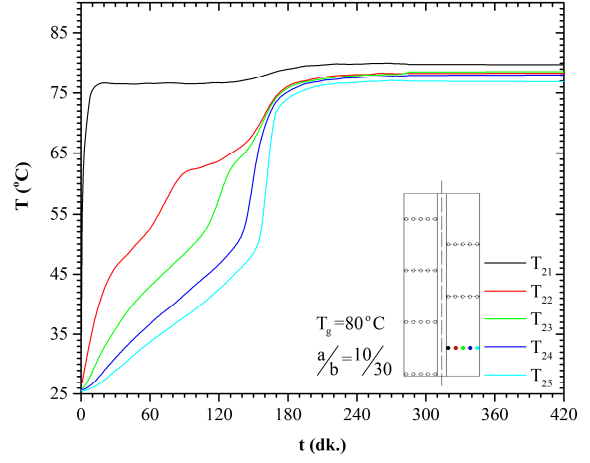


(f)

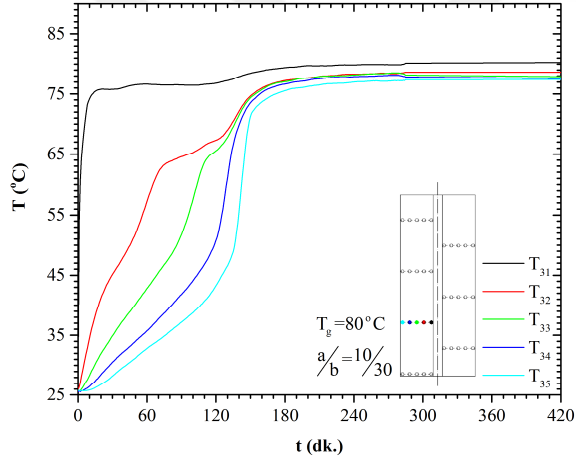
Şekil 3.5.  $a/b=15/25$ 'e ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



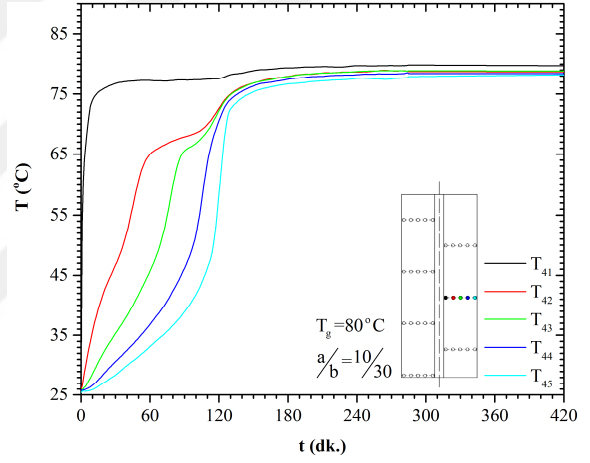
(a)



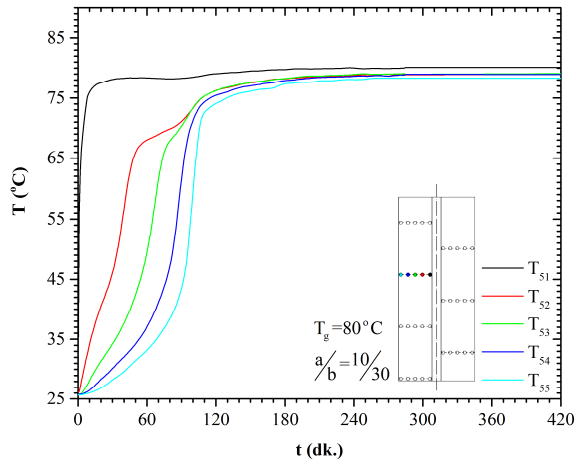
(b)



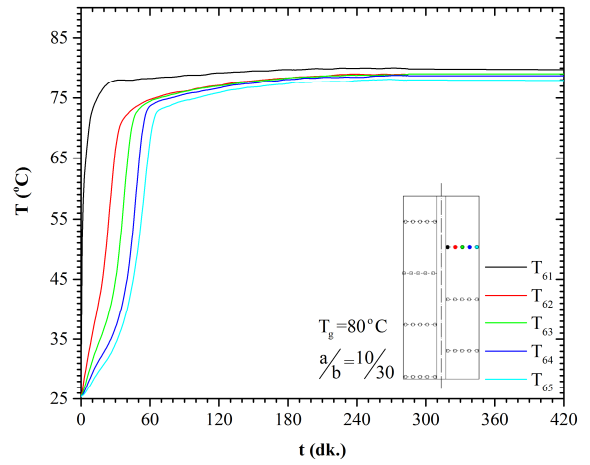
(c)



(d)

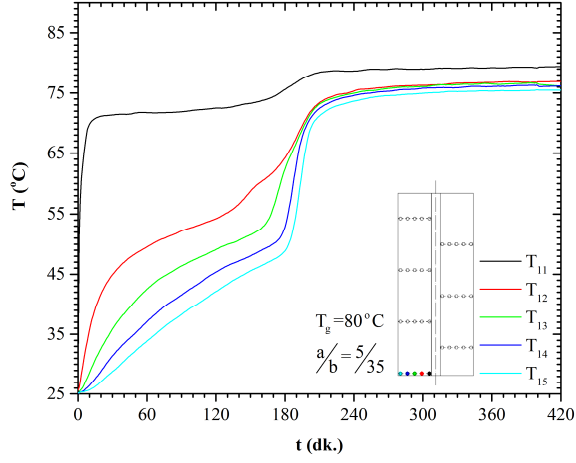


(e)

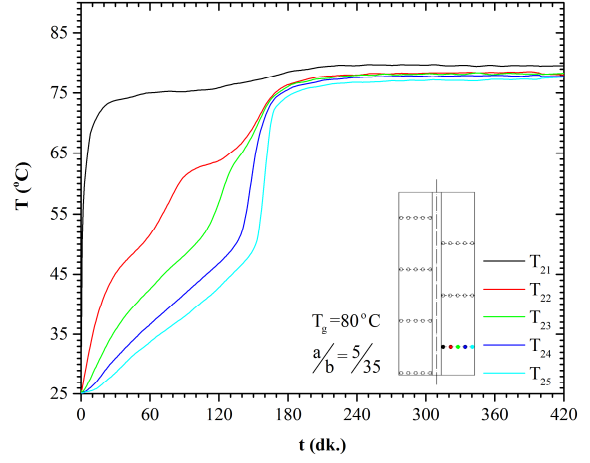


(f)

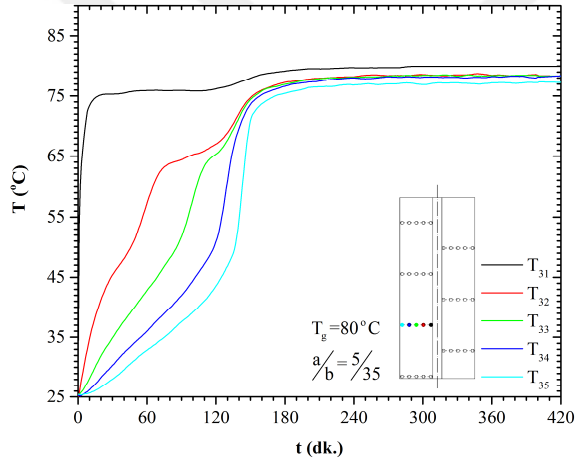
Şekil 3.6.  $a/b=10/30$ 'a ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



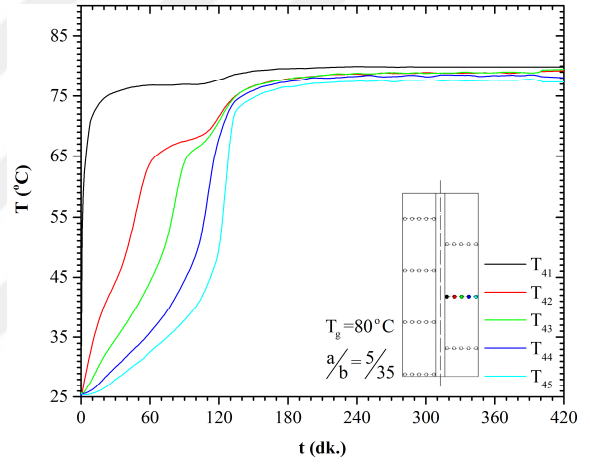
(a)



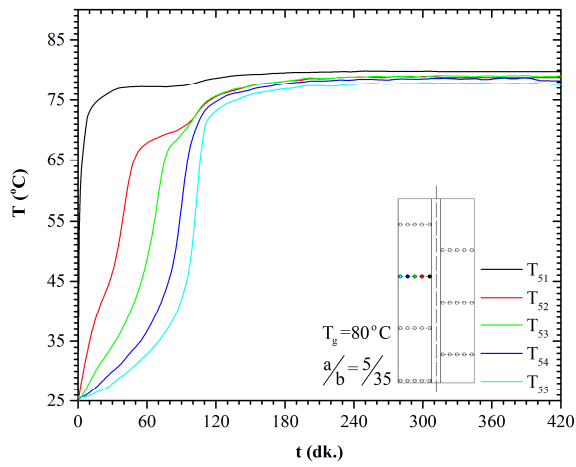
(b)



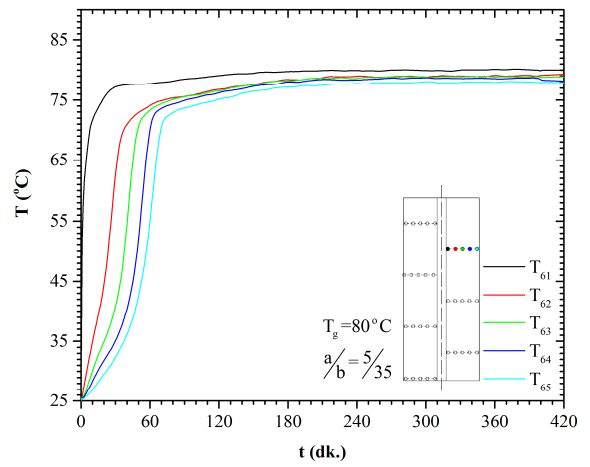
(c)



(d)

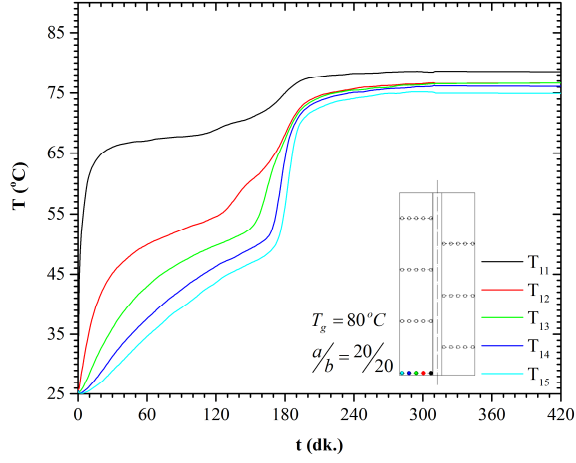


(e)

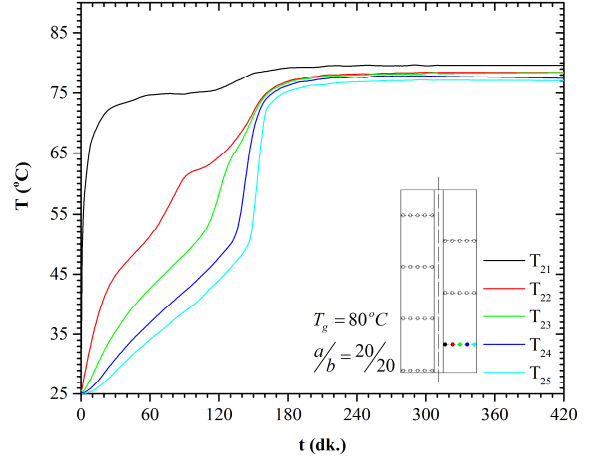


(f)

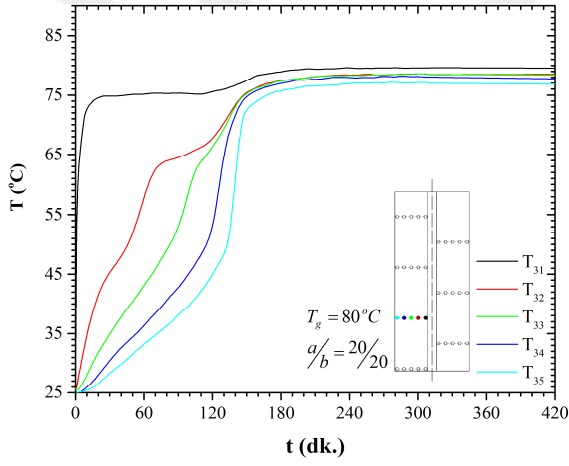
Şekil 3.7.  $a/b=5/35$ 'e ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



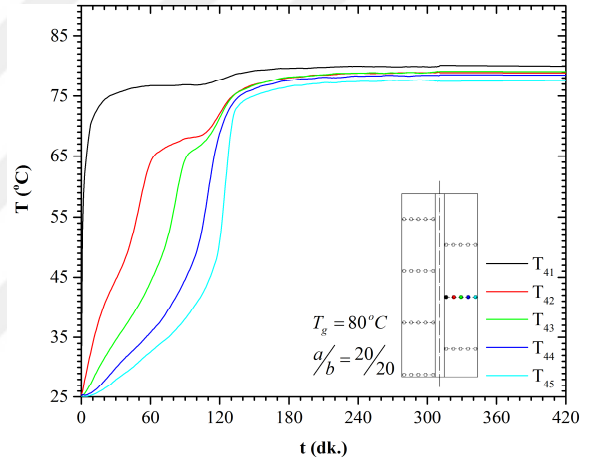
(a)



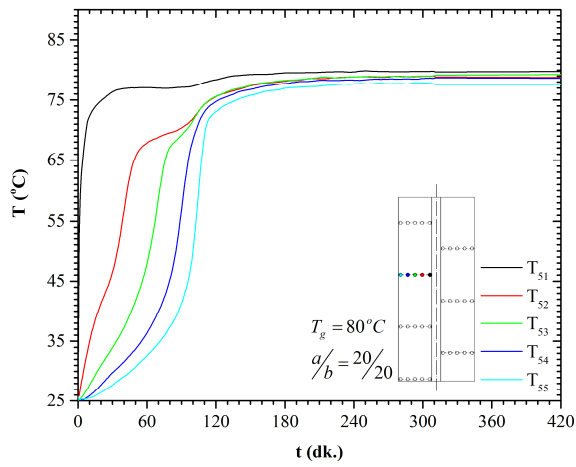
(b)



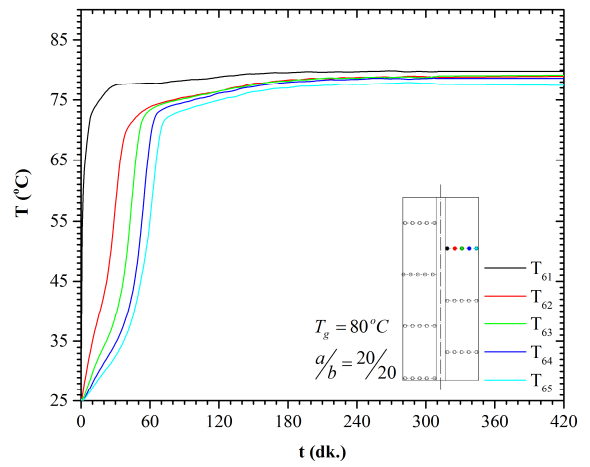
(c)



(d)

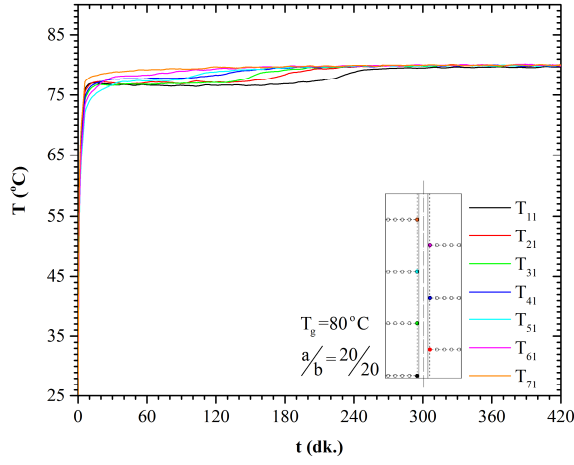


(e)

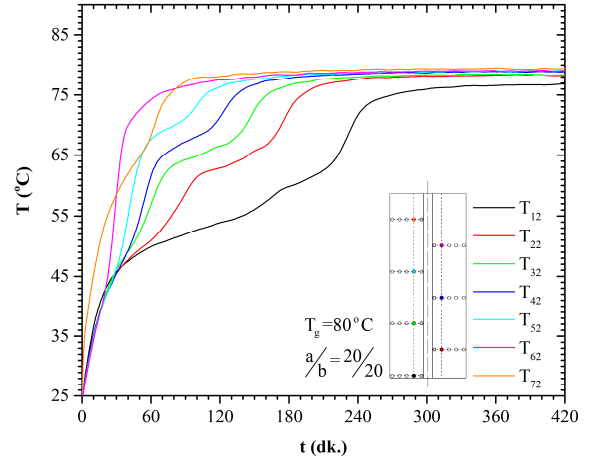


(f)

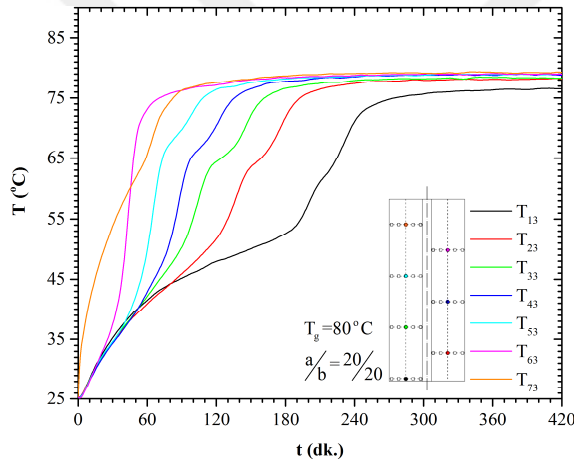
Şekil 3.8.  $a/b=0/40$ 'a ait farklı radyal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



