

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAÇIK EKSENLİ YATAY SİLİNDİRİK BİR HALKA  
İÇERİSİNDE PARAFİNLE GİZLİ ISI DEPOLAMA**

**Makina Müh. Mustafa Yusuf YAZICI**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 25.12.2012  
Tezin Savunma Tarihi : 11.01.2013**

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

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında**  
**Mustafa Yusuf YAZICI Tarafından Hazırlanan**

**KAÇIK EKSENLİ YATAY SİLİNDİRİK BİR HALKA**  
**İÇERİSİNDE PARAFİNLE GİZLİ ISI DEPOLAMA**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 12 / 2012 gün ve 1487 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN**

**Üye : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK**

**Üye :Yrd. Doç. Dr. Mete AVCI**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Termal enerji depolama, enerjide sürdürülebilirlik, etkinlik ve verimlilik adına önemli bir seçenektir. İlgili depolama türüne ait çok farklı sistemler mevcuttur. Ülkemiz, bu sistemlerin teknolojisi ve geliştirilmesi aşamasında büyük oranda dışa bağımlıdır. Bu sebeple termal enerji depolama konusu üzerine yapılacak disiplinler arası çalışmalar bu alandaki bilgi birikimi ve teknoloji üretimine önemli katkıda bulunacaktır.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, faz değiştiren maddelerle ısı depolamada/geri kazanımda, depo geometrisinin şarj ve deşarj karakteristikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma, depo geometrisine getirdiği yenilikçi yaklaşım ile hem var olan literatüre hem de pratiğe önemli katkılar sağlama potansiyelindedir.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, birikim ve tecrübesinden tereddütsüz istifade etmemi sağlayan, çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Mete Avcı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirilmesine sağladıkları bilimsel katkılardan dolayı değerli hocalarım sayın Prof.Dr. Orhan Aydın'a ve sayın Yrd. Doç. Dr. Mithat Akgün'e teşekkür ederim. Ayrıca, deney düzeneğinin kurulum aşamasında ve deneyler süresince yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Cemalettin Aygün'e teşekkür ederim.

Öte yandan, hayatımın her safhasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve çalışmalarım sırasında benimle birlikte emek harcayan, desteğini hep yanımda hissettiğim eşim Semra K.Yazıcı'ya tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 1146 no'lu BAP 03 projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Mustafa Yusuf YAZICI  
Trabzon 2012

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Kaçık Eksenli Yatay Silindirik Bir Halka İçerisinde Parafınle Gizli Isı Depolama" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mete AVCI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, 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. 25/12/2012

Mustafa Yusuf YAZICI

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa no</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Enerji Depolama ve Yöntemleri.....	2
1.2.1. Termal Enerji Depolama (TED).....	4
1.2.1.1. Termokimyasal Depolama.....	7
1.2.1.2. Duyulur Isıl Enerji Depolama (DIED).....	9
1.2.1.3. Gizli Isıl Enerji Depolama (GIED).....	18
1.3. Gizli Isı Depolama Sistemlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Maddeler.....	23
1.3.1. FDM'lerin Sınıflandırılması.....	25
1.3.1.1. Organik Faz Değiştiren Maddeler.....	27
1.3.1.2. İnorganik Faz Değiştiren Maddeler.....	32
1.3.1.3. Polimerler.....	32
1.4. Gizli ısı depolama sistemlerinin performansı.....	32
1.5. Faz Değiştiren Maddelerin Kullanım Alanları.....	35
1.6. Literatür Araştırması.....	37
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	43
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
2.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Prensibi.....	45

2.2.	Test Bölgesi.....	51
2.2.1.	Deneylerin yapılışı.....	58
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	61
3.1.	Şarj (Erime) Sürecinin İncelenmesi.....	61
3.2.	Deşarj (Katılaşma) Sürecinin İncelenmesi.....	77
4.	SONUÇLAR.....	92
5.	ÖNERİLER.....	93
6.	KAYNAKLAR.....	94
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KAÇIK EKSENLİ YATAY SİLİNDİRİK BİR HALKA  
İÇERİSİNDE PARAFİNLE GİZLİ ISI DEPOLAMA

Mustafa Yusuf YAZICI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mete AVCI  
2012, 99 Sayfa

Dünyadaki konvansiyonel enerji kaynaklarının tüketimindeki artış ve bu kaynakların çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerjinin depolanması konularına olan ilgi artmıştır. Termal enerji depolama, mevcut enerjinin korunmasında ve enerji temini ile talebi arasındaki zaman faz farkının ortadan kaldırılmasında oldukça önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada, yatay olarak konumlandırılan halka aralığındaki FDM'nin erime (şarj) ve katılaşma (deşarj) davranışları deneysel olarak incelenmiştir. FDM olarak saf parafin (Merck/hexacosane) kullanılmıştır. Isı transfer akışkanı olarak su kullanılmıştır. Halka aralığı iç içe geçmiş, her biri dairesel forma sahip, bir dış gövde ve 4 farklı eksen konumuna sahip ( $e = 10, 20, 30$  mm) ısı transfer borusundan meydana gelmektedir. Her bir geometrik konfigürasyon için sabit hacimsel debide ve üç farklı akışkan giriş sıcaklığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler hem şarj hem dedeşarj durumu için yapılmıştır. Eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak erime süresinin kısaldığı belirlenirken katılaşma süresinin ise uzadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Termal enerji depolama, Faz değıştiren maddeler, Parafin, Erime, Katılaşma, Eksen kaçıklığı.

Master Thesis

SUMMARY

LATENT HEAT STORAGE USING PARAFFIN IN AN ECCENTRIC  
ANNULI OF HORIZONTAL TUBE-IN-SHELL UNIT

Mustafa Yusuf YAZICI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mete AVCI  
2012, 99 Pages

Interest on renewable energy sources and energy storage have increased recently because of dramatic increase in the consumption of conventional energy sources and their hazardous effects on environment. Thermal energy storage plays an important role in conservation of available energy and eliminating the phase lag between energy supply/availability and demand. An experimental study is conducted in order to investigate the melting (charging) and solidification (discharging) processes of a phase change material (PCM) in a tube in shell heat exchanger system. Paraffin is used as PCM while water is as heat transfer fluid (HTF). The PCM was stored in the horizontal annular space between an inner tube and outer shell. The inner tube has been settled in four different position; one is concentric ( $e=0$  mm) while the others are eccentric ( $e=10, 20, 30$  mm). Experiments are conducted both for charging and discharging processes. For each geometrical configuration, experiments are carried out of a constant value of mass flow rate and three different values of inlet temperature of HTF. It has been shown that eccentricity shortens the melting time for the charging process, while it makes the solidification time longer for the discharging process.