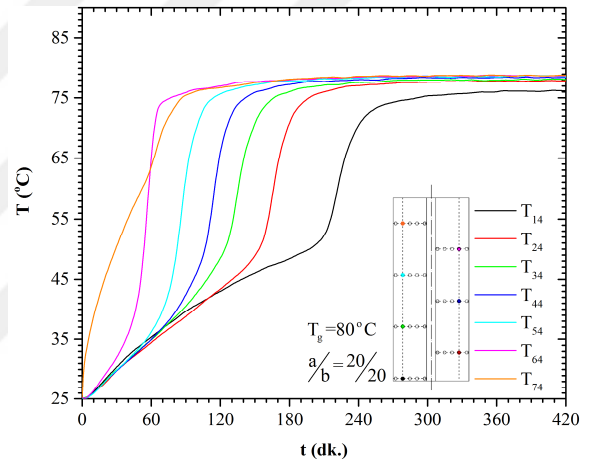
(a)



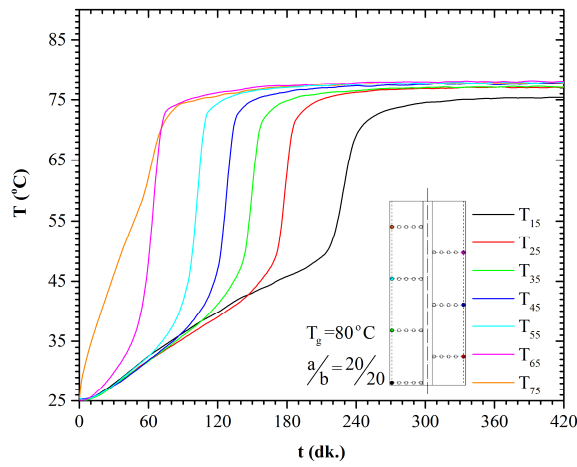
(b)



(c)



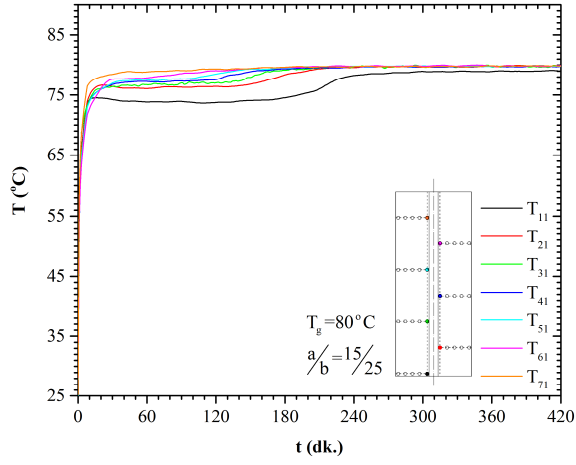
(d)



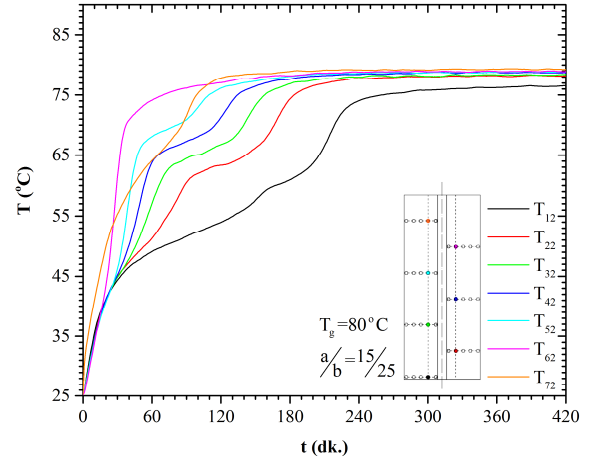
(e)

Şekil 3.9.  $a/b=20/20$ 'ye ait farklı aksel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)

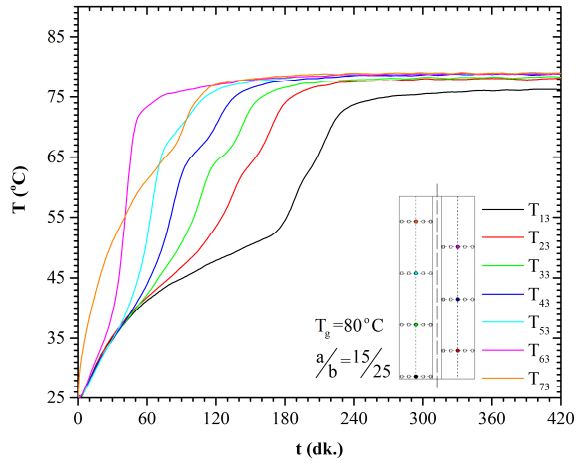




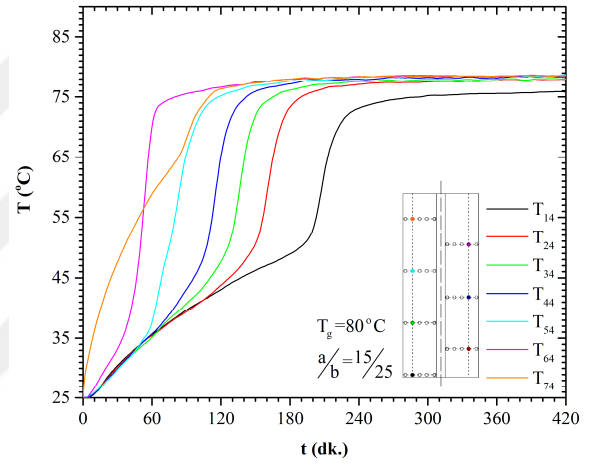
(a)



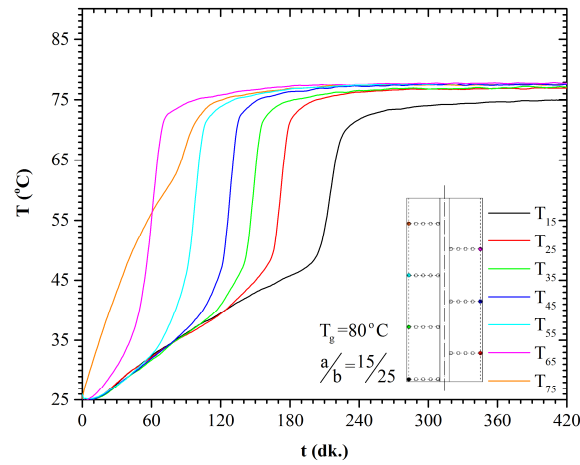
(b)



(c)

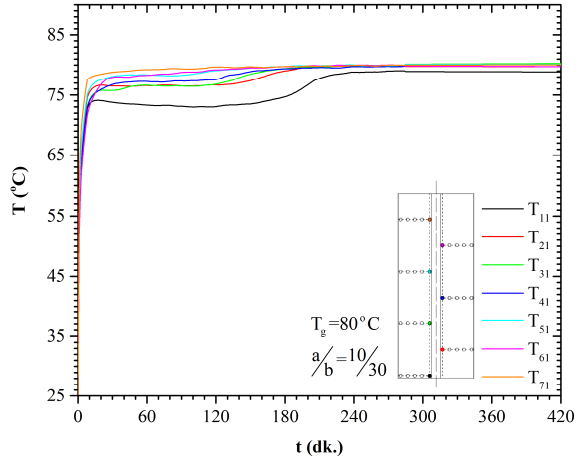


(d)

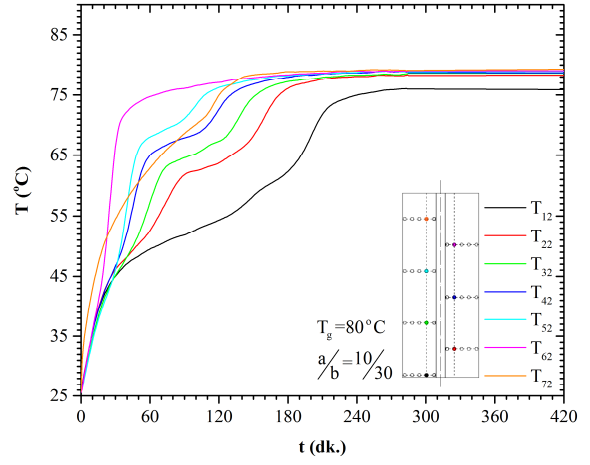


(e)

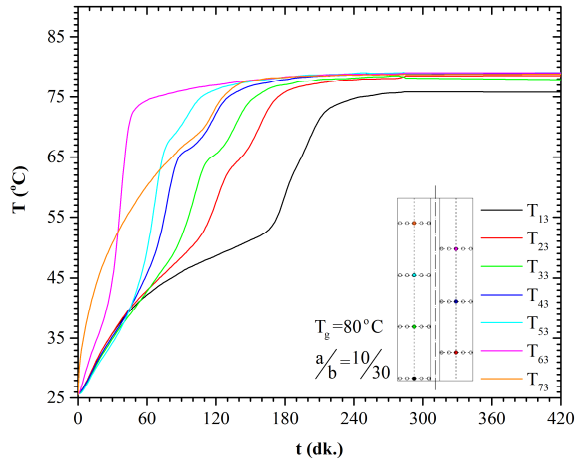
Şekil 3.10.  $a/b=15/25$ 'e ait ait farklı aksenal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



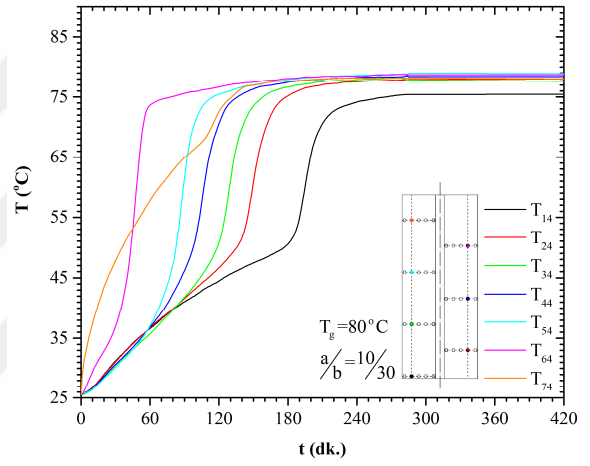
(a)



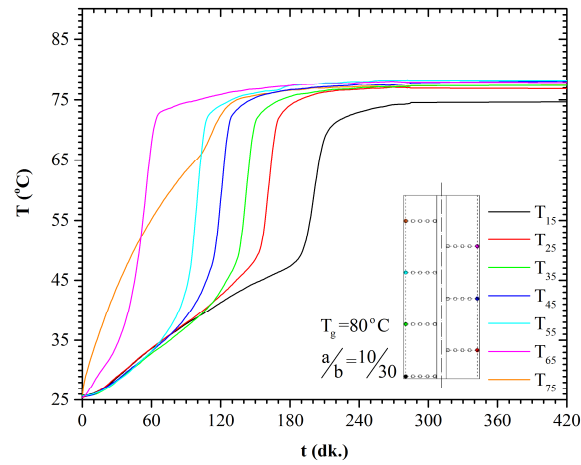
(b)



(c)

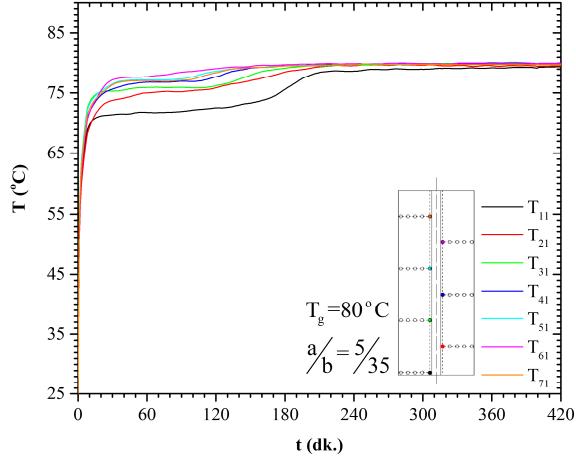


(d)

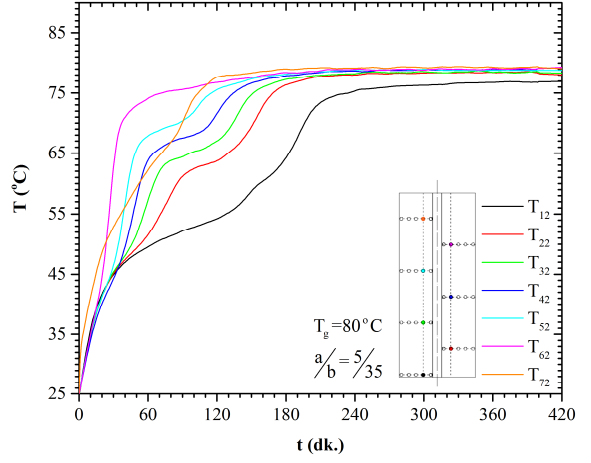


(e)

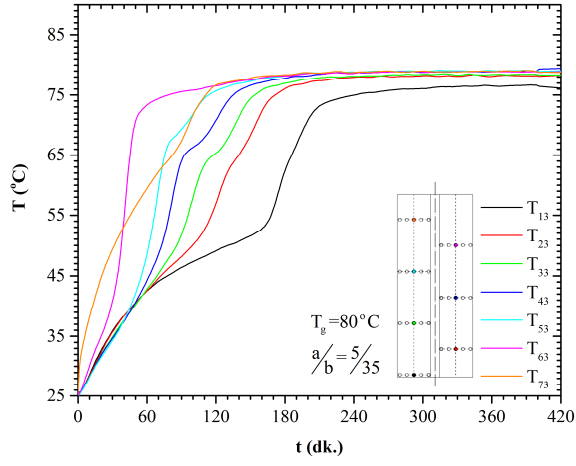
Şekil 3.11.  $a/b=10/30$ 'a ait farklı eksenel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



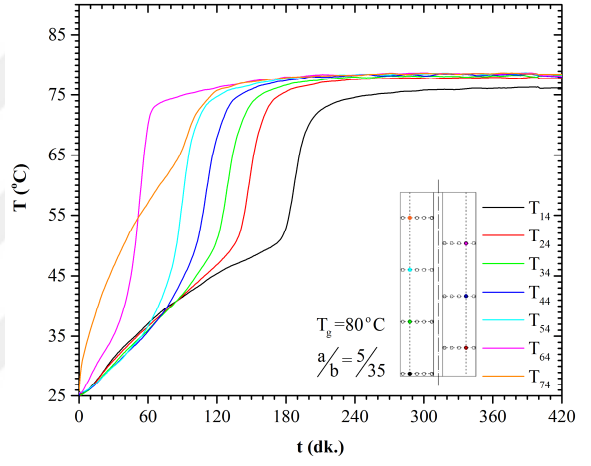
(a)



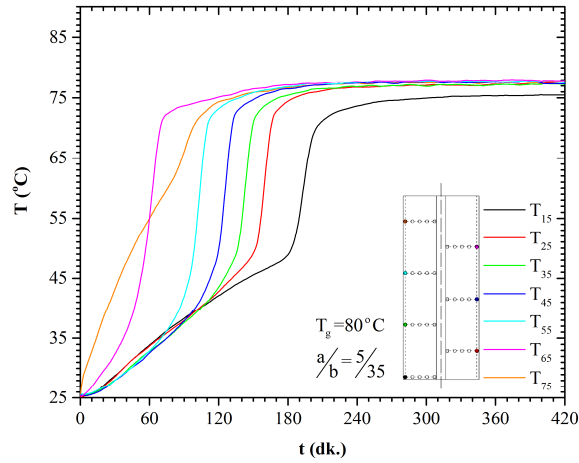
(b)



(c)

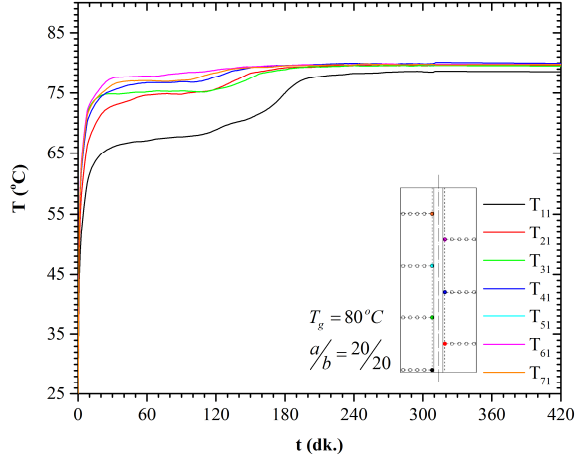


(d)

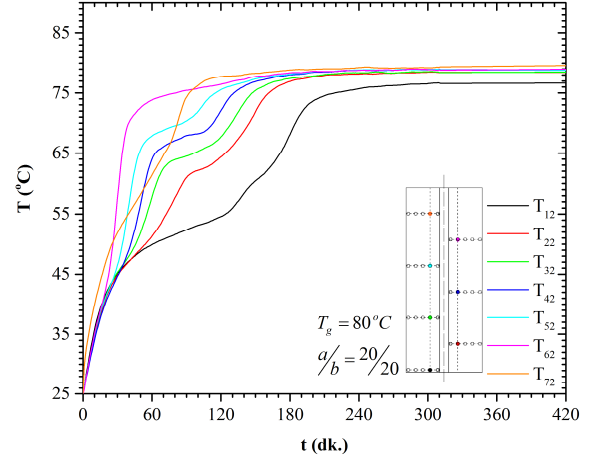


(e)

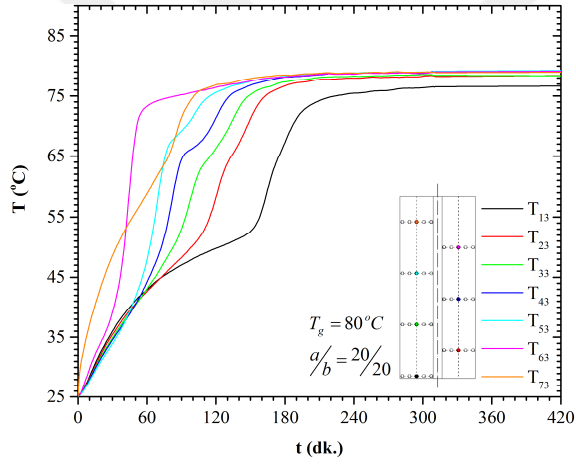
Şekil 3.12.  $a/b=5/35$ 'e ait farklı aksenal istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



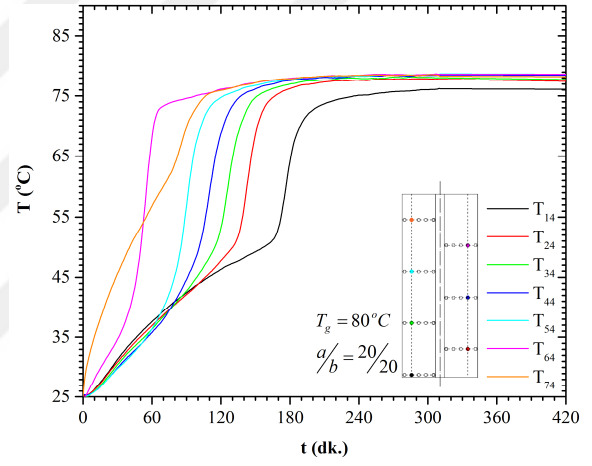
(a)