**Key Words:** Thermal energy storage, Phase change materials, Paraffin, Melting, Solidification, Eccentricity.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2. Termal enerji depolama yöntemleri .....	6
Şekil 3 Ortam ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi .....	11
Şekil 4. Ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sistemi .....	14
Şekil 5. İkili duyulur ısı depolama sistemleri .....	17
Şekil 6. Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi sabit sıcaklıkta faz değiştirme (a), sıcaklık aralığında faz değişime (b).....	19
Şekil 7. Isı depolama malzemelerinin sınıflandırılması .....	26
Şekil 8. Binalarda yapı malzemesi (a), bebek tulumu (b), sporcu yeleği (c), işlemcinin soğutulması (d), dizüstü bilgisayar soğutucu (e), gıda depolama (f), organ taşıma çantası (g), kan ünitesi (h).....	36
Şekil 9. Deney düzeneğinin genel görünüşü: izolasyonu yapılmış (a), yapılmamış (b).....	47
Şekil 10. Deney düzeneğinin bölümleri: şartlandırma bölgesi (a), by-pass bölgesi (b).....	48
Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	50
Şekil 12. Test bölgesi bileşenleri.....	51
Şekil 13. FDM deposu; eş eksen (a), kaçık eksen (b).....	52
Şekil 14. Termoelemanların test bölgesindeki yerleşimi, eş merkezli durum.....	54
Şekil 15. Termo eleman yerleşimi (eş merkez).....	54
Şekil 16. Sıcak pirizlerine ait montaj resmi.....	55
Şekil 17. Termoeleman bağlantı yapısı .....	55
Şekil 18. Termoelemanların veri kaydediciye bağlantısı .....	56
Şekil 19. Çalışmada kullanılan parafin.....	56
Şekil 20. Katı faz doluluk oranı.....	57
Şekil 21. Termoeleman yerleşimi, eş merkezli durum .....	59
Şekil 22. Gizli ve duyulur ısı depolama zamanı.....	60
Şekil 23. $e=0$ mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj).....	65
Şekil 24. $e=0$ mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj) .....	66

Şekil 25. Farklı yerel istasyonların çevresel sıcaklık değişimleri (şarj): ikinci yerel istasyona ait sıcaklık değerleri (a), birinci ve ikinci yerel istasyona ait t anı için sıcaklık değerleri (b).....	67
Şekil 26. e=10 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj).....	68
Şekil 27. e=10 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj).....	69
Şekil 28. e=20 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj).....	70
Şekil 29. e=20 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj).....	71
Şekil 30. e=30 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj).....	72
Şekil 31. e=30 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj).....	73
Şekil 32. Kritik yerel istasyon sıcaklıklarının (farklı akışkan giriş sıcaklıklarında) eksen konumlarına bağlı sıcaklık değişimi (şarj): $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$ (a), $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ (b), $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ (c).....	74
Şekil 33. Eksen kaçıklığının (farklı akışkan giriş sıcaklığında) depolama süresine etkisi: $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$ (a), $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ (b), $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ (c) (şarj).....	75
Şekil 34. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarında eksen konumuna bağlı olarak erime sürelerinin karşılaştırması (şarj).....	76
Şekil 35. e=0 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj).....	80
Şekil 36. e=0 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj).....	81
Şekil 37. Sıcaklık alanları (deşarj): ikinci yerel istasyon (a), birinci ve ikinci yerel istasyonların t anı için karşılaştırması(b).....	82
Şekil 38. e=10 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj).....	83
Şekil 39. e=10 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj).....	84
Şekil 40. e=20 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj).....	85
Şekil 41. e=20 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj).....	86
Şekil 42. e=30 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj).....	87
Şekil 43. e=30 mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj).....	88
Şekil 44. Kritik yerel istasyon sıcaklıklarının (farklı akışkan giriş sıcaklıklarında) eksen konumlarına bağlı sıcaklık değişimi (deşarj): $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$ (a), $T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$ (b), $T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$ (c).....	89
Şekil 45. Eksen kaçıklığının farklı akışkan giriş sıcaklığında depolama süresine etkisi (deşarj) : $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$ (a), $T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$ (b), $T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$ (c).....	90
Şekil 46. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarında eksen konumuna bağlı olarak erime sürelerinin karşılaştırması (deşarj).....	91

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Sıvı ortamda duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri.....	13
Tablo 2. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler.....	16
Tablo 3. Duyulur ısı depolama ortamlarının karşılaştırılması.....	17
Tablo 4. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerinin enerji depolama kapasitesi bakımından karşılaştırılması .....	20
Tablo 5. Isı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırması .....	27
Tablo 6. Organik FDM'lerin listesi .....	28
Tablo 7. Bazı parafinler ve özellikleri .....	30
Tablo 8. Parafinlerin avantaj ve dezavantajları .....	31
Tablo 9. Gizli ısı depolama sistemlerinin performans ve tasarım faktörleri .....	34
Tablo 10. FDM kullanım alanları.....	37
Tablo 11. Yapılan çalışmalar.....	41
Tablo 12. Kullanılan cihazların özellikleri.....	51
Tablo 13. Isı deposuna ait geometrik parametreler .....	53
Tablo 14. Termoelemanların birbirlerine göre konumu .....	53
Tablo 15. Kullanılan parafinin termofiziksel özellikleri .....	57
Tablo 16. Eksen kaçıklığına ve akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak katılma sürelerindeki artış oranları .....	79

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Son 20 yıl içinde sürdürülebilir kalkınma kavramı önem kazanmıştır. Sürdürülebilir kalkınma, çevre ile uyumlu biçimde kaynakların yüksek verimlilikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Enerji ve çevrenin insan yaşamındaki vazgeçilmezliği karşısında sürdürülebilir enerji, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir unsuru olarak ortaya çıkmıştır (Demircioğlu, 2003).

Sürdürülebilir enerji kavramı, tüm birincil enerji kaynaklarından yapılan enerji üretiminin yüksek verimle ve temiz teknolojilerle gerçekleştirilmesini, fosil yakıtların çevre dostu yeni teknolojilerle değerlendirilmesini, tükenir fosil kaynaklar yerine olabildiğince tükenmez (yenilenebilir) enerji kaynaklarının yerleştirilmesini, bir çevrimde atık biçiminde ortaya çıkan enerjinin bir başka çevrimde girdi olarak kullanılmasını kapsayan ve bunu ekonomik büyüme ile bütünleştiren bir kavramdır (Demircioğlu, 2003).

İnsanların daha rahat yaşama istekleri, artan nüfus, hızlı kentleşme, sanayileşme, endüstriyel ve teknolojik alandaki ilerlemeler, mevcut geleneksel enerji kaynaklarının hızla tükenmesine neden olmaktadır. Günümüzde dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir bölümü (%78) kömür, doğal gaz ve petrol gibi geleneksel enerji (fosil kökenli yakıtlar) kaynakları kullanılarak karşılanmaktadır (International Energy Agency, 2002). Fosil kökenli yakıtların rezervleri dünya üzerinde sınırlı olup, artan enerji ihtiyacına bağlı olarak tüketim hızları artmaktadır. Bu durum gelecekteki üretim/tüketim dengesinin sağlanmasını tehlikeye düşürmektedir. Bütün bunların yanı sıra fosil yakıtlar, çok uzun vadede yenilenmeleri ve zararlı gaz emisyonlarına sebep olmaları gibi olumsuzluklara sahiptir.

Yetmişli yıllarda yaşanan iki büyük petrol krizi, gün geçtikçe artan çevresel sorunlar ve fosil yakıtların hızla tükenmesi, araştırmacıları enerjinin temiz/yenilenebilir enerji kaynaklarından temini yoluna ve enerjinin depolanması konularında çalışmaya yönlendirmiş ve teşvik etmiştir (Ünalın, 2005).

Yenilenebilir/temiz enerji kaynakları dışı bağımlılığı olmayan, maliyeti düşük, çevre kirliliğine sebep olmayan ve sürekli mevcut olan kaynaklardır. Bu kaynaklar; jeotermal enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, gelgit enerjisi, dalgalar enerjisi, biyokütle enerjisi şeklindedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilen ve yukarıda bahsedilen bu alternatif kaynaklardan yararlanılması, henüz hedeflenen düzeye maalesef ulaşamamıştır. Ancak, jeotermal, güneş, rüzgâr ve modern biyokütle enerjisi teknolojileri üzerine çalışmalar her geçen gün artmaktadır.