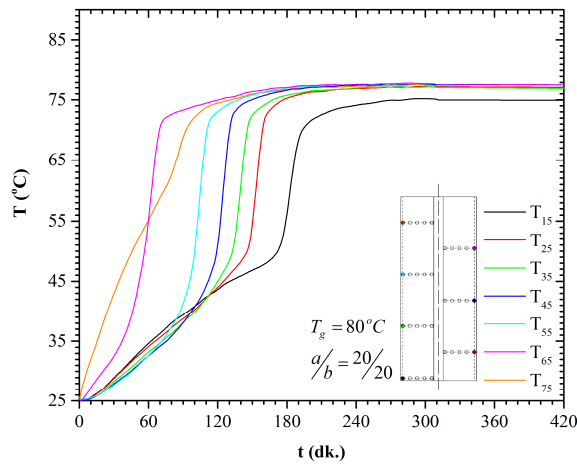
(b)



(c)

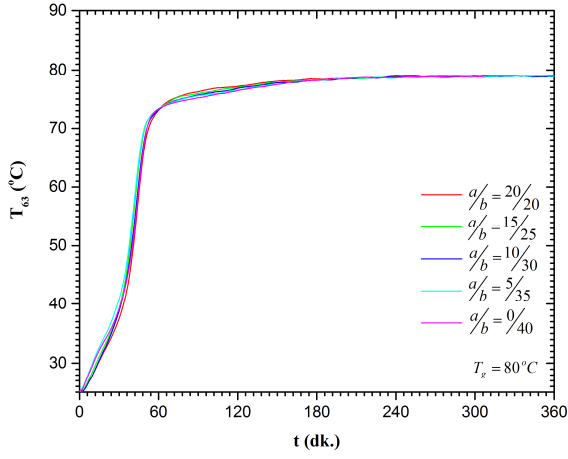


(d)

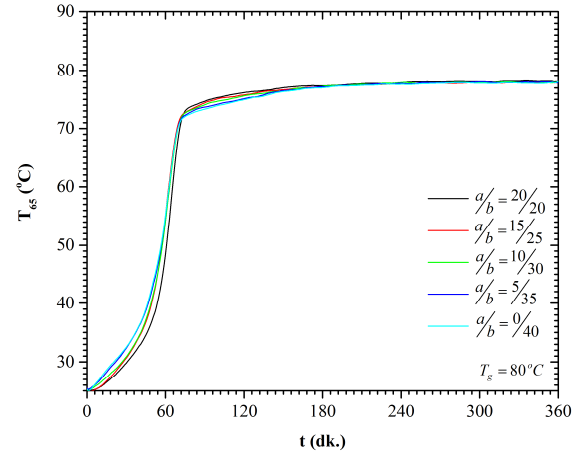


(e)

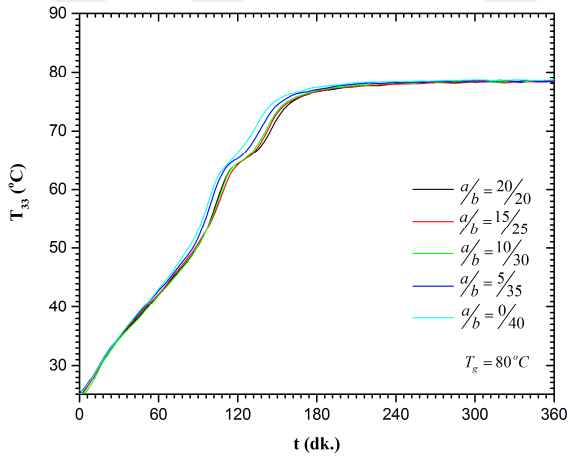
Şekil 3.13.  $a/b=0/40$ 'a ait farklı aksel istasyonlardaki sıcaklık değişimleri (şarj)



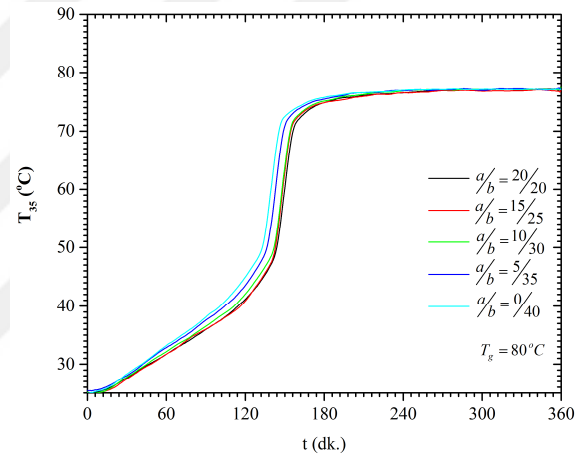
(a)



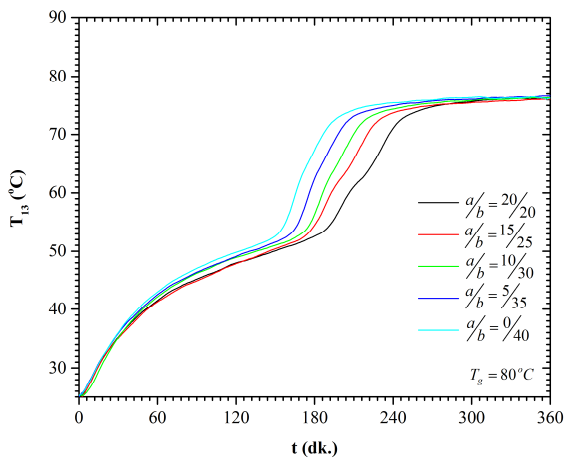
(b)



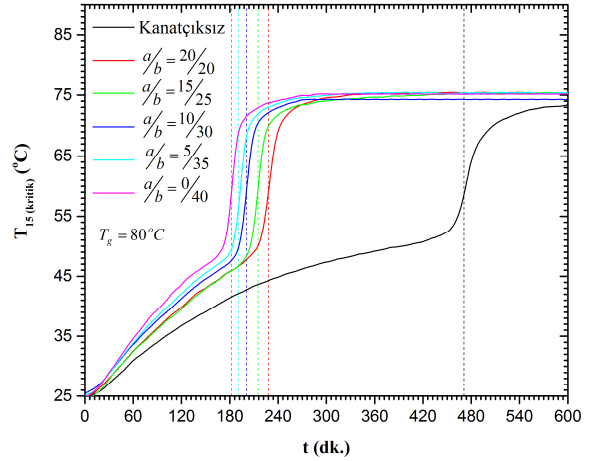
(c)



(d)

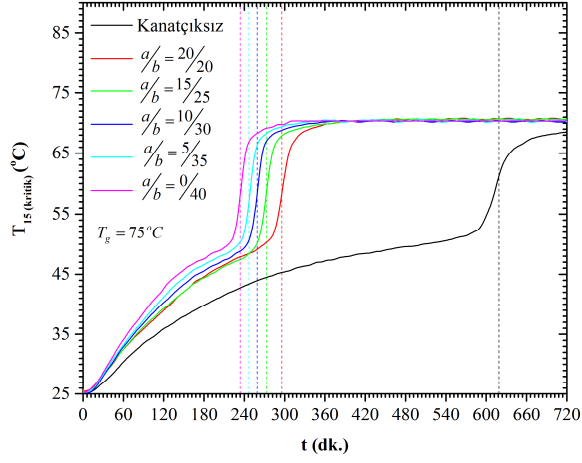


(e)

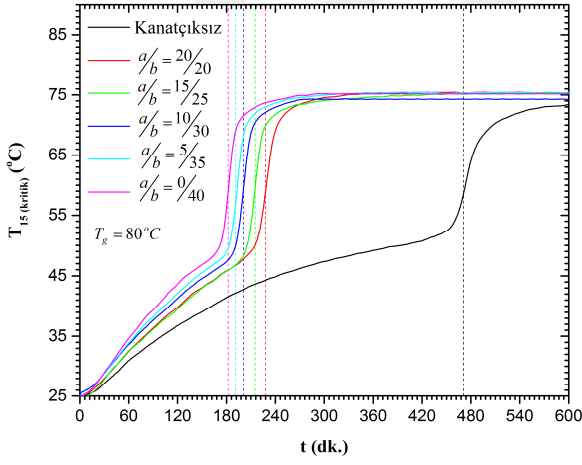


(f)

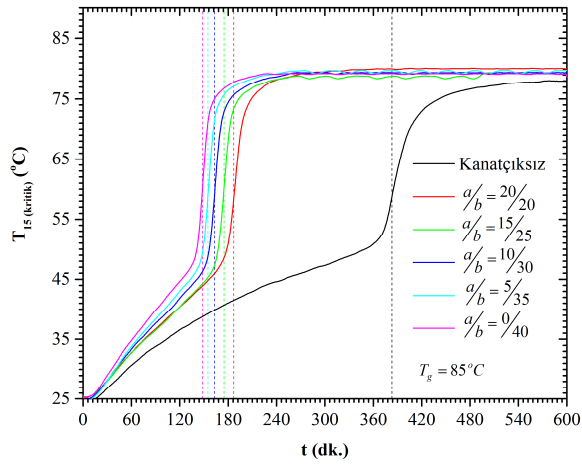
Şekil 3.14. Farklı kanatçık profilleri için ( $T_g=80^\circ\text{C}$ ) bazı istasyonlardaki sıcaklık değişimleri  $T_{63}$  (a),  $T_{65}$  (b),  $T_{33}$  (c),  $T_{35}$  (d),  $T_{13}$  (e),  $T_{15(\text{kritik})}$  (f)



(a)

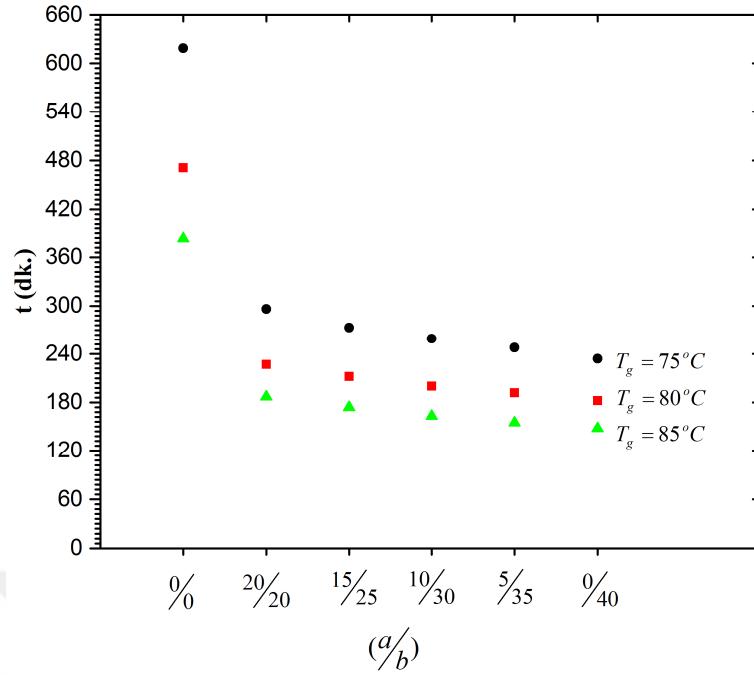


(b)



(c)

Şekil 3.15. Farklı kanatçık profilleri kritik yerel istasyonların ( $T_{15}$ ) sıcaklık değişimleri  $T_g=75^\circ\text{C}$ (a),  $T_g=80^\circ\text{C}$ (b),  $T_g=85^\circ\text{C}$ (c)



Şekil 3.16 Kanatçık kenar oranının ergime süresi üzerindeki etkisi

Tablo 3.1. Her bir kanatçık düzenlemesine ait FDM ergime süreleri

Kanatçık genişlik oranı, a/b (mm/mm)	0/0	20/20	15/35	10/40	5/35	0/40
Akışkan giriş sıcaklığı, $T_g$ ( $^\circ C$ )	80	80	80	80	80	80
Şarj süresi, t (dk.)	471	228	212	200	191,5	182,4
Kanatçiksız duruma kıyasla ergime süresindeki kısalma oranı (%)	-	51,6	55	57,6	59,3	61,2
Sabit kesitli kanatçık durumuna kıyasla ergime süresindeki kısalma oranı (%)	-	-	7	12	16	20

### 3.1. Isı Geri Kazanım (Deşarj-Katılaşma) Sürecinin İncelenmesi

Çalışma kapsamında, ısı transfer borusunun kanatçiksız ve kanatçıklı (beş farklı kanatçık profili) durumları için deşarj deneyleri tek bir akışkan giriş sıcaklığı ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ve tek bir debi değerinde ( $Q=300 \text{ l/h}$ ) gerçekleştirilmiştir.

Isı transfer borusunun kanatçiksız durumu için her bir hatta bulunan istasyonların radyal doğrultudaki zaman bağımlı sıcaklık değişimleri Şekil 3.17(a-g)'de verilmektedir. Genel karakter olarak, FDM sıcaklığının tüm istasyonlarda sırasıyla, belirli bir zaman adımına kadar hızlı bir azalış sergilediği, ilgili zaman adımından sonra azalış hızının yavaşladığı ve ilerleyen süreçle birlikte tekrar hızlı bir azalış sergileyerek akışkan giriş sıcaklığına ( $T_g=25^{\circ}\text{C}$ ) yakınsadığı görülmektedir. Sıcaklık değerlerinin azalma hızındaki yavaşlama, FDM'nin sıvı-katı faz dönüşümü ile açıklanabilir. Şekil 3.17f dikkatle incelenirse,  $T_{64}$  ve  $T_{65}$  istasyonlarının sıcaklıklarının  $58^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar hızlı bir şekilde azaldığı,  $58^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$  aralığında azalış hızının yavaşladığı ve bu aralıktan itibaren sıcaklık değerlerindeki azalmanın tekrar hızlandığı açıktır. İlgili sıcaklık aralığının ( $58^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ) deneysel çalışmada kullanılan FDM'nin sıvı-katı faz dönüşümünün gerçekleştiği aralık olduğu belirtilmelidir. Her bir hat kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise sıcaklık değerlerinde iç yüzeyden dış yüzeye doğru bir artış görülmektedir. Aynı hat içerisinde oluşan bu belirgin sıcaklık farkı, ısı transfer yönünün (FDM üzerinden akışkana) ve FDM'nin sahip olduğu düşük ısıl iletkenliğin bir sonucudur. Fakat radyal yöndeki ilgili sıcaklık farkları dikkatle incelendiğinde, en dışta bulunan istasyonların ( $T_{n5}$ ) yukarıda belirtilen davranışı sergilemeyerek radyal doğrultuda bir önceki istasyonlarla ( $T_{n4}$ ) yaklaşık olarak aynı sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, depo yüzeyinden dış ortama ( $T_{\text{ortam}}=25^{\circ}\text{C}$ ) gerçekleşen ısı kaybı ile açıklanır. Örnek olarak Şekil 3.17e incelendiğinde,  $t=240\text{dk}$ . için  $T_{51}$ ,  $T_{52}$ ,  $T_{53}$ ,  $T_{54}$  ve  $T_{55}$  istasyonları sırasıyla  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $49^{\circ}\text{C}$ ,  $53^{\circ}\text{C}$  ve  $53^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerlerini aldığı görülmektedir.

Kanatçiksız duruma ait aynı radyal ve farklı aksel mesafelerdeki FDM'nin sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 3.18.(a-e)'de verilmektedir. İlgili istasyonlardaki FDM sıcaklıkları incelendiğinde, şarj sürecinin aksine deşarj sürecinde  $t = 10 \text{ dk}$ . anından itibaren eş dağılımlı olmayan bir sıcaklık dağılımının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu davranış, deşarj zaman adımına bağlı olarak iki farklı mekanizma ile açıklanabilir. Bunlar;  $t < 30\text{dk}$  için deşarj sürecinin başlamasıyla birlikte sıcaklığı azalan sıvı FDM'nin deponun alt bölgelerine doğru hareket etmesi (doğal taşınım mekanizması) ve  $t > 30\text{dk}$ . için depo üst



kısımındaki genleşme bölgesine doğal taşınım ile olan ısı kaybının aktif rol alması şeklindedir. Bu mekanizmalar doğrultusunda, FDM sıcaklıkları deşarj zaman adımına bağlı olarak sırasıyla,  $t < 30\text{dk}$  için depo alt bölgesinde (1 ve 2 nolu hatlar ve  $t > 30\text{dk}$ . depo üst bölgesinde (6 ve 7 nolu hatlar) hızlı düşüşler sergilemektedir.