Mevcut enerjinin korunması, depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulduğu zamanlarda kullanıma sunulması önemlidir. Esasında, enerji tasarrufunun ve verimliliğinin artırılması, yeni enerji kaynaklarının devreye sokulmasından daha rasyonel ve ekonomiktir. Bu sebeple enerji depolamayla ilgili yapılan araştırmaların başlıca hedefi; enerjinin en verimli şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun enerji dönüşümünün sağlanmasıdır. Mesela, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili kaynaklar olması nedeniyle, elde edilen enerjinin bu kaynakların olmadığı zamanlarda kullanılabilmesi için, depolanıp saklanabilmesi gereklidir ve bu da ancak enerjinin, başka enerji formlarına dönüştürülmesi ile mümkündür (TÜBİTAK, 2003).

## **1.2. Enerji Depolama ve Yöntemleri**

Mevcut enerjiyi daha sonra kullanılmak üzere farklı bir enerji türüne dönüştürme ve ihtiyaç olduğunda da depolanan enerjinin kullanımını içeren sürece enerji depolama (ED) denir. Enerji depolama, yalnız belirli periyotlarda enerji verebilen (güneş gibi) yenilenebilir enerji kaynaklarından enerjinin depolanarak enerji temini zamanı ile enerji talebi arasındaki faz farkını gidermeyi amaçlamaktadır. Güneş ve rüzgar enerjileri sürekli olmalarına karşın kesintili enerji kaynaklarıdır ve bu kaynakların olmadığı zamanlarda uygun dönüşüm ve depolama sistemlerinin olması gerekmektedir. (TÜBİTAK, 2003).

Enerji depolama, bilim adamlarının günümüzde en yoğun uğraştıkları konuların başında gelmeye başlamıştır. Yapılan çalışmaların ana hedefi, enerjinin en verimli şekilde depolanması ve etkin bir biçimde kullanılabilmesi için verimli, ekonomik ve güvenli bir enerji depolama metodunun geliştirilmesidir.

Enerji depolama teknolojilerinde son yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Özellikle, birkaç saatlik depolama sürecini kapsayan ve sürekli olmayan enerjinin depolanmasındaki gelişmeler, enerji depolamayı kritik bir öneme sahip hale getirmiştir. Enerji depolama sistemleri (EDS), toplumsal ihtiyaçları daha verimli bir şekilde karşılamak, sanayide atık enerjiden faydalanmak, bina ısıtma -soğutmada çevre açısından

tehlikesiz enerji kullanımını sağlamak, tarım sektörünün sabit ısı talebini karşılamak ve uzay mekiği gücü gibi çeşitli faydalı uygulamalara önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Dinçer ve Rosen, 2002).

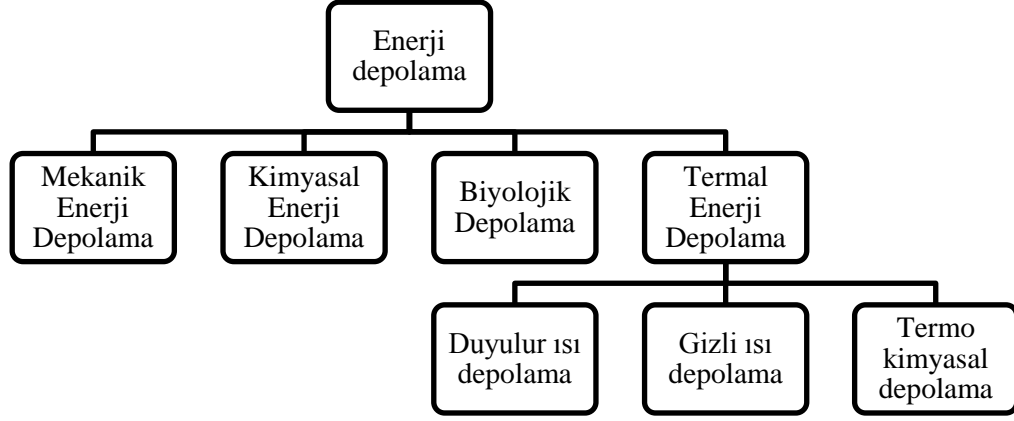
Enerji depolama, enerji sistemlerinin performansını düzenler ve verimini artırır. Özellikle, enerjinin depolanması ile yardımcı enerji kaynağına duyulan ihtiyaç azaltılır. Böylece, değerli olan fosil yakıt rezervleri (kömür, petrol ve doğal gaz gibi) muhafaza edilmiş olur. EDS'nin kullanımının sağlayacağı faydalar aşağıda belirtilmiştir (Dinçer ve Rosen, 2002);

- Enerjinin kullanıldığı alanlarda oluşan atık enerjinin depolanarak yeniden değerlendirilmesini sağlar.
- Enerji temin zamanı ile talebi arasında doğabilecek faz farkını gidermeye yardımcı olur.
- Enerji sistemlerinin verimini artırır ve böylelikle enerji tasarrufuna katkıda bulunur.
- Yardımcı enerji kaynağına duyulan ihtiyaç azaltılır. Böylece, değerli olan fosil yakıt rezervleri (kömür, petrol ve doğal gaz gibi) muhafaza edilmiş olur.
- Enerji üretimi için kullanılan yakıtların çevreye verdiği zararın azaltılmasında önemli rol oynar.
- Elektrikle ısıtılan evlerde gece boyunca tüketilen enerjinin fazlasının depo edilerek gündüz ısıtma amaçlı kullanımı bireysel ekonomiye de katkı sağlar.

Tüm bu katkıların yanında, ülkemizin fosil yakıtlar bakımından dışa bağımlılığı da düşünüldüğünde, enerji depolamayla sağlanacak enerji tasarrufunun ülke ekonomisine de ciddi katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. Enerji depolama konusundaki çalışmalar yalnızca bizim gibi enerji ihtiyacında dışa bağımlı ülkelerde değil, çok sayıda gelişmiş ülkelerde de rağbet görmektedir. Bir miktar enerjinin depolama sırasında kaybolmasına rağmen, enerji depolama işlemi enerji kaynaklarının verimli kullanılmasında dünya genelinde gittikçe artan öneme sahiptir.

Hedef, enerjinin en verimli şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun dönüşümün geliştirilmesi ve uygulanmasıdır. Depolanan enerjinin etkin bir şekilde kullanılması için verimli ve ekonomik bir metodun seçilmesi oldukça önemlidir (Kılış ve Kakaç, 1989; Yang, 1989; Dinçer, 2002).

Enerji depolama sistemleri; depolamanın nasıl yapılacağı, depolama kapasitesi, depolanacak enerji türü ve depolama süresine göre sınıflandırılabilir. Depolama tipine ait örnek bir sınıflandırma Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması (Dinçer ve Rosen, 2002).

Bu çalışma kapsamında tez konusuyla doğrudan ilişkili olan Termal Enerji Depolama yöntemlerine ilişkin detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilecektir.

### 1.2.1. Termal Enerji Depolama(TED)

Termal enerji bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Bir başka ifadeyle maddenin iç enerjisidir ve bu enerjinin aktarımı sıcaklık farkından kaynaklı ısı geçişi yoluyla olur. Termal depolama terimi, daha geniş bir depolama çeşidini kapsar. Yani, hem ısı hem de soğuk depolamanın tüm yöntemlerini kapsarken; ısı depolama, sadece ısının depolanmasını kapsamaktadır Bunun yanında, enerji depolama yöntemleri arasında en verimli ve ekonomik olanı Isıl Enerji Depolama (IED) yöntemidir (Dinçer ve Rosen, 2002).