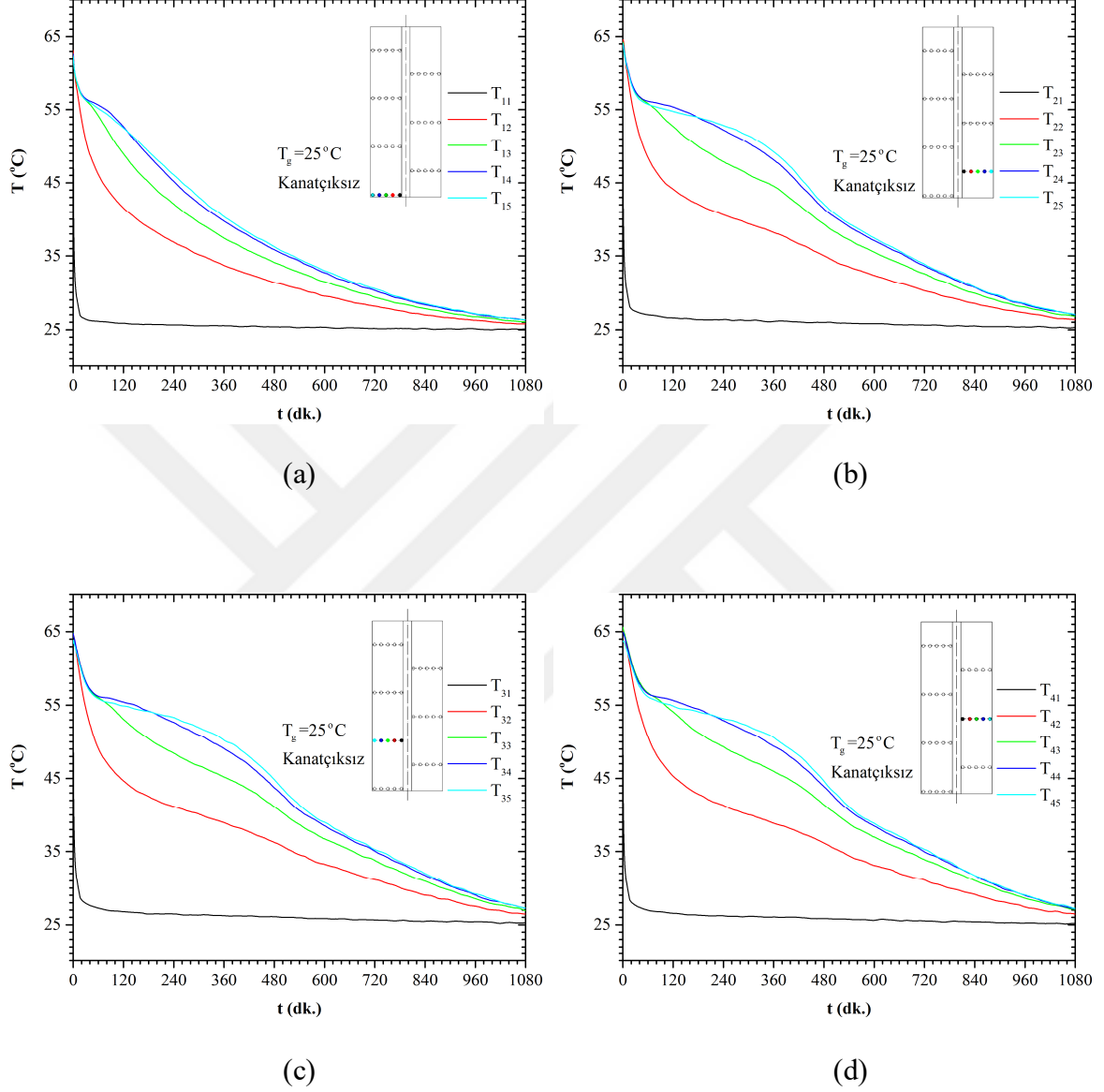
Katılma davranışının daha net bir biçimde anlaşılması için farklı zaman adımlarına ait eş sıcaklık eğrileri ve katı-sıvı ara yüzey gelişimleri Şekil 3.19'da verilmektedir. Burada, katı-sıvı ara yüzeyinin FDM katılma sıcaklık aralığının alt limiti olan  $50^\circ\text{C}$  baz alınarak oluşturulduğu not edilmelidir. İlgili grafiklerde katılmanın sırasıyla,  $t = 10\text{dk}$ . 'ya kadar eş dağılımlı (Şekil 3.19a),  $t = 10\text{ dk} - 240\text{ dk}$  aralığında aşağı yönlü dışa doğru ve  $t > 240\text{ dk}$ . ise hem aşağı hem de yukarı yönlü dışa doğru ilerleme kaydettiği görülmektedir. En son katılan bölgenin orta-dış bölge oluşu, deşarj sürecinin belirli bir periyoduna kadar etkin rol oynayan doğal taşınım mekanizmasının etkisini yitirdiğini ve bu periyottan sonra yerini iletim mekanizmasına terk ettiğini göstermektedir.

Farklı kanatçık genişlik oranları ( $a/b = 20/20, 15/25, 10/30, 5/35, 0/40$ ) için elde edilen radyal ve aksel doğrultudaki zaman bağımlı sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 3.(20-24). ve Şekil 3.(25-29). 'da sunulmaktadır. İlgili grafiklerde, tüm zaman adımları için kanatçık genişlik oranının azalışına bağlı olarak sıcaklık düşüşünün depo alt bölgesine doğru kaydığı açıkça görülmektedir. İlgili durum farklı kanatçık profilleri için belirli istasyonlar üzerinden yapılan karşılaştırma grafiklerinden (Şekil 3.30) açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum, depo alt bölgesinde genişleyen kanatçık yüzey alanı nedeniyle baskın hale gelen iletim mekanizmasının bir sonucudur.

Her bir kanatçık düzenlemesi ait kritik noktalar(en son sıvı-katı faz dönüşümünü gerçekleştiren nokta) sırasıyla, kanatçiksiz durum,  $a/b=20/20, 15/25$  için  $T_{35}$  ( $=T_{45}$  ve  $T_{55}$ ) ve  $a/b=10/30, 5/35, 0/40$  için  $T_{55}$  olarak belirlenmiştir. Her bir kanatçık düzenlemesi için ilgili istasyonlardaki FDM sıcaklık değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.31'de verilmiştir. Şekilde kesik çizgi ile gösterilen süreler, katılmanın tamamlandığı zaman adımlarını temsil etmektedir. Burada, ilgili zaman adımlarından önce depo içerisine duyulur+gizli ısı kazanımının, sonra ise sadece duyulur ısı kazanımının gerçekleştiği vurgulanmalıdır.

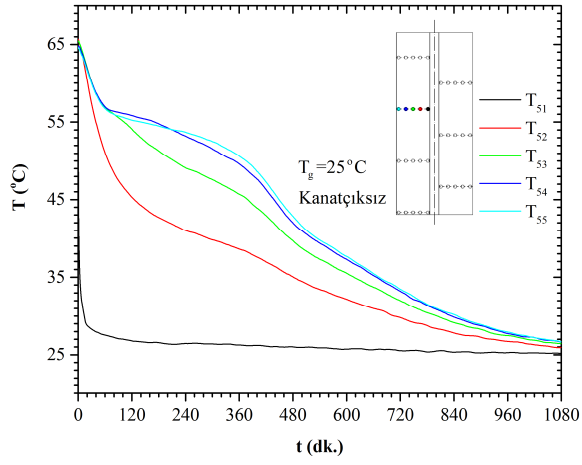
Kanatçık genişlik oranının ( $a/b$ ) katılma süresine verdiği cevap özet halinde Şekil 3.32'de sunulmaktadır. İlgili grafik dikkatle incelendiğinde, ergime davranışın aksine deşarj sürecinde kanatçiksiz durum hariç, kanatçık genişlik oranının azalmasına bağlı

olarak katılaşma sürelerinin arttığı görülmektedir. İlgili süreler ve oransal artışlar özet halinde Tablo 3.2’de verilmektedir.

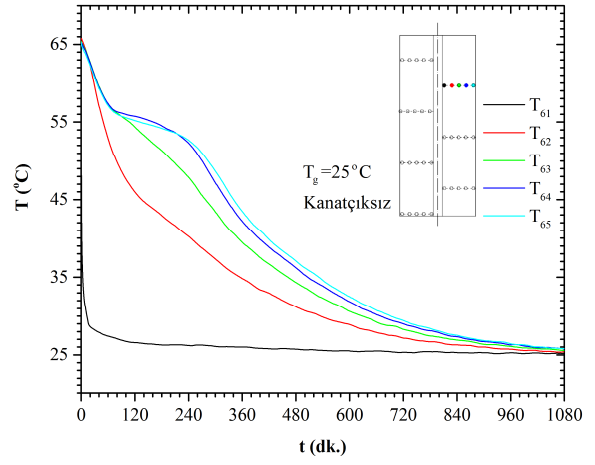


Şekil 3.17. Kanatçiksız duruma ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

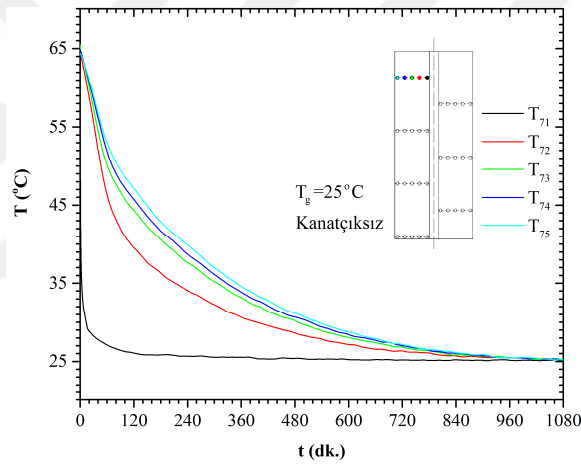
Şekil3.17.'nin devamı.



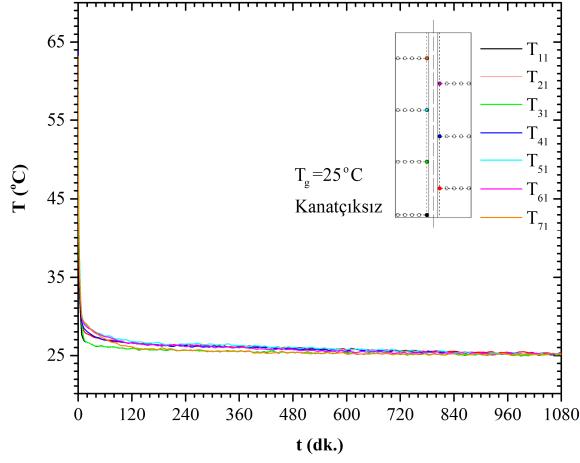
(e)



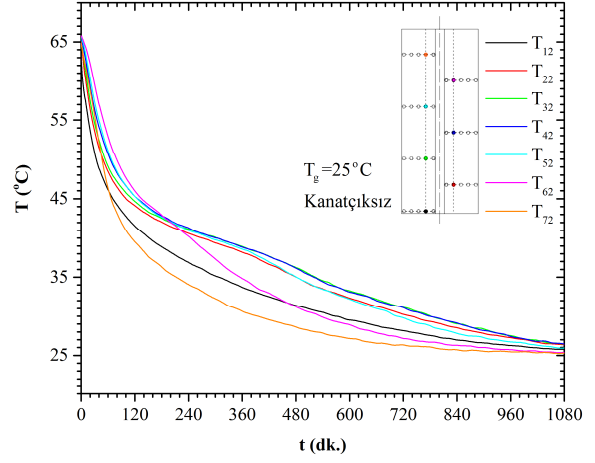
(f)



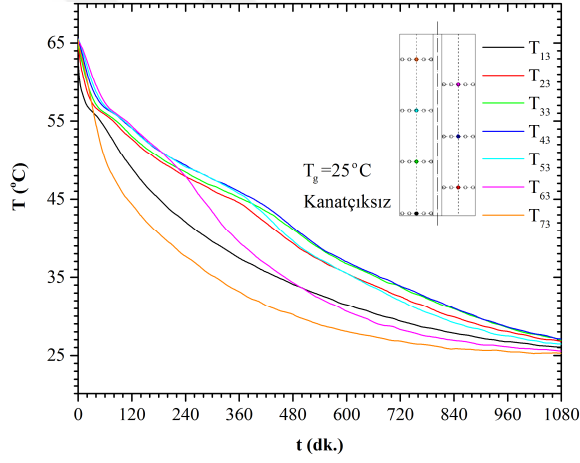
(g)



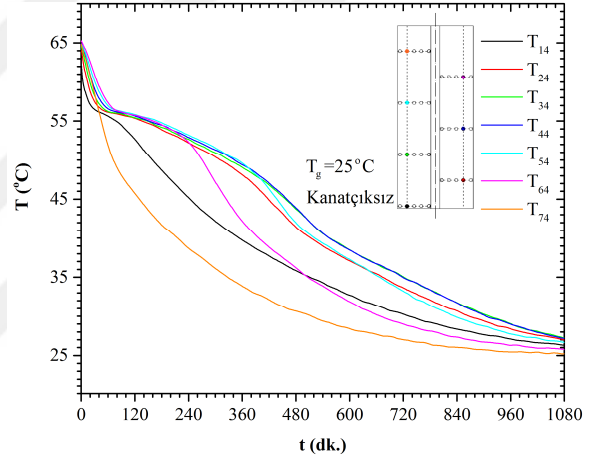
(a)



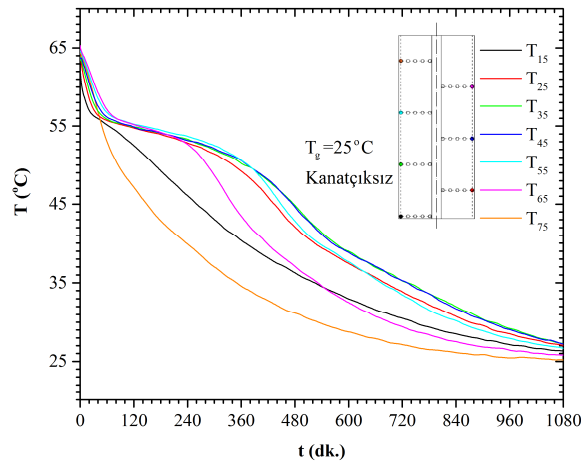
(b)



(c)

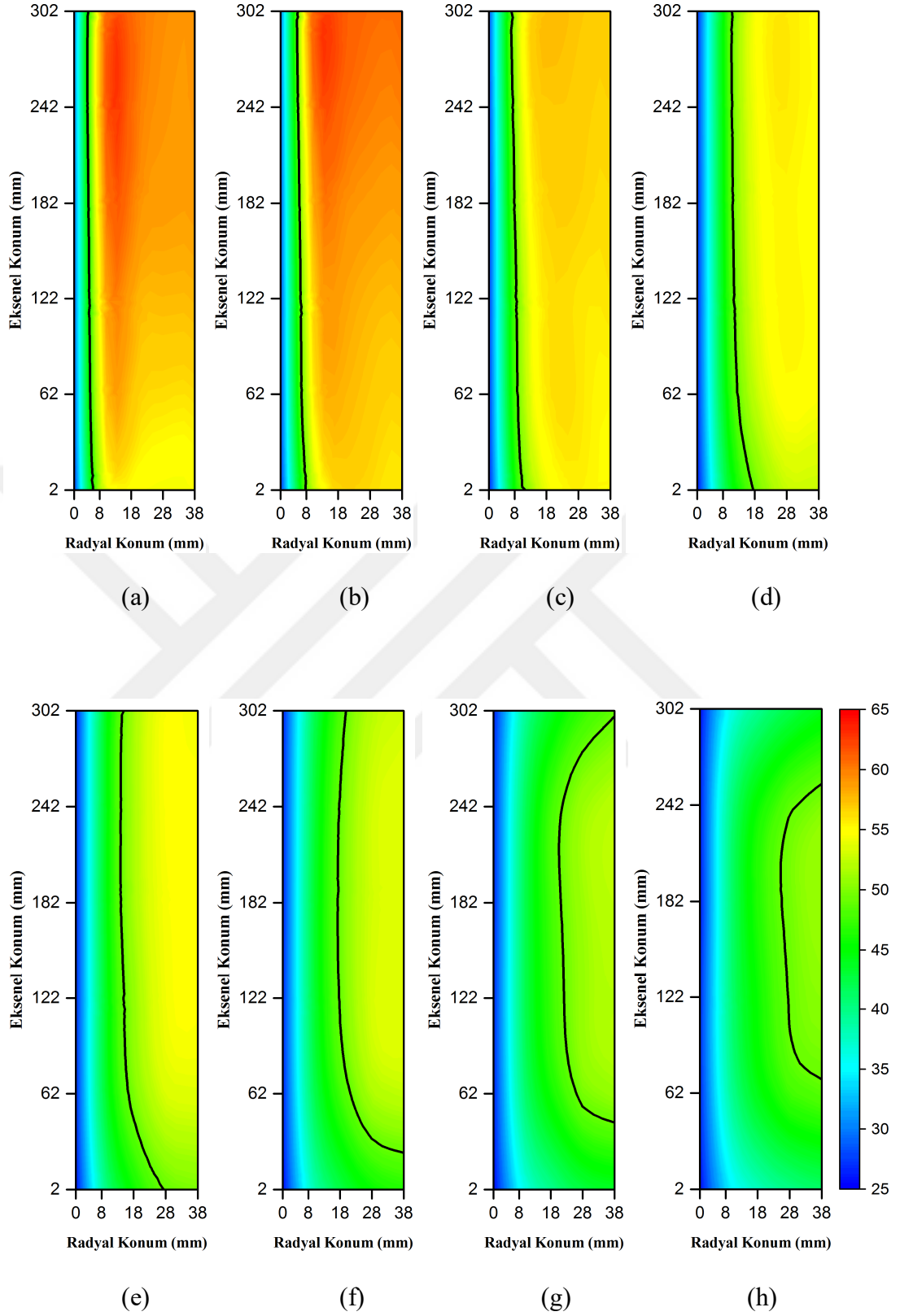


(d)

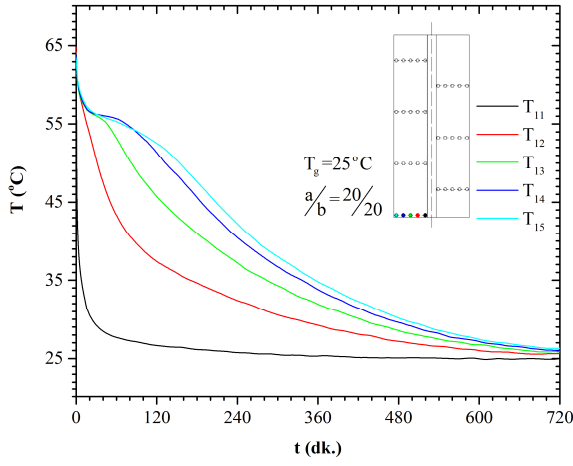


(e)

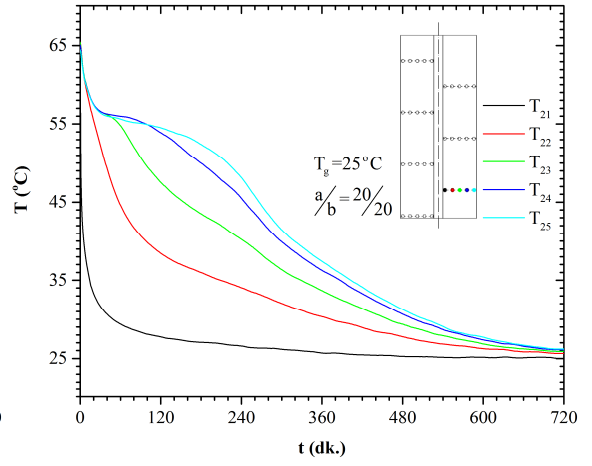
Şekil 3.18. Kanatçiksız duruma ait aksenal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)



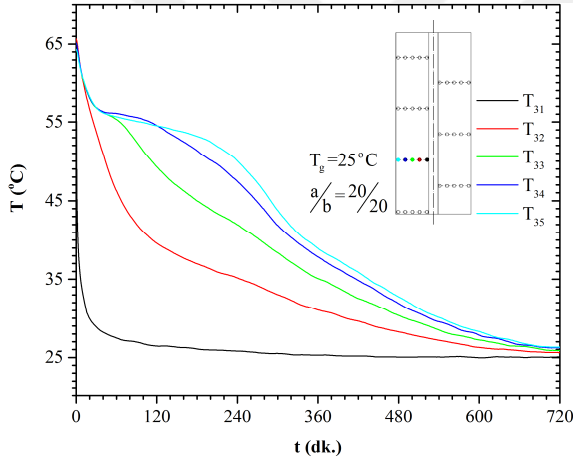
Şekil 3.19. Kanatçksız durum için farklı zaman adımlarına ait depo içerisindeki sıcaklık haritaları, 10dk. (a), 30dk.(b), 60dk. (c), 120dk. (d), 180dk. (e), 240dk. (f), 300dk. (g), 360dk.(h) (deşarj)