Termal enerji depolama (TED), yüksek veya düşük ısıların daha sonra kullanım için depolanmasıdır. Termal enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara gereksinim duymadan doğrudan soğutma-ısıtma yapılabilir. Böylece, elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Ayrıca, enerji santrallerine duyulan gereksinimi ve fosil yakıt kullanımını azaltarak temiz bir çevre için

çözümler sunmaktadır. Kısa süre içerisinde yapılan çalışmalar neticesinde, Termal Enerji Depolama (TED) teknolojilerinin çevre ile dost ve de ekonomik olduğunu gösteren uygulamalar hızla artmıştır (Andersson,1994 ve1997; Andersson vd., 2000; Paksoy ve Evliya, 2000). Sadece Türkiye’de TED sistemlerinin kullanılmasıyla ülke genelinde fosil yakıtlardan sağlanacak %10’luk tasarruf ile emisyonlarda beklenen azalma yılda en az 5,6 milyon ton CO<sub>2</sub>, 18900 ton SO<sub>2</sub> ve 21600 ton NO<sub>x</sub> olacağı tahmin edilmektedir (Paksoy ve Evliya, 2000).

Termal enerji depolaması kullanım süresine göre ikiye ayrılır. Bunlar kısa süreli depolama (gece-gündüz) ve mevsimlik depolama (yaz-kış)’dır. Kullanım sıcaklığına göre de sıcak depolama, soğuk depolama ve her iki amaçlı olan sıcak ve soğuk depolama olarak belirlenmiştir. Uzun dönem TED ile temel olarak hedeflenen, yazın sıcaklığını koruyup kışın kullanmak veya kışın soğukunu depolayıp yazın kullanmaktır. Kısa dönemli güneş enerjisi TED sistemleri ise birkaç güne kadar ısı depolamak için düzenlenmiştir. Güneş enerjisi yoğunluğu ve gereksinim duyulan enerji miktarı arasındaki farkın az olması durumunda kısa süreli TED kullanılır. Mevsimsel bir depolama sisteminin başlıca karakteristiği, uzun süreli ihtiyacı karşılamak için gerekli olan geniş kapasiteli olmasıdır. Burada önemli olan, güneş enerjisinin fosil yakıtların aksine her zaman mevcut olmadığına dikkat etmektir. Bu yüzden termal enerjinin elde edilmesi ve kullanımı arasındaki zaman farkı güneş enerjisinin efektif olarak var olduğu saatlerde optimum depolamanın yapılması ile kapatılabilir. Başka bir ifade ile TED, enerjinin elverişli olma zamanı ile talep arasındaki dengesizlikleri önlemek açısından oldukça önemlidir (Akgün, 2006).

TED sistemlerinin avantajları aşağıda verilmiştir (Mazman,2000):

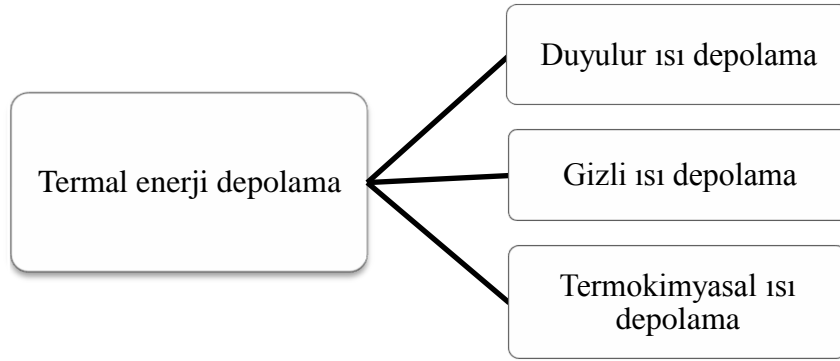
- Enerji verimliliğini arttırarak elektrik enerjisi tüketimini azaltır ve şebekeye destek olur.
- Kojenerasyon santrallerinin daha etkin çalışmasını sağlar.
- Elektriğin daha ucuz olduğu zamanlarda depolama yapılabilir.
- Özellikle elektronik cihazların güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlar.
- Mevcut birimlere eklenebilir: Çalışan sistemlerde atık ısısının kullanılmasına olanak sağlar
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasını sağlar.

Kısaca, TED sistemlerinin temelinde depolama sistemine enerji sağlanması, enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılması amaçlanmaktadır. Bu süreç; kısaca, yükleme (şarj), depolama ve geri kazanma(deşarj)



olarak özetlenebilir (Dinçer ve Rosen, 2002). Enerjinin termal olarak depolanması farklı yöntemler, farklı depolama şekilleri ve farklı malzemelerle gerçekleştirilebilir. Bunların belirlenmesinde, depolama kapasitesi ve enerjinin şarj/deşarj süreleri önemli parametrelerdir.

Termal enerji depolama, depolanan enerjinin türüne, depolayıcı malzeme cinsine ve enerji depolama süresine bakılmaksızın, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak üç grupta (Şekil 2) toplanır (Dinçer ve Rosen, 2002).



Şekil 2. Termal enerji depolama yöntemleri (Dinçer ve Rosen, 2002).

TED tekniklerinde, malzemenin özgül ısısına bağlı olarak sıcaklığının düşmesi veya yükselmesi şeklindeki duyulur ısı, faz değiştiren maddelerin (FDM) ergime ısısı veya kimyasal tepkimelerin ısısı şeklinde depolama yapılabilir. Bu yöntemlerle uzun süreli (yaz-kış) veya kısa süreli (gece-gündüz) depolama yapılabilir.

Kısa süreli amaçlarla daha çok, istenilen sıcaklıkta faz değiştiren (katı-sıvı, katı-katı) çeşitli organik ve inorganik maddelerden yararlanılmaktadır. En çok kullanılan maddeler arasında: su-buz, parafinler ve çeşitli tuz hidratları sayılabilir. Uzun süreli depolama teknolojilerinde daha çok duyulur ısı tekniklerinden yararlanır. Bunlar; akiferde termal enerji depolama, kanallarda termal enerji depolama, yer altı mağaraları, çukur ve tanklarda termal enerji depolama olarak gruplandırılmaktadır. Termokimyasal tepkimelerden hem kısa süreli hem de uzun süreli olarak, özellikle yüksek sıcaklıklarda yararlanılabilmektedir. Bu sistemlerde kullanılan maddeler çok çeşitlidir (Yılmaz, 2005).

Depolamanın yapılabilmesi için öncelikle bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu ısı kaynağı bir santralin atık ısısı olabileceği gibi güneş enerjisi, jeotermal enerji vb. ısı

kaynaklı sistemler de olabilir. Mesela, güneş enerjisi zamana bağlı olarak değişim gösteren ve kesintili yapıya sahip bir enerji türüdür. Bu özelliği nedeni ile güneş enerjisine bağlı olarak çalışan sistemlerin yük faktörü kesintisiz yapıya sahip enerji türlerine göre daha düşüktür. Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisinin depolanması ile yük faktörü artmakta, bunun sonucunda da sistemler daha ekonomik hale gelmektedir. Bir depolama işleminin gerçekleştirilmesinde birçok etkin parametre vardır. Depolama işlemi için seçilecek ortam, yapılacak işlem türü ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, su ısıtma sisteminde duyulur ısı yolu ile depolama, hava ısıtma sisteminde ise çakıl taşı yatakları daha etkindir. Bir binanın pasif olarak ısıtılması işleminde ısı enerjisinin bina duvarlarında depolanması gerekir. Bir depolama sisteminin seçiminde önemli olan parametreler aşağıda belirtilmiştir (Özonur, 2004).

- Birim hacimdeki depolama kapasitesi
- Çalışma sıcaklığı
- Depolama ünitesi içinde ısı tabakalaşma
- Isının depolama ya da çekilmesi sırasındaki güç tüketimi
- Depolama tankının malzeme seçimi
- Depolama tankında ısı kayıplarının önlenmesi
- Maliyet

Buna göre, depolama ortamı seçiminde birim hacimde depolama kapasitesi yüksek olan malzemelerin seçimi ile aynı hacimde daha çok ısı depolanabilir. Depolama tankına giren ve çıkan akışkan sıcaklığı, depolama tankı malzemesinin yapısını bozmayacak sıcaklık aralığında olmalıdır. Isının depolama sistemine verilmesi sırasındaki güç tüketimi, minimum düzeyde olmalıdır. Depolama tankının dış malzemesi, dış ortam şartlarına uygun olarak seçilmeli ve depolama hacmindeki malzemedeki etkilenmemelidir. Depolama tankında olabilecek ısı kayıpları sistemin performansını düşüreceği için uygun yalıtım malzemesi ile ısı kayıplarının azaltılması gerekmektedir. Sistem için yapılacak harcamalar, yatırımı en kısa sürede geri ödeyebilmelidir.

#### **1.2.1.1. Termokimyasal Depolama**

Isı enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek uzun süre depolanabilir. Termokimyasal ısı depolamanın ilkesi; ekzotermik olarak tepkimeye girebilen iki veya daha fazla kimyasal bileşikte tersinir tepkimeler yardımıyla ısı enerjisinin kimyasal bağlarda depolanmasına

dayanır. Depolama sisteminin ömrü prensip olarak sınırsızdır. Kimyasal bağların tersinir olarak ayrışma ve birleşmesi sırasında, ısı değeri yüksek olan kimyasal tepkimeler gerçekleştiğinden, ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir.

Termokimyasal yöntemle ısı depolamada, ortam koşullarında fazla miktarda ısı depolanabilir. Bazı kimyasal maddelerin maliyeti çok düşük olduğundan, bu yöntemle ısı depolama maliyet açısından daha ekonomiktir (Öztürk, 2008).

Termokimyasal ısı depolamada; tepkimeye giren bir, “TF” kimyasal maddesi yüksek sıcaklıktaki ortamdan ısı (Q) alarak,  $TF + Q \leftrightarrow T + F$  şeklindeki tersinir bir tepkime ile T ve F bileşenlerine ayrılır. Termokimyasal yöntemle ısı depolayan sistemler, gizli ısı depolama sistemlerinden daha karmaşıktır. Sistemdeki bileşenlerin kendi aralarındaki olası etkileşimleri önemlidir. Yöntemin en önemli özelliği seçilen tepkimenin tersinir olmasıdır.

Isı depolama amacıyla yaralanılacak tepkimenin iki önemli özelliği vardır: tepkime tersinir olmalıdır ve yan tepkimeler oluşmamalıdır

Termokimyasal yöntemle ısı depolama sistemlerinin tasarımında önemli olan özellikler; tepkimenin gerçekleşme hızı ve kontrolü ve tepkime için katalizör gereksinimi olup olmadığıdır.

Termokimyasal yöntemle ısı depolama sistemlerinin toplam maliyetindeki etkenler; tepkime sonucunda ayrışan ürünlerin depolanması ve uygulanacak mevcut teknolojidir.

Termokimyasal yöntemle ısı depolama üç grupta incelenir:

1. Tersinir kimyasal tepkimelerle ısı depolaması: kimyasal bağların tersinir olarak ayrışması ve tekrar birleşmesi sırasında, enerji değeri yüksek olan işlemler gerçekleşir. Bu nedenle kimyasal tepkimelerle ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir. Bu yöntemle ısı depolamada; endotermik olarak ısı alan bir tepkime kullanılarak depolanan ısı, ekzotermik olarak geri kazanılır. Endotermik/ekzotermik tepkimeler kapalı bir çevrimde tekrarlanır.

2. Kimyasal ısı pompasıyla ısı depolama: kimyasal ısı pompası, tersinir tepkimeler yardımıyla aralarında gaz bileşenin transfer edildiği iki alt sistemden oluşur. Kimyasal ısı pompası sistemlerinde, buhar yoğunlaşması ile açığa çıkan yoğunlaşma ısısı geri kazanılır.

3. Termokimyasal ısı borusuyla ısı depolama: termokimyasal ısı borularında kullanılan tepkimelerde, kolay bir şekilde bulunan gaz durumdaki reaktifler bulunur. Is enerjisinin, ısı borusuyla uzun mesafelere iletilmesi için tepkime ürünlerinden yararlanılır (Öztürk, 2008).

### 1.2.1.2. Duyulur Isıl Enerji Depolama (DIED)

Bir maddenin sıcaklığı azaldıkça açığa çıkan enerjiye veya bir maddenin sıcaklığı arttıkça maddenin aldığı enerjiye duyulur ısı denir. Depolama malzemesinin sıcaklığının depolanan enerjinin miktarı ile değişimi de duyulur ısı depolama olarak adlandırılmaktadır. Başka bir ifade ile enerjinin maddenin ısı kapasitesinden yararlanılarak depolanmasına duyulur ısı depolama denilmektedir. Isı depolama maddesinin sıcaklığı artırılarak enerji duyulur şekilde depolanır. Duyulur IED maddeleri, depolama süresince faz değişimine uğramayacakları belirli bir sıcaklık aralığında çalışırlar. Duyulur ısı depolama süresince ortamının sadece sıcaklığı değişir. Depolanan ısı enerji miktarı; ortamın özgül ısısına  $C_p$ , sıcaklık değişimine  $\Delta T$  ve depolama maddesinin miktarına ( $m$ ) bağlıdır.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Burada;  $V$  ( $m^3$ ) maddenin hacmini,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ), maddenin yoğunluğunu ve  $C_p$  ( $kJ/kg$ ) de sabit basınçtaki özgül ısıyı göstermektedir. Duyulur ısı depolama yöntemiyle depolanan enerji miktarı, depo giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkla, depolama ortamının büyüklüğüyle ve ortamın ısı kapasitesiyle orantılıdır (Dinçer ve Dost, 1996). Yukarıdaki bağıntıdan görüldüğü gibi,  $\Delta T$  sıcaklık farkında ve belli bir hacimde daha fazla ısı enerjisi depolamak için maddenin hacimsel özgül ısısı ( $\rho \cdot C_p$ ) büyük olmalıdır. Ancak, duyulur şekilde ısı depolanmasında faydalanılan maddenin hacimsel özgül ısısının büyük olmasının yanında, yanma ve alevlenme özelliğinin olmaması, maddenin uzun süre (10-15 yıl) özelliklerini muhafaza etmesi, toksik ve korozyon tesirinin bulunmaması istenir. Maddenin kolay temin edilebilir ve ucuz olması da istenen diğer özellikleridir (Akçay, 2006).