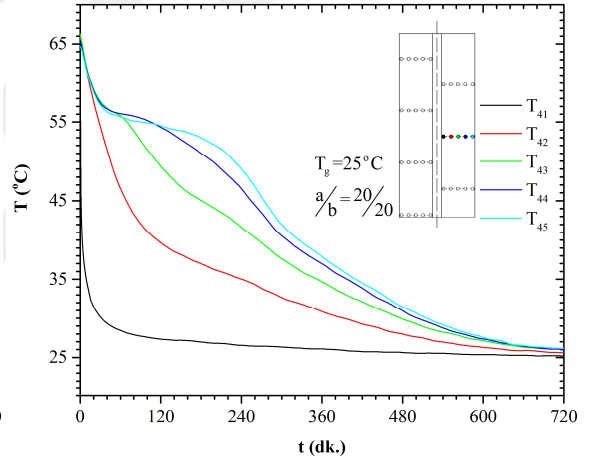
(a)



(b)



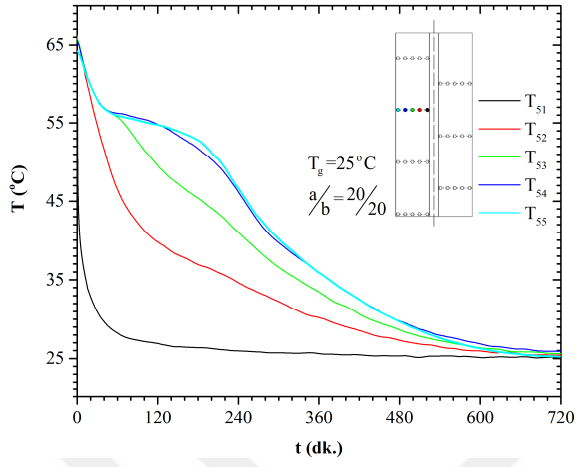
(c)



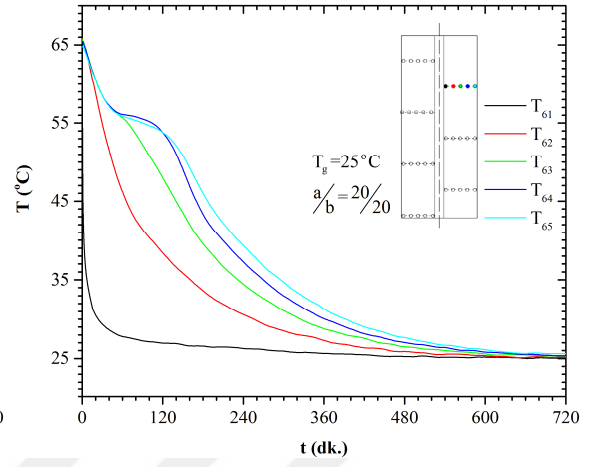
(d)

Şekil 3.20  $a/b = 20/20$  'ye ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

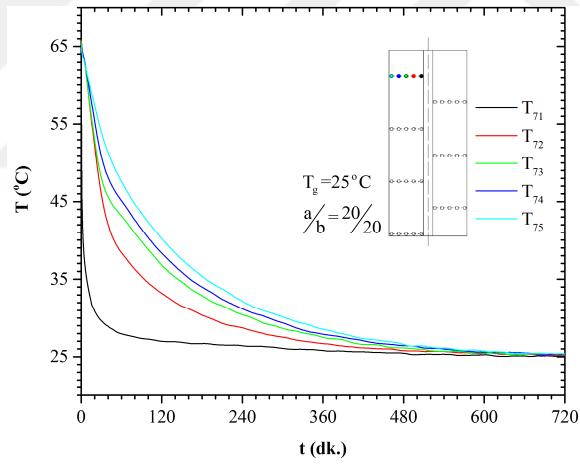
Şekil 3.20.'nin devamı



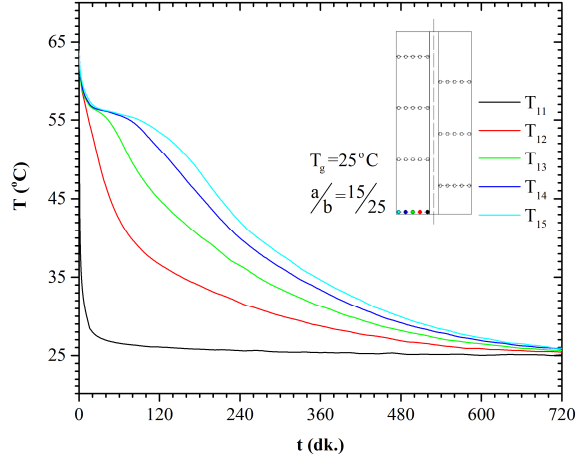
(e)



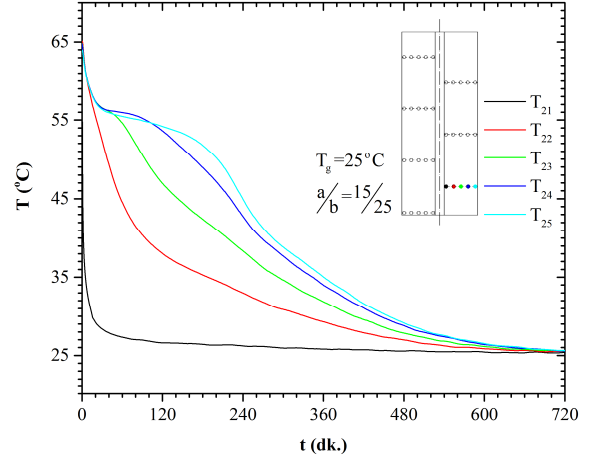
(f)



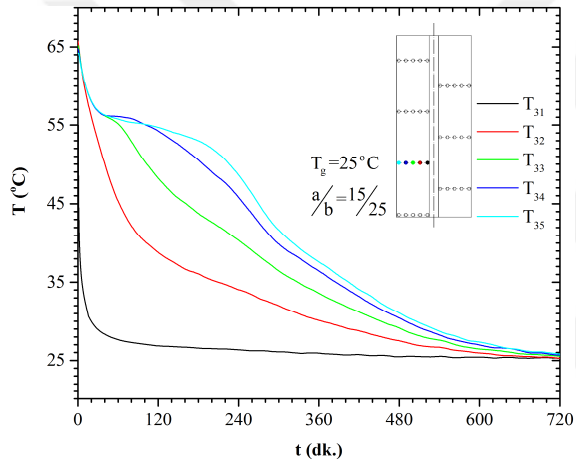
(g)



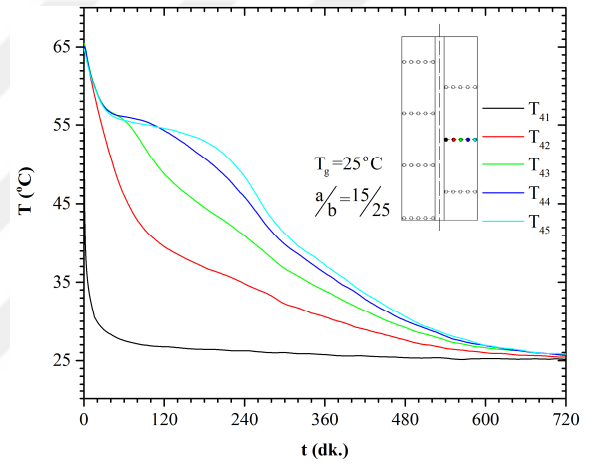
(a)



(b)



(c)

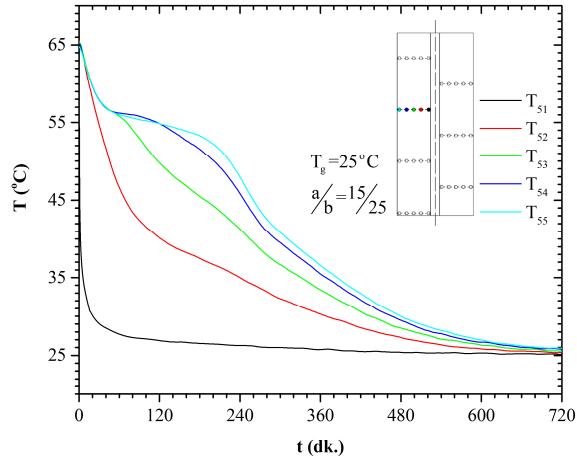


(d)

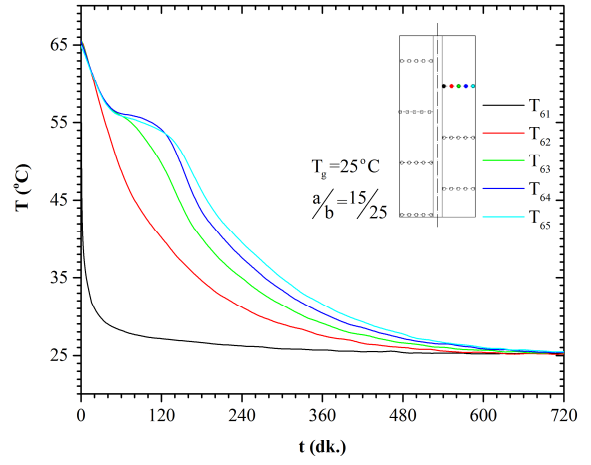
Şekil 3.21.  $a/b = 15/25$  'e ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)



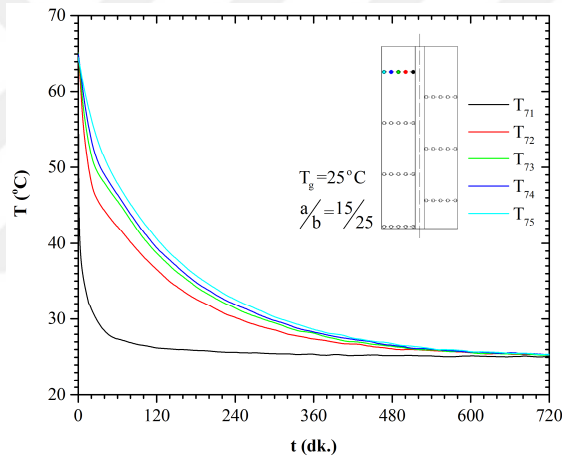
Şekil 3.21.'in devamı



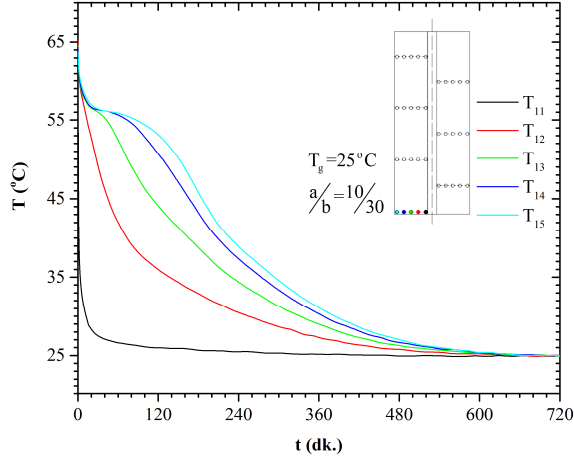
(e)



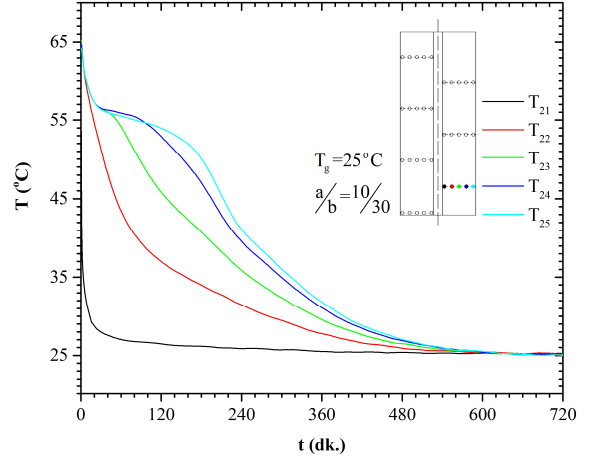
(f)



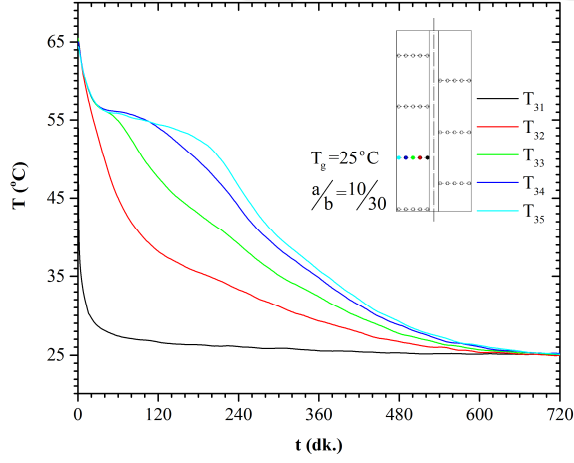
(g)



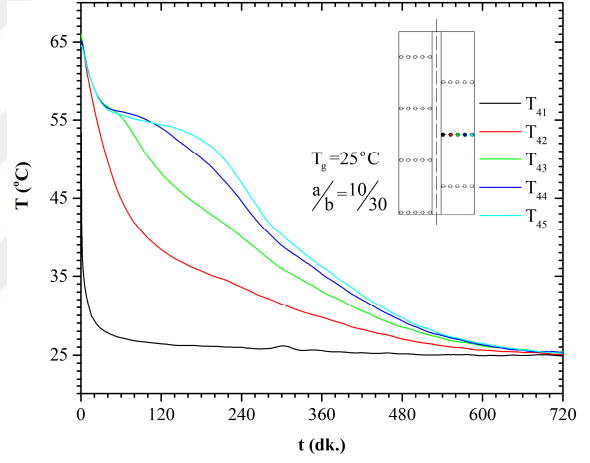
(a)



(b)



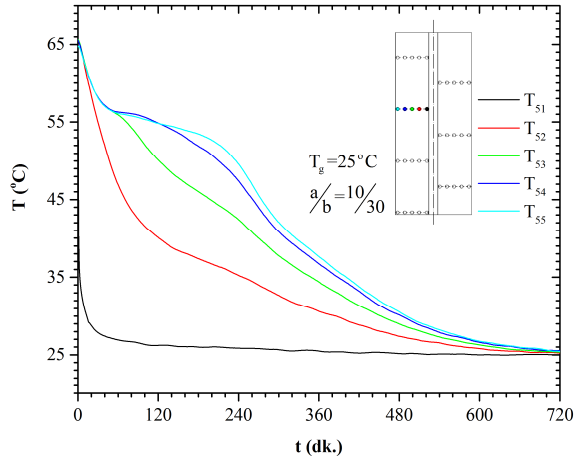
(c)



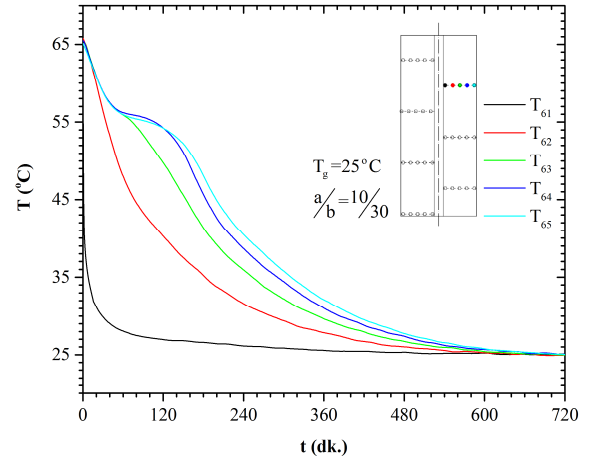
(d)

Şekil 3.22.  $a/b = 10/30$  'a ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

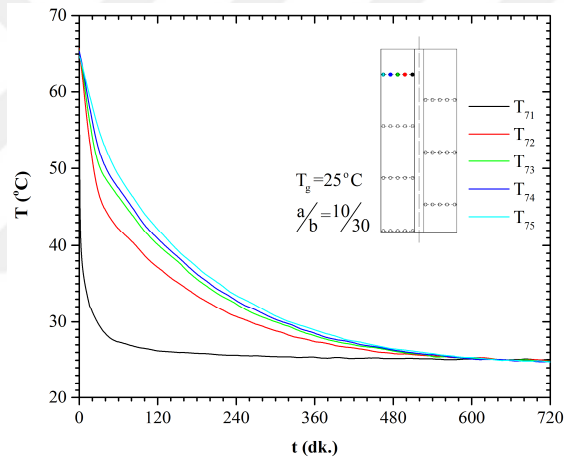
Şekil 3.22.'in devamı



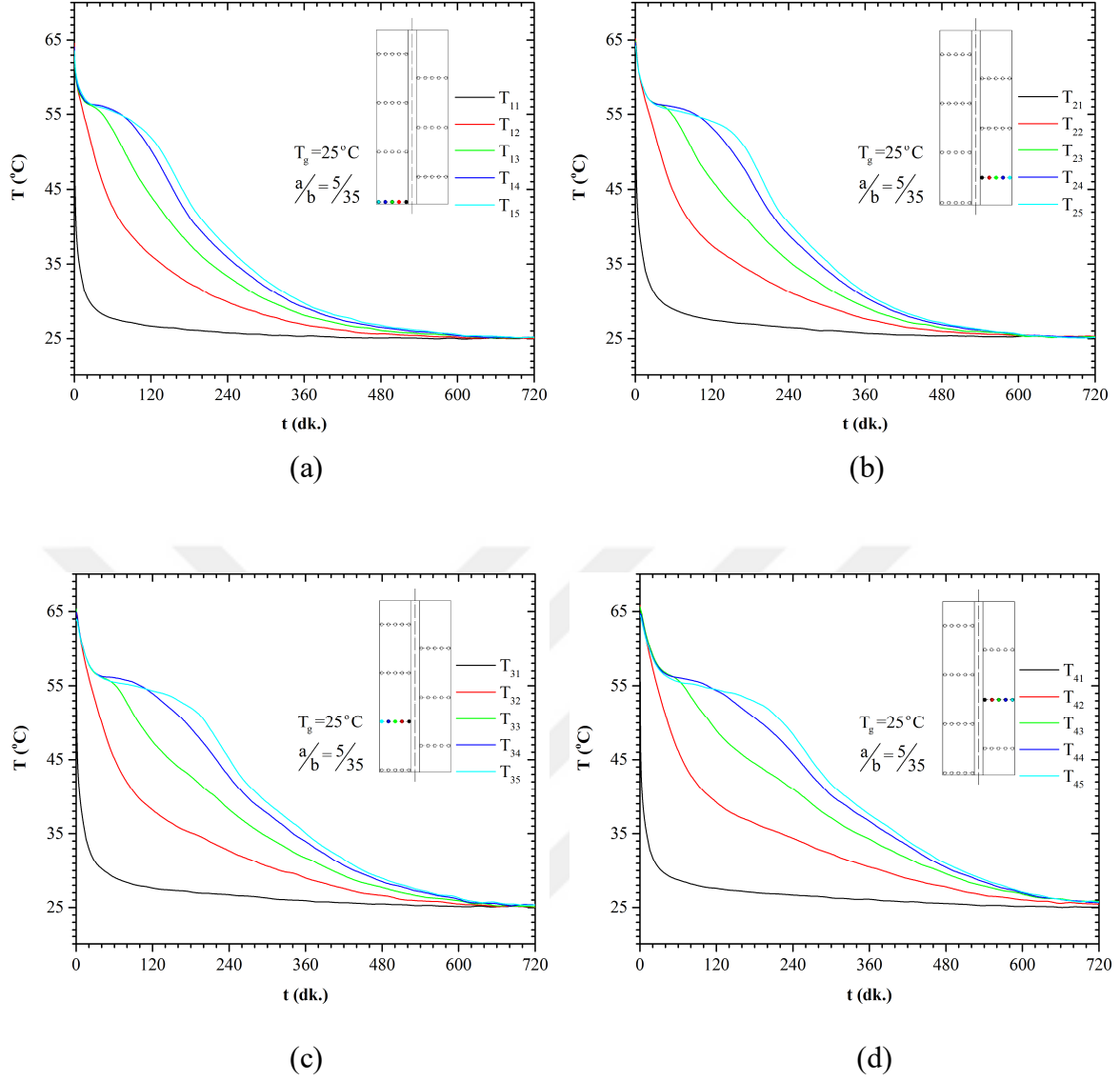
(e)