Duyulur ısı, katı veya sıvı ortamlarda depolanabilir. Duyulur ısı depolamada enerji; su, su-etilen glikol (%50-%50), ötektik karışımlar ve bazı alkoller ile toprak, kum, seramik tuğlalar, kaya yatakları, uygun yağ, hava gibi depolama ortamlarının ısının değişmesiyle depolanır (Paksoy, 1992). Her bir sistemin avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin su, kaya ve toprağın belirli sıcaklıklarda depoladığı enerjinin iki katını depolar. Suyun yüksek ısıtma kapasitesi ( $4.2 kJ / kg \text{ } ^\circ C$ ) sebebiyle binaların ısıtılması ve soğutulması için gerekli TED sistemlerini su tankları oluşturur. Pratikte temin edilebilme kolaylığı ve ucuzluğu sebebiyle daha çok su veya çakıl taşı tercih edilmektedir. (Ataer, 2006)

Duyulur ısı depolama sistemlerinin en cazip özelliklerinden biri, ısı yükleme ve boşaltma işlemlerinin tersinir olmasıdır. Yani, sistemin ekonomik ömrü boyunca bu maddelerin ısıyı depolama ve boşaltma özellikleri devam eder. Buna karşın duyulur ısı depolamada ortaya çıkabilecek dezavantajlar şunlardır (Yılmaz, 2008) ;

- Isı depolama sırasında depolama sıcaklığı sürekli arttığından ısı kayıpları fazladır.
- Sistemde yalıtıma ihtiyaç vardır: bu da, maliyeti artırmaktadır.
- Duyulur ısı depolamada sistemden ısı geri kazanılırken, depolama sıcaklığı sürekli düştüğünden,ısı akış dağılımı gizli ısı depolamaya göre daha kararsız olacaktır.
- Gizli ısı depolama yöntemi ile karşılaştırıldığında ısı depolama yoğunlukları çok daha düşüktür.
- Depolama yoğunluklarının çok düşük olması ise depo hacimlerini artırmaktadır.

Duyulur ısı depolama, ısı depolama ortamına bağlı olarak, üç grupta sınıflandırılır: Sıvı ortamda depolama (su, akışkan yağlar, ergimiş tuzlar v.b.),katı ortamda depolama (kayalar, metaller ve diğerleri),ikili ortamda ısı depolama (Akgün, 2006).

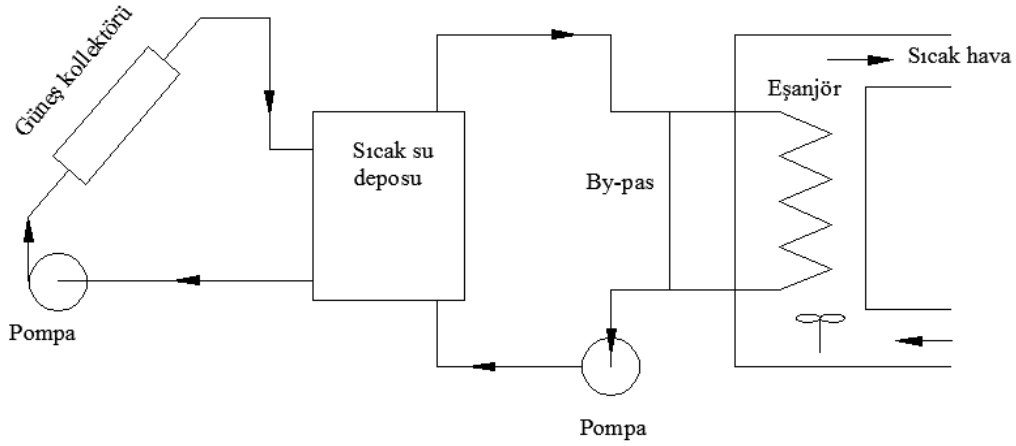
Yukarıda belirtilenlerin dışında bir diğer duyulur ısı depolama şekli gaz ortamda depolamadır. Ancak, gazın yüksek basınç artışı nedeniyle çok fazla tercih edilmez. Belirli bir hacimde tutulan gaz ısı alırsa, sıcaklık ve basıncı artar.

a. Sıvı ortamda duyulur ısı depolama: Sıvı ortamda duyulur ısı depolamak için kullanılan farklı maddeler olup birbirleriyle depolama kapasiteleri, ucuzluğu ve kolay bulunabilirliği gibi faktörlerle ilişkilendirilmektedir. Su ve tuzlu su, orta ve düşük sıcaklıkta duyulur ısı depolama için en yaygın kullanılan malzemedir. 100°C'nin üzerindeki ısı depolama için düşük yoğunluğa ve yüksek özgül ısıya sahip organik kimyasallar kullanılır.Tablo 1'de sıvı ortamda duyulur ısı depolamada kullanılan bazı malzemeler verilmiştir.

Su, düşük sıcaklıkta en iyi depolama ortamlarından biridir. Diğer malzemelerden daha yüksek özgül ısıya sahiptir ve ucuz olduğu kadar da boldur. Su ile depolama, 25-90°C gibi geniş bir sıcaklık aralığında yapılır. Bununla birlikte yüksek sıcaklık uygulamalarında (100°C ve üstü) suyun buhar basıncı dolayısıyla maliyeti yüksek yalıtım ve yüksek basınca dayanıklı kaplar gerektirir. Enerji kaynağı olarak güneşi kullanan sulu duyulur ısı depolama sisteminin şeması Şekil 3'de verilmiştir. Genel olarak bir iki gün gibi kısa periyot için su kullanılır.

100-300°C arasındaki sıcaklık değerlerinde ısı transfer yağları kullanılır. Yağların kullanımında ortaya çıkabilecek problem, yağlarda zamanla meydana gelebilecek

bozulmadır. Bu bozulma yağların çalışma sıcaklıklarının üzerine çıkılması durumunda ciddi problemlere sebebiyet verebilir. Ayrıca parlama noktalarının üzerine çıkılması durumunda da tutuşma riski vardır. Bu yüzden bu yağların sistemde bir koruyucu soy (inert) gaz ile kullanılmaları tavsiye edilmektedir. Kullanılmalarını kısıtlayan bir diğer faktör ise maliyetlerinin yüksekliğidir. Bu sebeplerden ötürü sadece küçük depolama sistemlerinde kullanılmalıdırlar. 300°C ve üzeri gibi yüksek sıcaklıklarda ise bazı ergimiş inorganik tuzların kullanımı mümkündür (Ataer, 2006).



Şekil 3 Ortam ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi (Kılış ve Kakaç,1989).

Depolama ortamı olarak su kullanılmasının sağladığı avantajları maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz (Hasnain, 1998b);

- Yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir.
- Ucuzdur ve kolay temin edilir.
- Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir (25-90°C).
- Akışkan ve depolama ortamı bir olduğu için depolama sisteminde eşanjöre ihtiyaç duyulmaz.
- Fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri çok iyi bilinmektedir.
- Zehirleyici ve yanıcı değildir.
- Korozyon etkisini azaltan teknolojiler geliştirilmiştir.

Dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir (Akgün, 2006):

- Normal kaynama noktası sıcaklığını yukarı çekmek için yüksek buhar basıncına dayanacak pahalı basınç kaplarına ihtiyaç duyması
- Sızdırma problemi
- Korozyona yatkın oluşu
- Katılaşma sırasındaki hacim genişlemesi
- Termal tabakalaşma

Tankın en alt ve en üstündeki sıcaklık farkı, kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile depolama tankı içerisinde termal tabakalaşmaya sebep olabilir. Termal tabakalaşma durumu her ne kadar dezavantaj olarak verilse de depolama sırasında termal tabakalaşma gerçekleşmesinin iki avantajı vardır: Enerji depolama verimliliği artar ve eğer karışmış depolama sıcaklığından kollektör girişindeki akışkan sıcaklığı daha düşük ise depolanan enerjinin miktarı artabilir (Akgün, 2006).

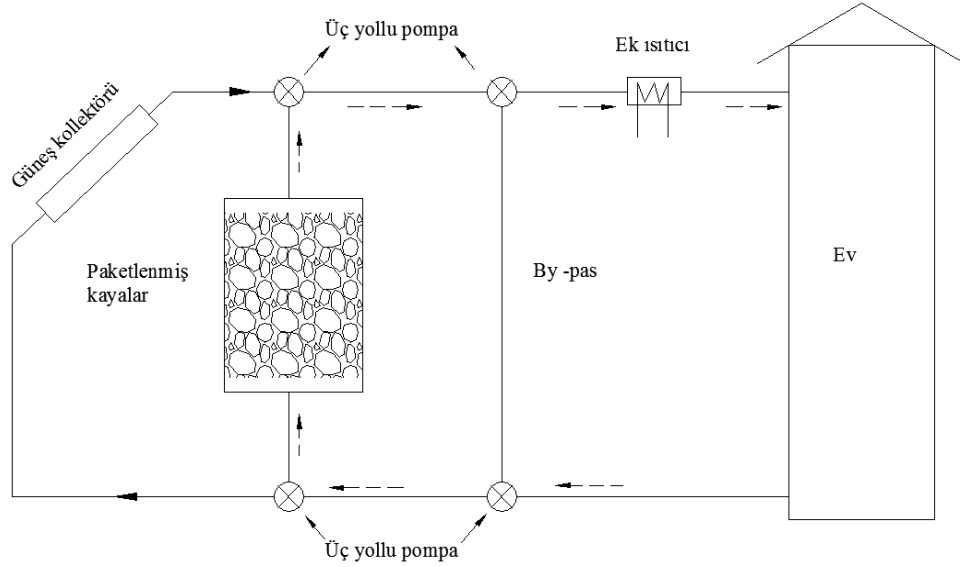
Su depolama tankları çelik, alüminyum, betonarme ve fiberglas gibi çok farklı malzemelerden yapılabilir. Tanklar farklı kalınlıklardaki (10-20 cm) cam yünü, mineral yünü ve poliüretan gibi malzemelerle izole edilir. Burada yalıtım önemli bir maliyet oluşturmaktadır. Bu amaçla tankların yeraltında (toprak altında) depolanması durumunda toprak altında yeterli yalıtımın sağlanabileceği fikri düşünülmüştür. Ancak, büyük depolama tanklarında ısınma ve kuruma gibi problemlerden dolayı kararlı hale gelmesi ve ihtiyaç duyulan enerjinin elde edilmesi bir yıl gibi zaman dilimini alabilir. Tank boyutları birkaç yüz litreden birkaç bin metreküpe kadar değişebilir. Maliyeti düşürmenin bir diğer yolu da geniş ölçekli depolama uygulamaları için mevcut yeraltı doğal su kaynaklarının kullanımınıdır. Bu yöntemde açılan kuyular vasıtasıyla yeraltına sıcak su gönderilerek var olan soğuk suyun yüzeye çıkması sağlanmaktadır. Yüksek depolama hacimlerine sahip olmaları ve düşük maliyetinden dolayı yeraltı su depolama daha caziptir (Ataer, 2006).

Tablo 1.Sıvı ortamda duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri (Kaygusuz, 1992).

Ortam	Akış Tipi	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isı kapasitesi (J/kg.K)	Isıl iletkenliği (W/m.K)
Su	-	0-100	1000	4190	0,63
Su-etilen	-	-	-	-	-
Glikol(50/50)	-	-	1050	3479	-
Terminol 55	Yağ	(-18)-(315)	-	2400	-
Terminol 66	Yağ	(-9)-(434)	750	2100	0,106
Etilen Glikol	-	-	1116	2382	0,249
Motor yağı	Yağ	< 160	888	1880	-
Lityum	Sıvı tuz	180-1300	510	4190	38,1
Sodyum	Sıvı tuz	100-760	960	1300	67,5
Etanol	Organik sıvı	< 78	790	2400	-
Propanol	Organik sıvı	< 97	800	2500	-
Butanol	Organik sıvı	< 118	809	2400	-
Izobutanol	Organik sıvı	< 100	808	3000	-
Izopentanol	Organik sıvı	< 148	831	2200	-
Oktan	Organik sıvı	< 126	704	2400	-

b. Katı ortamda duyulur ısı depolama: Isı, izolasyonu sağlanmış tank içerisindeki kayalarda ve sıkıştırılmış çakıl taşlarında da depolanabilir. Bu tip depolama yöntemi genellikle 100°C'ye kadar ki sıcaklıklarda güneş enerjili hava ısıtıcıları ile bütünleşik kullanılırlar. Yapıları basittir ve nispeten daha ekonomiktir. Katı ortamda duyulur ısı depolama sistemi, ısı depolayıcı katı maddenin olduğu büyük bir depodan ve ısı transfer akışkanından (su, yağ, hava vb. ) meydana gelir. Kullanılan kayaların boyutları 1-5 cm arasında değişirken, kullanılan kaya miktarı ise yaklaşık olarak ısıtma uygulamaları için kullanılan kolektörlerin metrekaresi başına 300-500 kg arasında değişmektedir. Kaya ve çakıl taşı ile depolama 1000°C 'ye kadar ki yüksek sıcaklık uygulamaları içinde kullanılabilir (Ataer, 2006).Şekil 4'de ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sisteminin şeması verilmiştir.





Şekil 4. Ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sistemi (Kılıkış ve Kakaç, 1989).

Sıvı ortamda duyulur ısı depolamada bahsedilen zorluklar ve kısıtlamalar katı malzemeler kullanılarak giderilebilir. Kaya, maliyet açısından iyi bir TED materyalidir. Bazen beton, düşük maliyet, kolay ve istenilen şekilde düzenlenmesinden dolayı seçilir. Fakat ısı depolama kapasitesi suyunkinin sadece yarısıdır. Buna rağmen depolanan enerji başına depolama ortamının maliyeti yine nispeten düşük seviyededir

Katı depolama ortamı ile ısı transfer akışkanı arasındaki doğrudan temas katı ortamda meydana gelen ısı transferinin iyileşmesini sağlar. Buna bağlı olarak da maliyetler minimize edilmiş(kullanılan miktarlar azalacak) olur. Katı depolama ortamının avantajları şöyle sıralanabilir (Ataer, 2006):

- Kayalar zehirli ve yanıcı değildir.
- Daha ekonomiktirler.
- Kayalar hem ısı transfer yüzeyi hem de depolama ortamı sağlar.
- Hava ile kayalar arasındaki ısı transferi geniş bir yüzey alanının olmasından dolayı iyidir ve ayrıca kayalar arasındaki temasın az olmasından dolayı da ısı iletimi düşüktür. Dolayısıyla da kayalardan olan ısı kaybı azdır.
- Kaya termal depolamanın suya göre en önemli avantajı 100°C'nin üzerinde ısı depolanması için kolayca kullanılabilmesi ve deponun sızdırma probleminin olmayışdır.