(f)

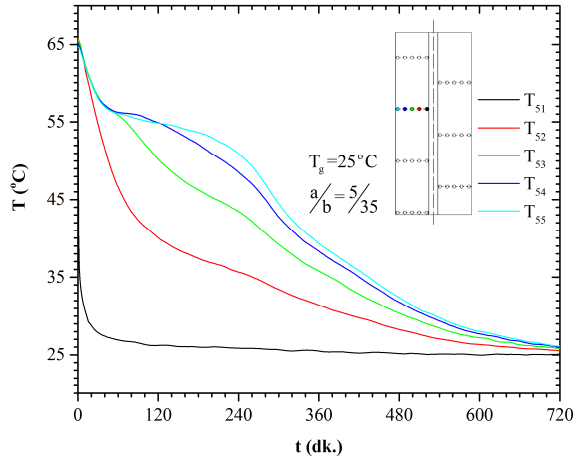


(g)

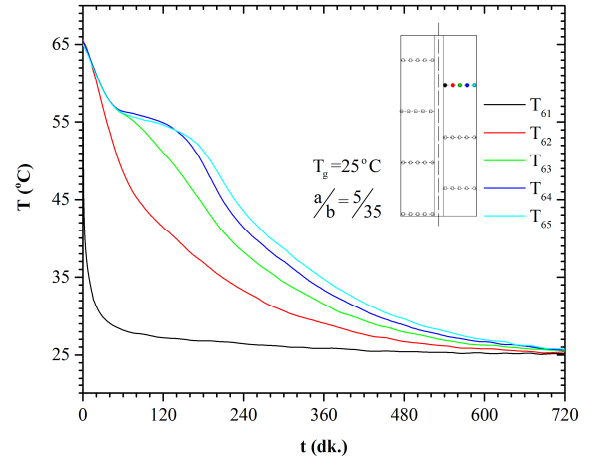


Şekil 3.23.  $a/b = 5/35$  'e ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

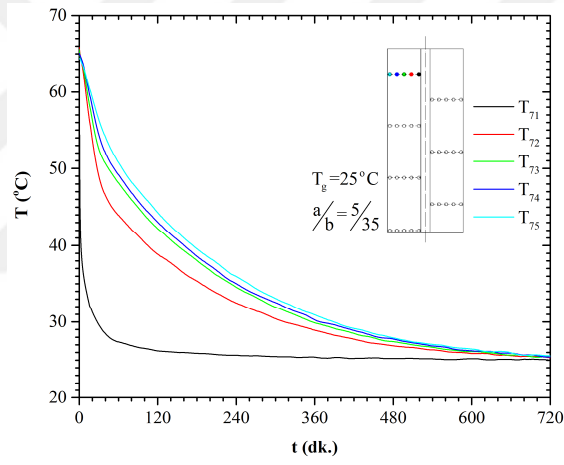
Şekil 3.23.'ün devamı



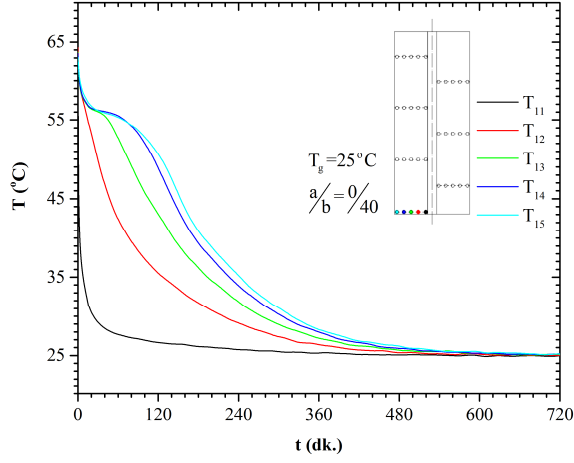
(e)



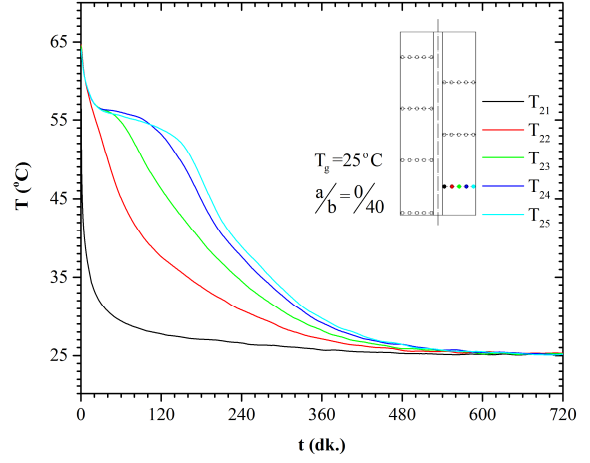
(f)



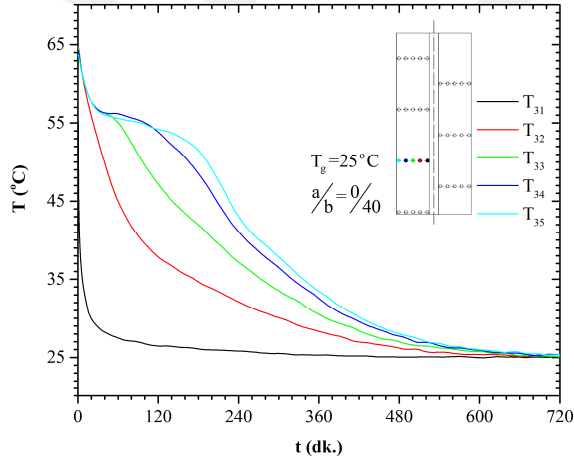
(g)



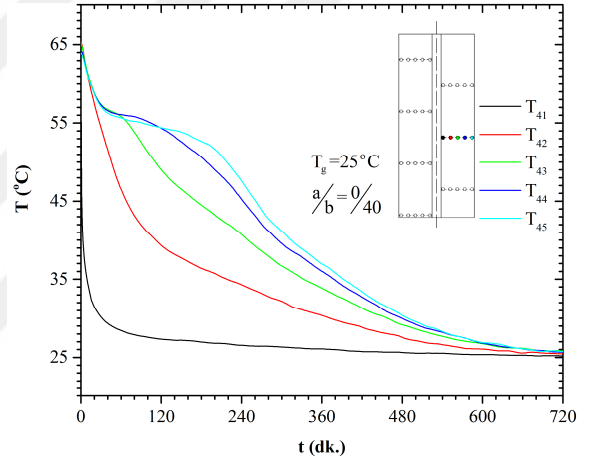
(a)



(b)



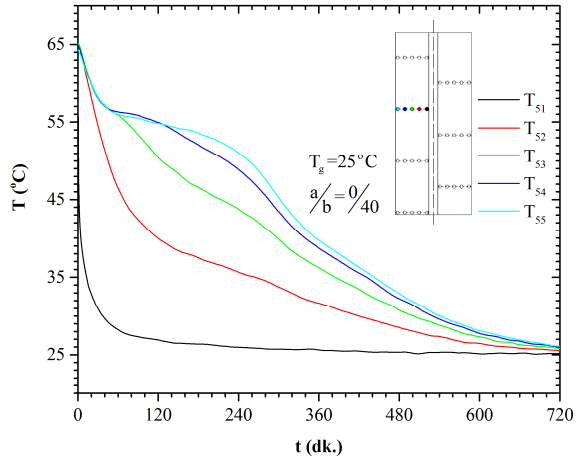
(c)



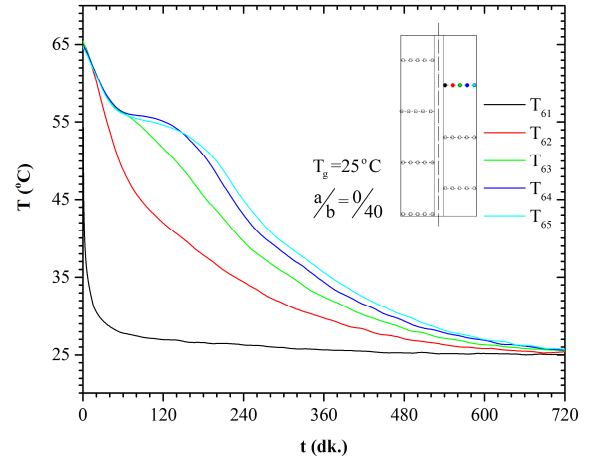
(d)

Şekil 3.24.  $a/b = 0/40$  'a ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

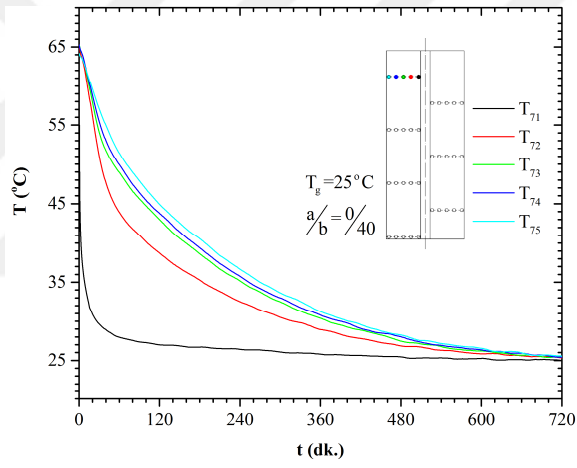
Şekil 3.24'ün devamı.



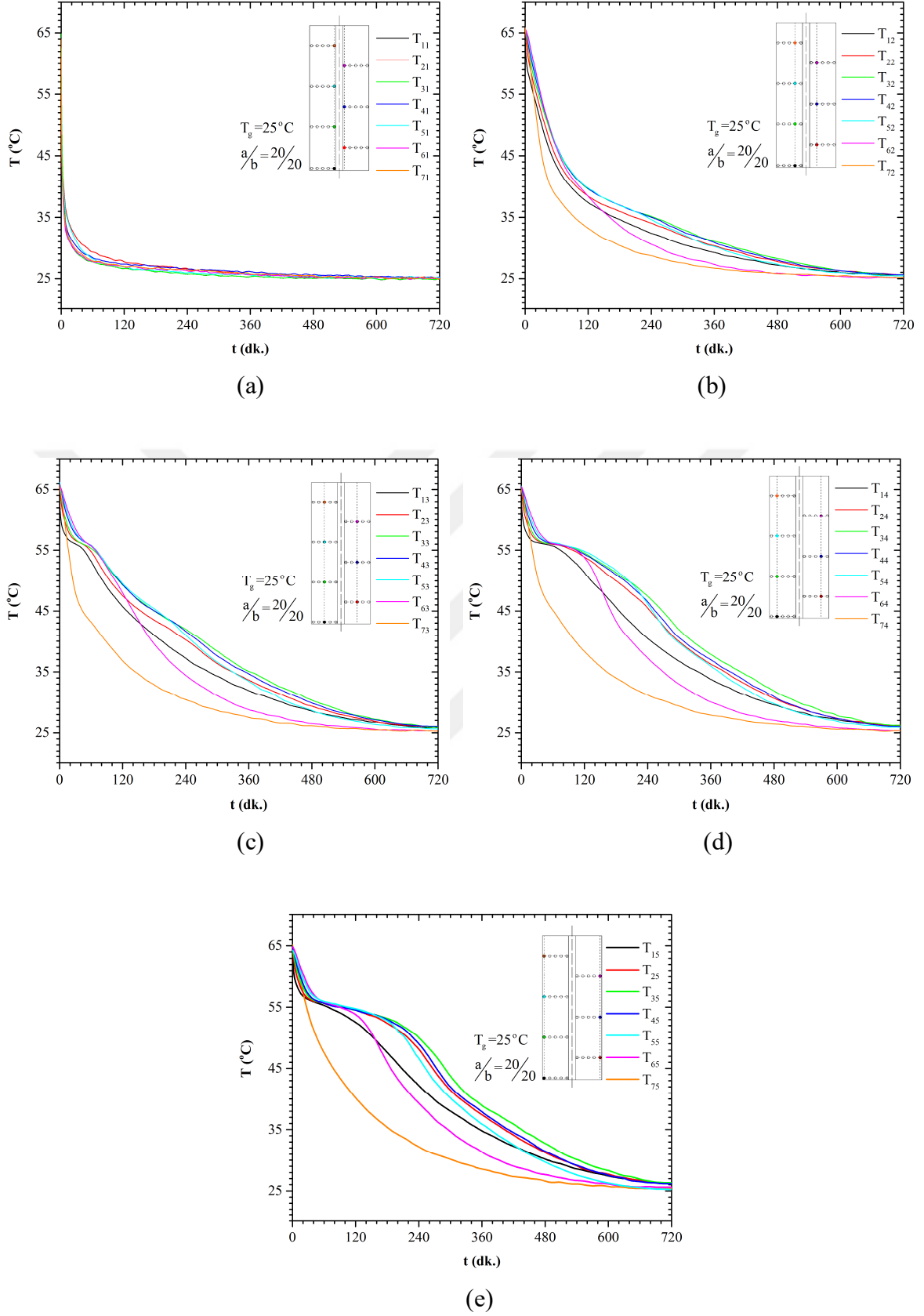
(e)



(f)

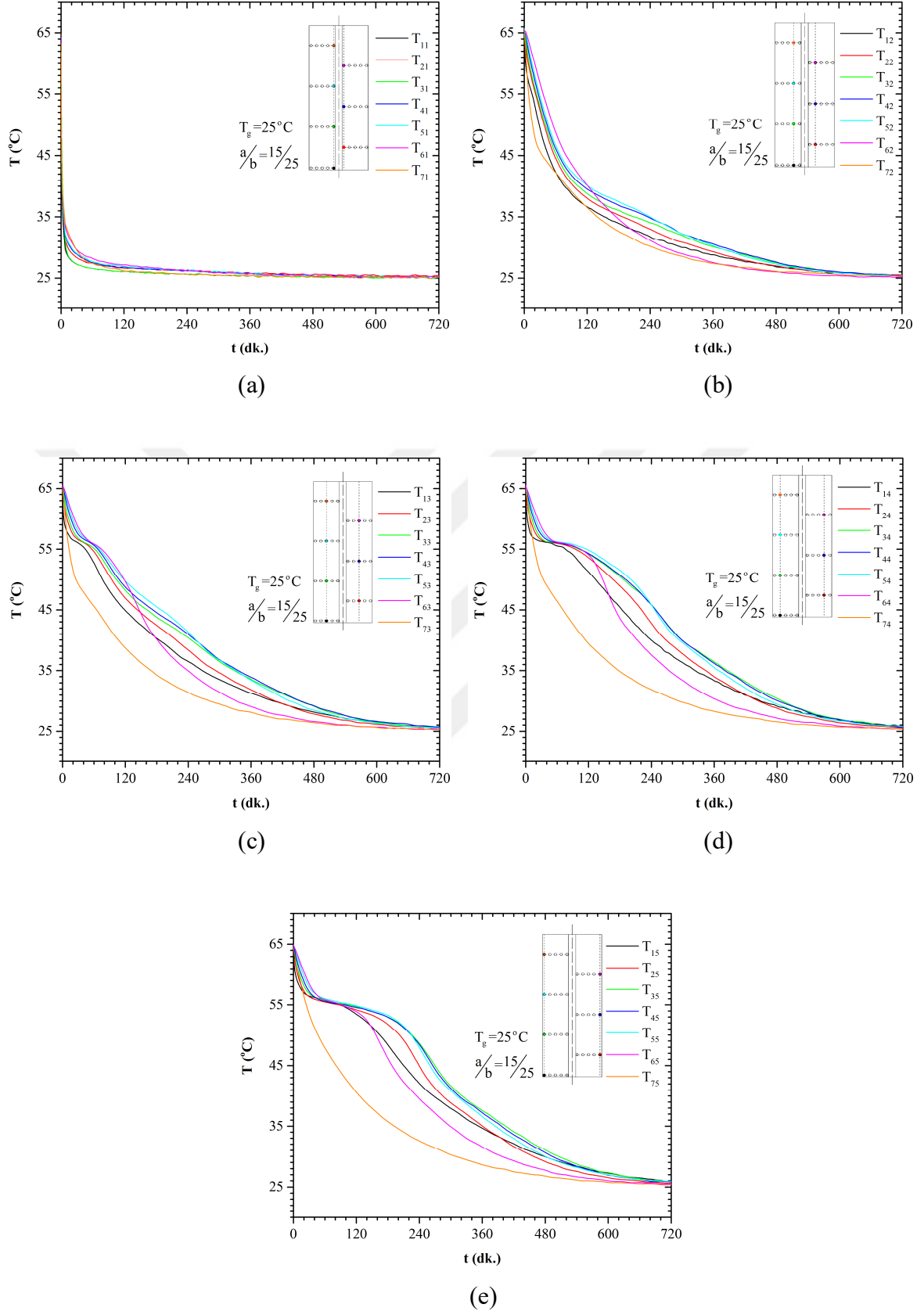


(g)

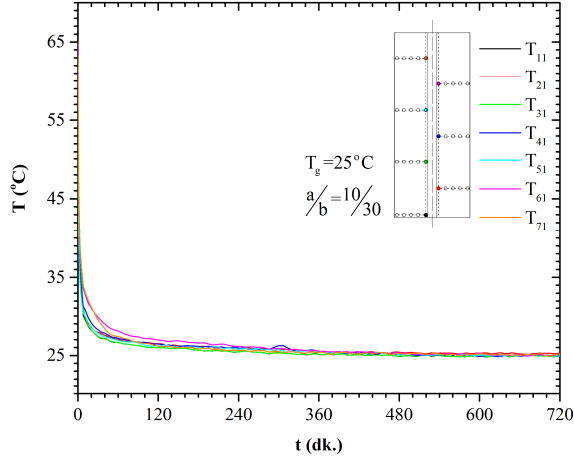


Şekil 3.25.  $a/b=20/20$ 'ye ait aksenal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

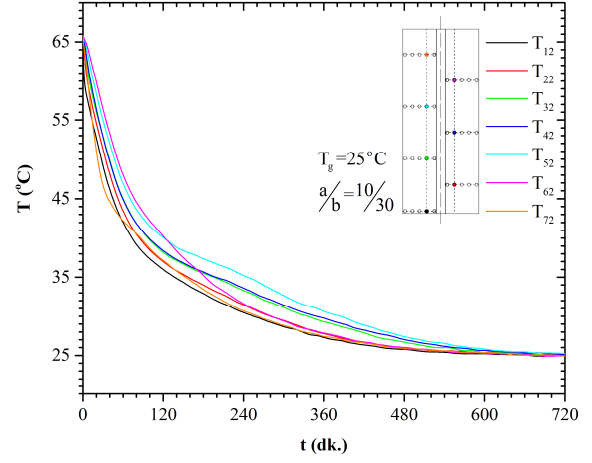




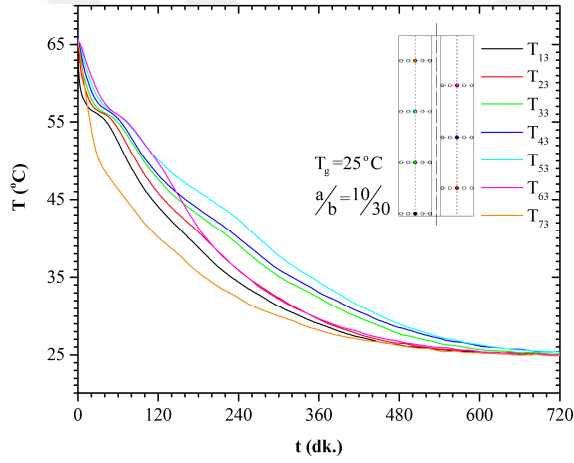
Şekil 3.26.  $a/b=15/25$ 'e ait aksenal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)



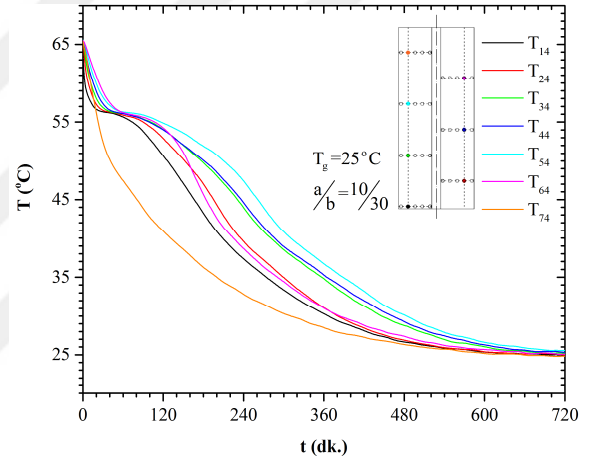
(a)



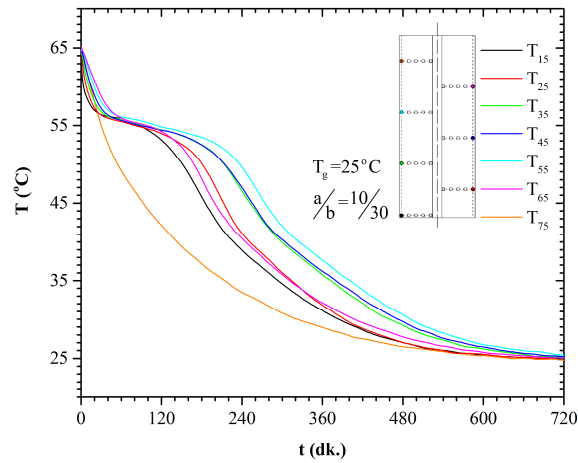
(b)



(c)

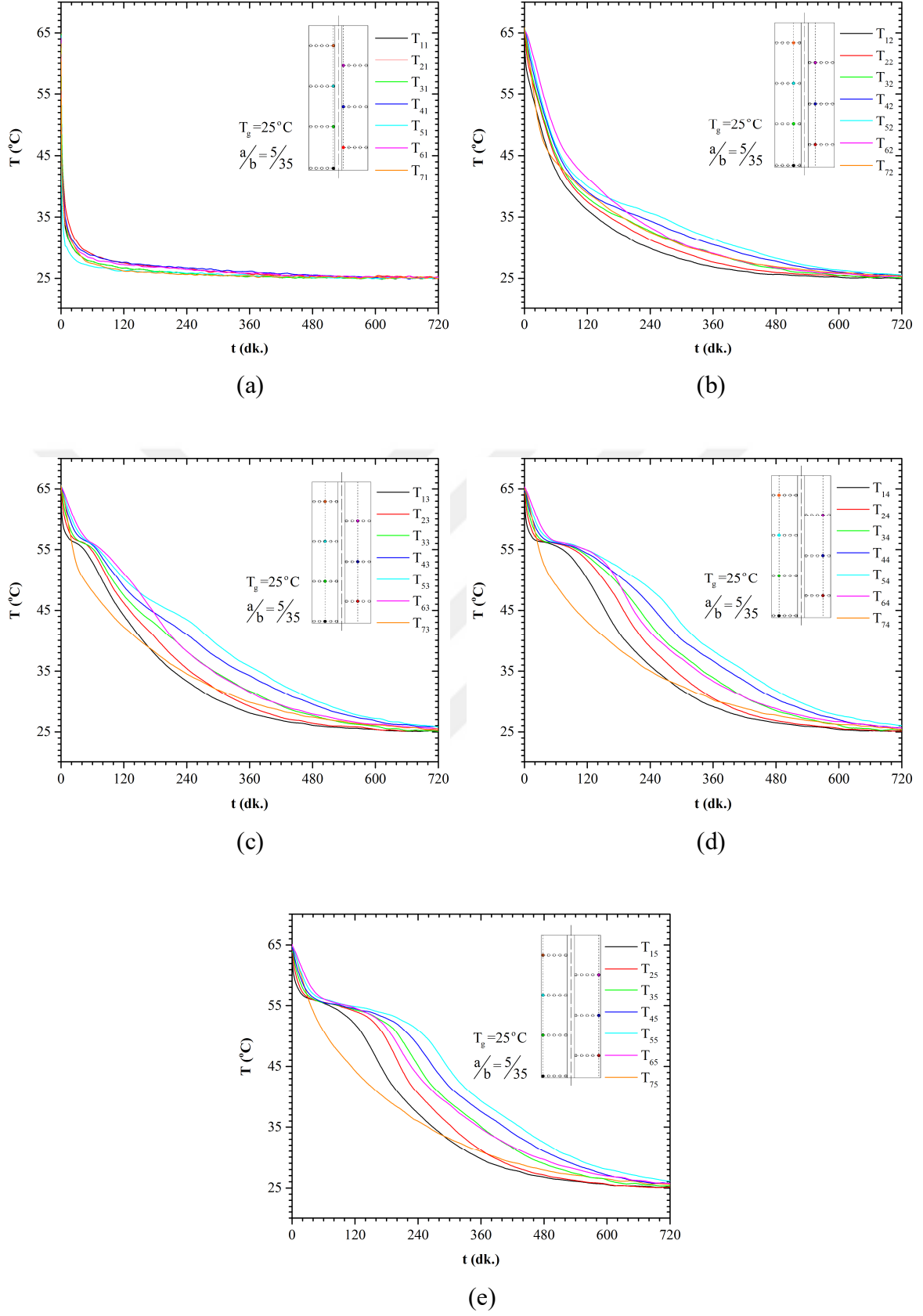


(d)

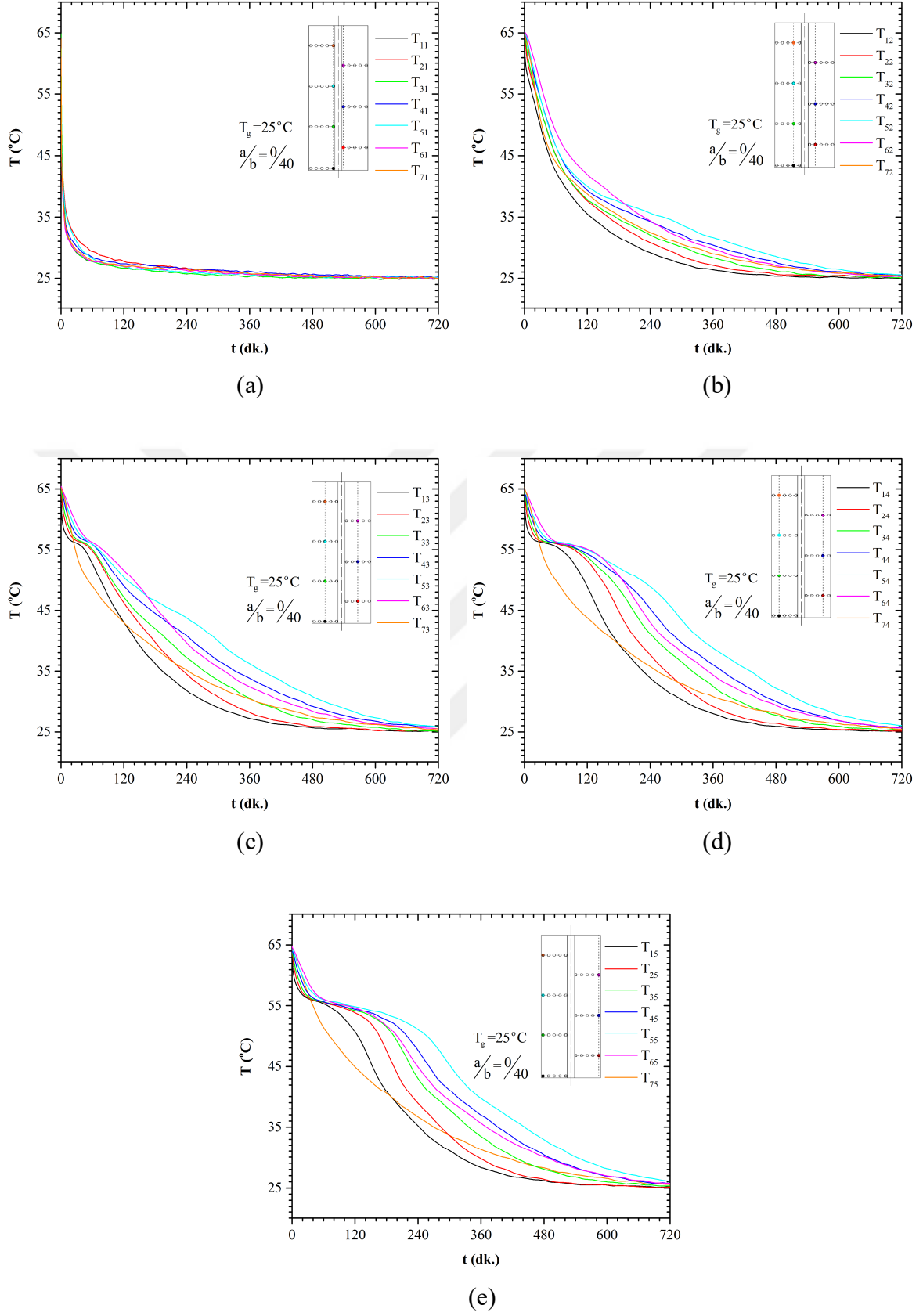


(e)

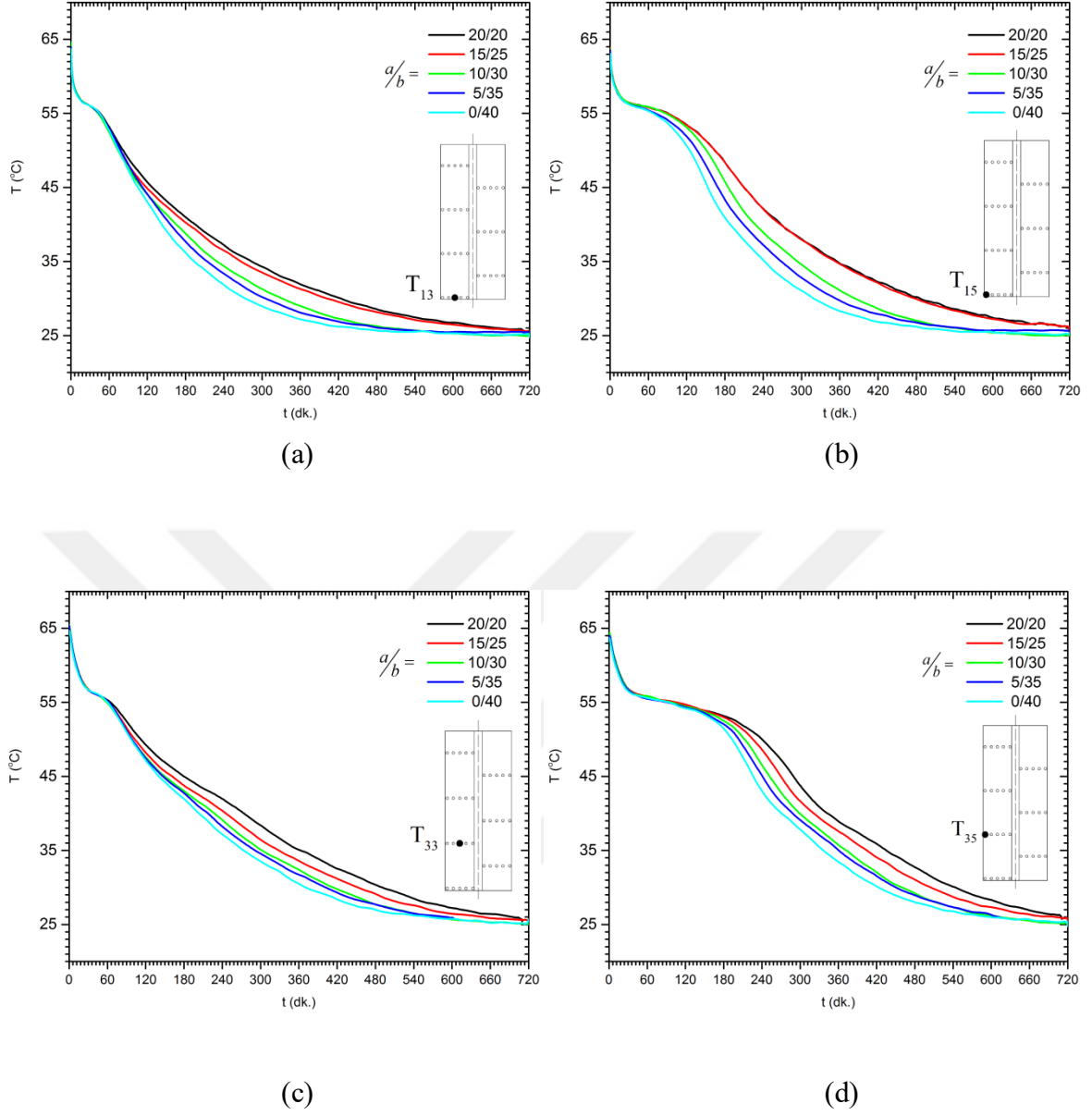
Şekil 3.27.  $a/b=10/30$ 'a ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)



Şekil 3.28.  $a/b=5/35$ 'e ait aksenal doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

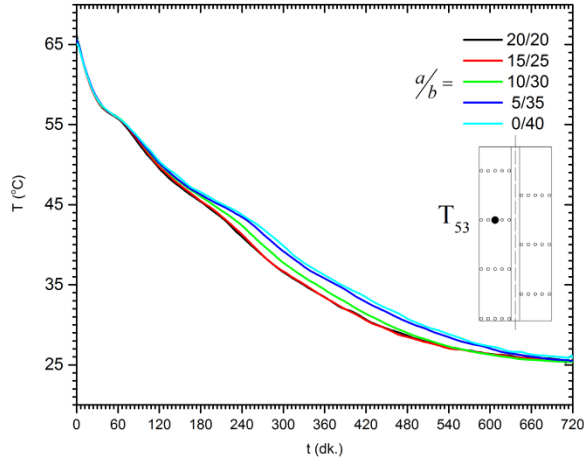


Şekil 3.29.  $a/b=0/40$ 'a ait eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimleri (deşarj)

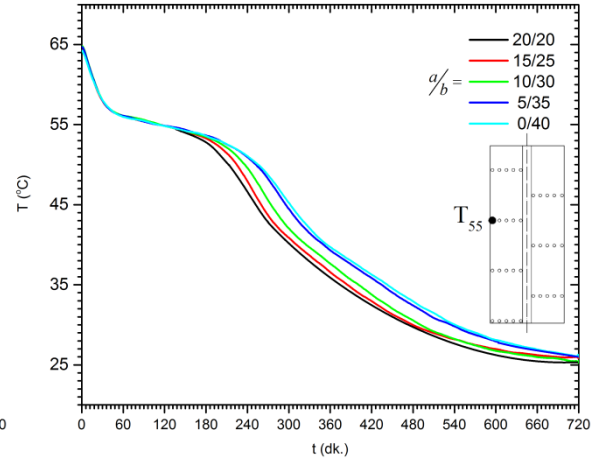


Şekil 3.30. Depo içerisindeki farklı noktaların sıcaklıklarının farklı kanatçık profilleri için karşılaştırılması (deşarj)

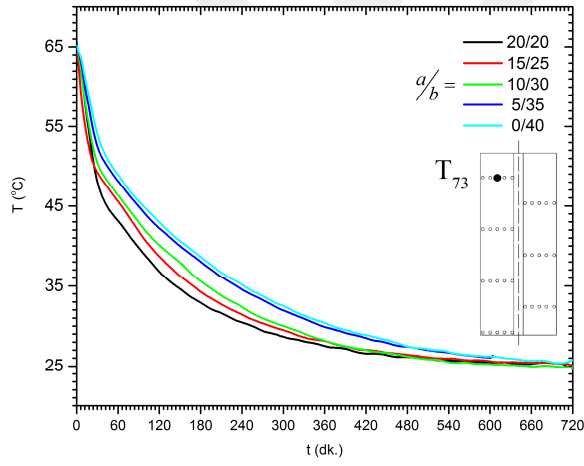
Şekil 3.30.'un devamı



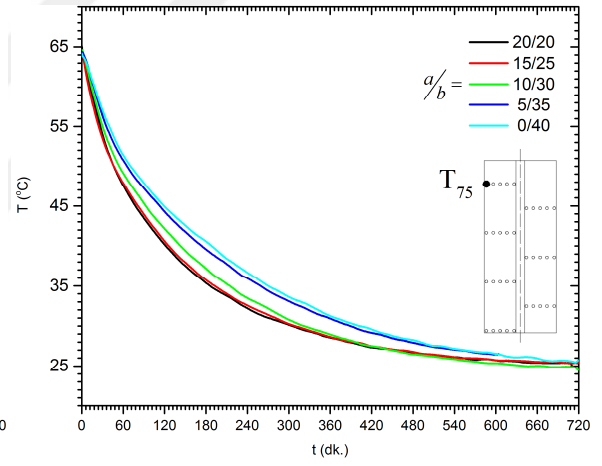
(e)



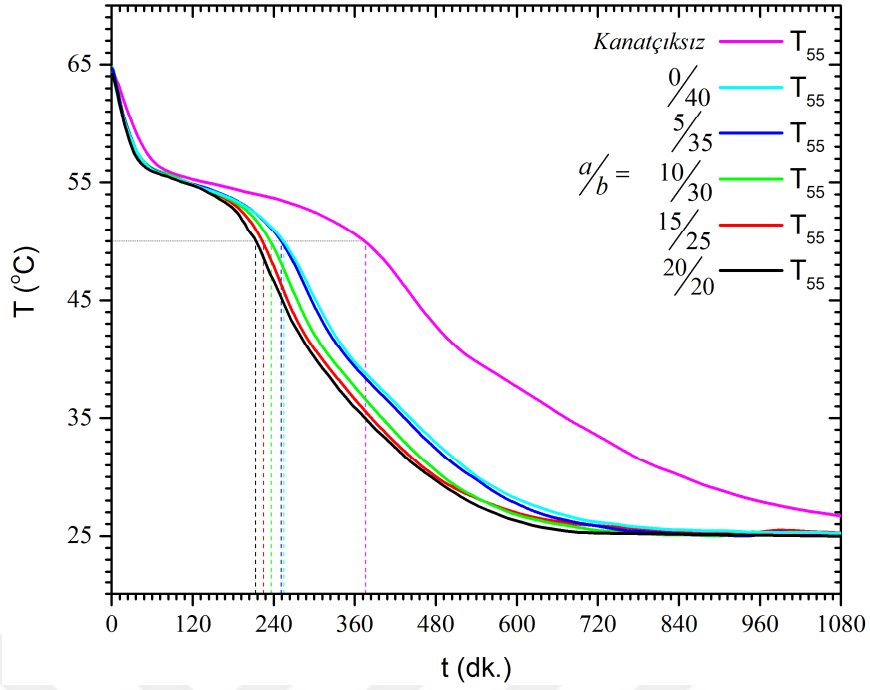
(f)



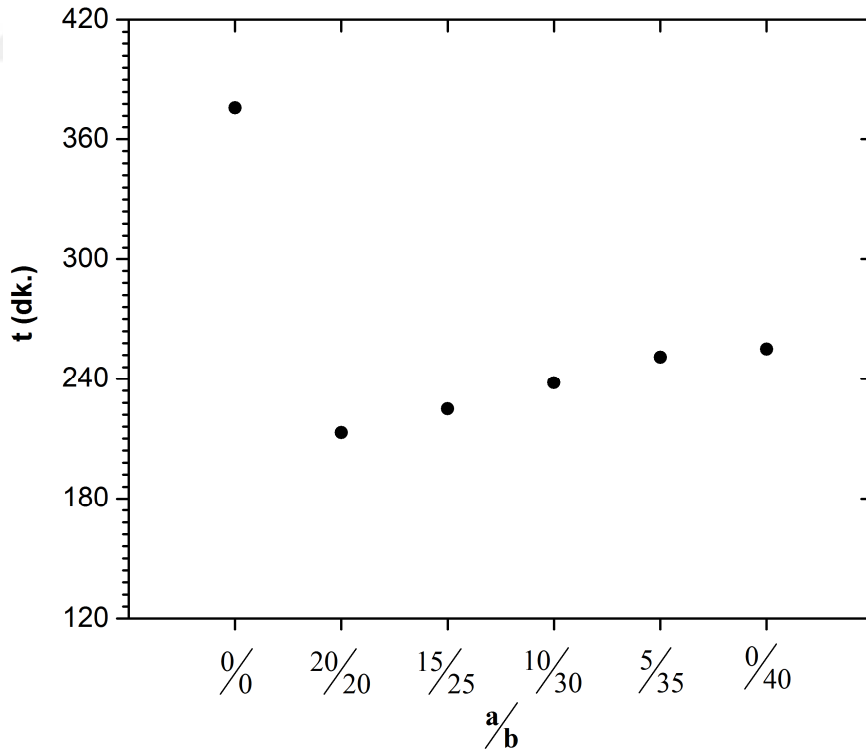
(g)



(h)



Şekil 3.31. Kritik yerel istasyonların ( $T_{55}$ ) farklı kanatçık profilleri için zaman bağımlı değişimleri (deşarj)



Şekil 3.32. Farklı kanatçık profilleri ve kanatçiksız durum içindeşarj sürelerinin karşılaştırılması

Tablo 3.2. Her bir kanatçık düzenlemesine ait deşarj süreleri

Kanatçık genişlik oranı, a/b (mm/mm)	0/0	20/20	15/35	10/40	5/35	0/40
Akışkan giriş sıcaklığı, $T_g(^{\circ}\text{C})$	25	25	25	25	25	25
Deşarj süresi, t(dk.)	376	213	225	236	251	255
Kanatçiksiz duruma kıyasla katılma süresindeki kısalma oranı (%)	-	43,6	40,1	37,2	33,5	32,1
Sabit kesitli kanatçık durumuna kıyasla katılma süresindeki uzama oranı (%)	-	-	5,7	10	15,1	16,5



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşey konumlu bir halka aralıkta depolanan FDM'nin şarj vedeşarj süreçlerine ait ısı depolama ve ısı geri kazanım karakteristiklerine farklı kanatçık profillerinin ve farklı akışkan giriş sıcaklıklarının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda verilmektedir:

- Kanatçık ilavesiz duruma kıyasla, test edilen tüm kanatçık profilleri için ergime ve katılma süreleri kısalmıştır. Akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak ergime sürelerindeki kısalma kanatçık ilavesiz duruma kıyasla  $a/b = 20/20$ ,  $15/25$ ,  $10/30$ ,  $5/35$  ve  $0/40$  için sırasıyla, %51,6, 55, 57,6, 59,3 ve %61,2, katılma sürelerindeki kısalma ise %43,6, 40,1, 37,2, 33,5 ve %32 düzeyindedir.
- Azalan kanatçık kenar oranıyla ( $a/b$ ) ergime süresi kısalmıştır. Bu davranış, depo alt yarı bölgesinde (ölü bölgede) genişleyen kanatçık yüzey alanına bağlı olarak aktif hale geçen doğal taşınım ve iletim mekanizmasının bir sonucudur. Ergime sürelerindeki kısalma, sabit kesitli kanatçık profiline ( $a/b = 20/20$ ) kıyasla  $a/b = 15/25$ ,  $10/30$ ,  $5/35$  ve  $0/40$  için sırasıyla %7, 12, 16 ve %20 mertebelerindedir.
- Kanatçık kenar oranının azalışına bağlı olarak katılma süresi uzamıştır. Akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak, katılma sürelerindeki uzama sabit kesitli kanatçık profiline ( $a/b = 20/20$ ) kıyasla  $a/b = 15/25$ ,  $10/30$ ,  $5/35$  ve  $0/40$  için sırasıyla %5,7, 10, 15,1 ve %16,5 mertebelerindedir.
- Artan akışkan giriş sıcaklığı ergime sürelerini kısalmıştır.
- Şarj süreci için kritik istasyon, kanatçıksız ve kanatçıklı (tüm profiller) durumlar için deponun en alt ve ısı transfer borusundan en uzak istasyon ( $T_{15}$ ),deşarj süreci içinse kanatçıksız ve kanatçıklı (tüm profiller) durum için deponun orta bölgesinde ısı transfer borusundan en uzak istasyondur ( $T_{55}$ ).
- FDM-temelli katı-sıvı faz dönüşümünü temel alan gizli ısı depolama sistemlerinde şarj sürelerinin kısaltılması için ısı transfer yüzey alanı depo alt bölgelerine yönlendirilmelidir.

## 5. ÖNERİLER

Konu kapsamında yapılacak çalışmalara yön vermesi açısından aşağıda bazı önerilere yer verilmiştir:

- Kanatçık kenar oranları daha geniş bir aralıkta incelenerek kenar oranlarının ergime ve katılma sürelerine etkisine dair ampirik bağıntılar geliştirilebilir.
- Farklı kanatçık sayılarının ve kalınlıklarının ergime ve katılma sürelerine etkisi incelenebilir.
- Isı transfer borusu üzerine, doğal taşınım hareketini engellemeyecek ve depo içerisinde oluşan ölü bölgeler dikkate alınacak şekilde farklı profillere sahip kanatçık ilavesi yapılabilir.
- Farklı faz dönüşüm sıcaklığına sahip FDM'ler mevcut kanatçık profilleri için test edilebilir.
- Farklı kesitlere sahip depo ve ısı transfer borusundan (örneğin dikdörtgen kesit) oluşan gizli ısı depolama sistemine, yapılan çalışmaya benzer şekilde ölü bölgeler dikkate alınarak yapılacak kanatçık ilavesinin şarj ve deşarj süreçlerine etkisi araştırılabilir.
- Farklı şekillerde konumlandırılmış depolarda da ısı transfer borusu üzerine doğal taşınım hareketini bozmayacak şekilde kanatçık ilavesi yapılabilir .
- FDM'lerin düşük ısı iletkenliğinin giderilmesine yönelik yapılan kanatçık ilavesine ek olarak nanopartikül ilavesinin şarj ve deşarj süreçlerine etkisi incelenebilir

## 6. KAYNAKLAR

1. Dinçer İ. ve Rosen, M.A., Thermal Energy Storage: Systems and Applications, John Wiley&Sons, West Sussex, 2002.
2. Akgün, M., Parafinle Gizli Isı Depo Geometrisi Optimizasyonu Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
3. Dinçer, İ. ve Dost, S., A perspective on Thermal Energy Storage Systems for Solar Energy Applications, International Journal of Energy Research, 20, 6 (1996) 547-557.
4. Keleş, S., Laurik-Miristik Asit Ötektik Karışımlarının Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
5. Norton, B., Solar Energy Thermal Technology, Springer-Verlag, London., 1992.
6. Kılış B. ve Kakaç, S., Energy Storage Systems, NATO ASI Series Kluwer Academic Publishers, London, England, 1989.
7. Yazıcı, M., Y., Kaçık Eksenli Yatay Silindirik Bir Halka İçerisinde Parafinle Gizli Isı Depolama, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
8. Hasnain, M.S., Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials on Techniques, Energy Convers. Mgmt., 39, 11 (1998a) 1127-1138.
9. Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack S.A.K. ve Al-Hallaj S., A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, Energy Conversion and Management, 45 (2004)1597-1615.
10. Zalba, B., vd., Review on Thermal EnergyStorage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23 (2003) 251-283.
11. Sharma, A., vd., Numerical Heat Transfer Studies of the Fatty Acids for Different Heat Exchanger Materials on the Performance of a Latent Heat Storage System, Renewable Energy, 30, 14 (2005) 2179-2187.
12. Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. 1: Background and Scientific Principles, CRC Press, Florida, 1988.

13. Carlsson, B. ve Wettermark, G., Heat Transfer Properties of a Heat-of-Fusion Storage Based on  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , Solar Energy, 24 (1979) 239-247.
14. Katayama, K., vd., Heat Transfer Characteristics of The Latent Heat Thermal Energy Storage Capsule, Solar Energy, 27, 2 (1981) 91-97.
15. Dietz, D., Thermal Performance of a Heat Storage Module Using Calcium Chloride Hexahydrate, Journal of Solar Energy Engineering, 106 (1984) 106-111.
16. Choi, H.S., vd., Heat Transfer in a Latent Heat-Storage System, Solar Energy, 14 (1989) 513-524.
17. Cao, Y., vd., A PCM/Forced Convection Conjugate Transient Analysis of Energy Storage Systems with Annular and Countercurrent Flows, Journal of Heat Transfer, 113 (1991) 37-42.
18. Hasan, A., Thermal Energy Storage System with Stearic Acid as Phase Change Material, Energy Convers. Mgmt., 30, 10 (1994) 843-856.
19. Akgün, M., Kalsiyum klorür heksahidratın silindirik depolayıcıda ısı kapasitesinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
20. Esen, M. ve Ayhan, T., Development of a Model Compatible with Solar Assisted Cylindrical Energy Storage Tank and Variation of Stored Energy with Time for Different Phase Change Materials, Energy Convers. Mgmt., 37, 12 (1996) 1775-1785.
21. Khillarkar, D.B., vd., Melting of a Phase Change Material in Concentric Horizontal Annuli of Arbitrary Cross-Section, Applied Thermal Engineering, 20 (2000) 893-912.
22. Trp, A., 2005. An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit, Solar Energy, 79,6 (2005) 648-660.
23. Akgün, M., vd., Experimental Study on Melting/Solidification Characteristics of a Parafin, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 669-678.
24. Adine, H., A., Qarnia, H. E., Numerical Analysis of the Thermal Behaviour of a Shell-and-tube Heat Storage Unit Using Phase Change Materials, Applied Mathematical Modelling, 33 (2009) 2132–2144.
25. Longeon vd., Experimental and Numerical Study of Annular PCM Storage in the Presence of Natural Convection, Applied Energy, 112 (2013) 175–184.
26. Başal, B., Eş Eksenli Üç Borulu Isı Eşanjörlerinde Faz Değiştiren Madde Kullanarak Isıl Enerji Depolanmasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.

27. Avcı, M., ve Yazıcı, M., Y., Experimental Study of Thermal Energy Storage Characteristics of a Paraffin in a Horizontal Tube-in-Shell Storage Unit, Energy Conversion and Management, 73 (2013) 271–277.
28. Yazıcı, M., Y., vd, Effect of Eccentricity on Melting Behavior of Paraffin in a Horizontal Tube-in-Shell Storage Unit: An Experimental Study, Solar Energy, 101 (2014) 291–298.
29. Yazıcı, M., Y., vd, On the Effect of Eccentricity of a Horizontal Tube-in-Shell Storage Unit on Solidification of a PCM, Applied Thermal Engineering, 64 (2014) 1-9.
30. Hosseini, M., J., Experimental and Computational Evolution of a Shell and Tube Heat Exchanger as a PCM Thermal Storage System, International Communications in Heat and Mass Transfer, 50 (2014) 128–136.
31. Mahdi, J., M., ve Nsofor, E., C., Solidification of a PCM with Nanoparticles in Triplex-Tube Thermal Energy Storage System, Applied Thermal Engineering, 108 (2016) 596–604.
32. Pahamli, Y. vd, Analysis of the Effect of Eccentricity and Operational Parameters in PCM-filled Single-pass Shell and Tube Heat exchangers, Renewable Energy, 97 (2016) 344-357.
33. Kousha, N. vd., Effect of Inclination Angle on the Performance of a Shell and Tube Heat Storage Unit – An Experimental Study, Applied Thermal Engineering, 112 (2017) 1497–1509.
34. Choi, J., C. ve Kim, D., Heat-Transfer Characteristics of a Latent Heat Storage System Using  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , Energy, 17, 12 (1992) 1153-1164.
35. Lacroix, M., Study of Heat Transfer Behavior of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 36, 8 (1993) 2083-2092.
36. Ismail, K., A., R., vd., Numerical and Experimental Study on the Solidification of PCM Around a Vertical Axially Finned Isothermal Cylinder, Applied Thermal Engineering, 21 (2001) 53-77.
37. Stritih, U., An Experimental Study of Enhanced Heat Transfer in Rectangular PCM Thermal Storage, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) 2841–2847.
38. Mosaffa, A., H., vd., Analytical Modeling of PCM Solidification in a Shell and Tube Finned Thermal Storage for Air Conditioning Systems, Energy and Buildings, 49 (2012) 356–361.

39. Mat, S., vd., Enhance Heat Transfer for PCM Melting in Triplex Tube with Internal–External Fins, Energy Conversion and Management, 74 (2013) 223–236.
40. Abduljalil, A., A., vd., Experimental Study of Melting and Solidification of PCM in a Triplex Tube Heat Exchanger with Fins, Energy and Buildings 68 (2014) 33–41
41. Rathod, M., K., ve Banarjee, J., Thermal Performance Enhancement of Shell and Tube Latent Heat Storage Unit using Longitudinal Fins, Applied Thermal Engineering, 75 (2015) 1084-1092.
42. Sciacovelli, A., vd., Maximization of Performance of a PCM Latent Heat Storage System with Innovative Fins, Applied Energy, 137 (2015) 707–715.
43. Li, Z., Wu, Z., G., Analysis of HTFs, PCMs and Fins Effects on the Thermal Performance of Shell–tube Thermal energy Storage units, Solar Energy, 122 (2015) 382–395.
44. Jmal, I., Baccar, M., Numerical study of PCM Solidification in a Finned Tube Thermal Storage Including Natural Convection, Applied Thermal Engineering, 84 (2015) 320-330.
45. Khan, Z., vd., Parametric Investigations to Enhance Thermal Performance of Parafin through a Novel Geometrical Configuration of Shell and Tube Latent Thermal Storage System, Energy Conversion and Management, 127 (2016) 355–365.
46. Darzi, A., A., R., vd., Melting and Solidification of PCM Enhanced by Radial Conductive Fins and Nanoparticles in Cylindrical Annulus, Energy Conversion and Management, 118 (2016) 253–263.

## ÖZGEÇMİŞ

Oğuz Kaan YAĞCI, 1990 yılında Samsun'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ordunun Ünye ilçesinde tamamladı. 2009 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğreniminin ilk dönemi olan 2014 Kasım ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı görevine devam eden Oğuz Kaan YAĞCI iyi derecede İngilizce bilmektedir. Evlidir.