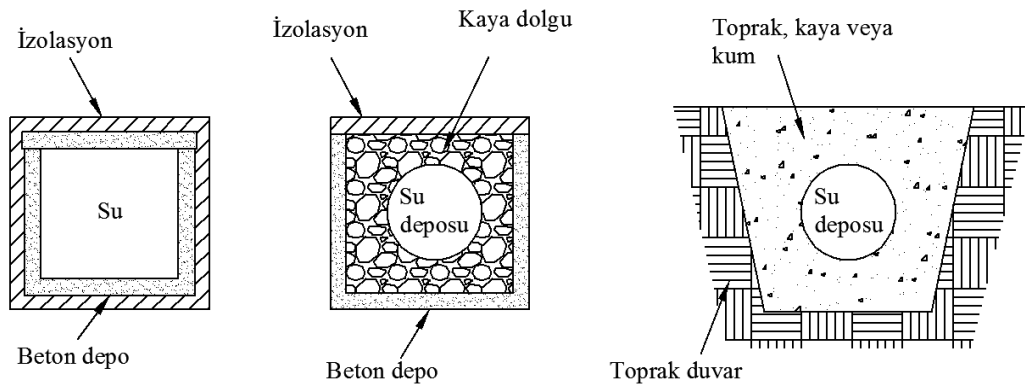
Elektrik kullanımının ve fiyatlarının daha ucuz olduğu gece saatlerinde de bir ısıtıcı yardımıyla ısı depolamak mümkündür. Depolanan bu ısı katı ortamdan hava geçirilerek ortam ısıtması için kullanılabilir (Ataer, 2006).

Duyulur TED’de bir diğer önemli parametre ise ısının alınıp verilme oranıdır. Bu karakteristikler ısı geçişinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, demir kütle mükemmel bir termal depolama malzemesidir. Aynı zamanda demir yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletkenliğine sahiptir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için cazip olması yanında düşük sıcaklık duyulur TED için (100°C’ye kadar) demir ve demir oksit, deponun birim hacmi için suyla karşılaştırılabilecek termal özelliklere sahiptir. Fiyatlar hem oksit taneleri hem de metal topraklar için uygundur (Akgün, 2006). Bazı yaygın katı ortam duyulur ısı TED materyalleri ve özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler (Kaygusuz, 1992).

Depolama maddesi	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı, c (J/kg.K)	Isı kapasitesi c*10 <sup>-6</sup> (J/m <sup>3</sup> .K)	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Isıl yayılma α=k/c*10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s )
Alimünyum	2707	896	2,4255	204 20°C'de	84,10
Alimünyum oksit	3900	840	3,2760	-	-
Alimünyum sülfat	2710	750	2,0325	-	-
Tuğla	1698	840	1,4263	0,69 29°C'de	0,484
Beton	2240	1130	2,5310	0,9-1,3	0,35-0,51
Dökme demir	7900	837	6,6123	293	4,431
Saf demir	7897	452	3,5694	73,0 20°C'de	20,45
Kalsiyum klörür	2510	670	1,6817	-	-
Bakır	8954	383	3,4294	385 20°C'de	112,3
Toprak (yaş)	1700	2093	3,5581	2,51	0,705
Toprak (kuru)	1260	795	1,0017	0,25	0,250
Magnezyum oksit	3570	960	3,4272	-	-
Potasyum klorür	1980	670	1,3266	-	-
Potasyum sülfat	2660	920	2,4472	-	-
Sodyum karbonat	2510	1090	2,7359	-	-
Sodyum klorür	2170	920	1,9964	-	-
Sodyum sülfat	2700	920	2,4840	-	-
Granit	2640	820	2,1648	1,73-3,98	0,79-1,84
Kumtaşı	2200	710	1,5620	1,83	0,56-0,59
Kireçtaşı	2500	900	2,2500	1,26-1,33	0,99-1,41
Mermer	2600	800	2,0800	2,07-2,94	1,72

c. İkili Sistemde Duyulur Isı Depolama: sıvı ve katı ısı depolama malzemelerinin bir arada kullanıldığı sistemler de vardır. Bu sayede sistemlerin (sıvı ve katı ortamların) olumsuz yönleri giderilmiş olur. Şekil 5’de Atomics International (A.B.D.) kuruluşu tarafından kullanılan üç çeşit ikili duyulur ısı depolama sistemi verilmiş olup, bunlar ikili sistemin en basit depo şekilleridir. En yaygın duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılan kaya dolgu yatak ve su ikili sistemidir. Bu sistemler genelde güneş enerjisi ile ikili depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. İkili depolama sisteminde yaygın olarak kullanılan kaya ve suyun termofiziksel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir (Akgün, 2006).



Şekil 5. İkili duyulur ısı depolama sistemleri (Garg vd., 1985).

Tablo 3. Duyulur ısı depolama ortamlarının karşılaştırılması (Hasnain, 1998a).

Özellik	Kaya	Su
Gizli ısı (kJ/kg)	1,0	4,2
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2240	1000
Depo için depolama kütlesi (10 <sup>6</sup> kJ /kg)	67000	16000
Depo için depolama hacmi (10 <sup>6</sup> kJ/m <sup>3</sup> )	30	16

### 1.2.1.3. Gizli Isıl Enerji Depolama (GIED)

Gizli ısı depolama, bir maddenin faz değişimi veya durum değişiklikleri ile ilişkilidir. Gizli ısı depolama; sabit bir sıcaklıkta veya belirli bir sıcaklık aralığında maddenin faz değişimi süresince iç enerjindeki değişim ile çevreden aldığı veya çevreye verdiği ısıdır. Bu faz değişiminin meydana gelebilmesi için gerekli olan enerji erime noktasında erime ısısı, kaynama noktasında da buharlaşma ısısı olarak adlandırılır. Gizli ısı depolama metodunda beş farklı faz değişim tipine rastlanır. Bunlar, katı-katı, katı-sıvı, sıvı-buhar, katı-buhar, sıvı-sıvı faz değişimleridir (Wang vd., 2000a).

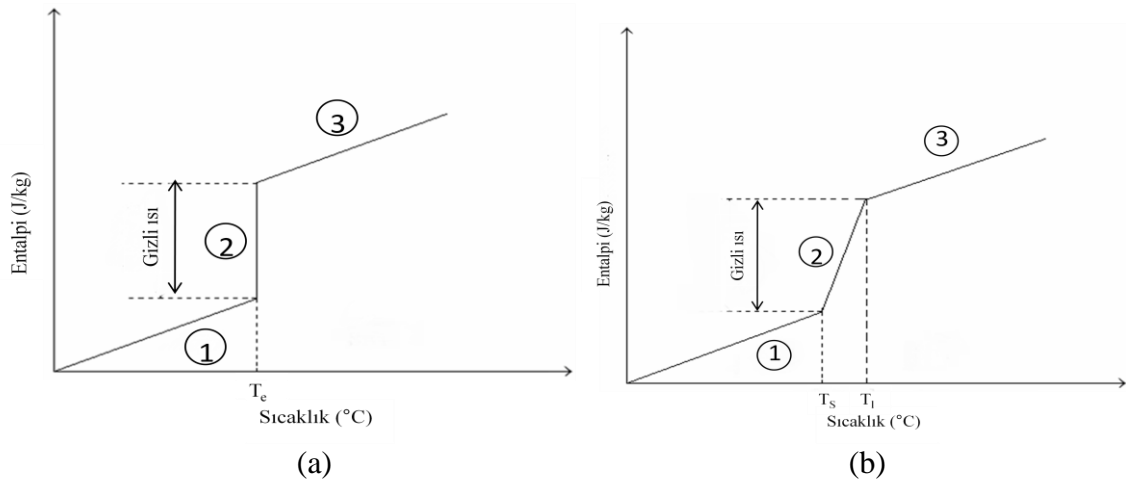
Katı-buhar ve sıvı-buhar geçişleri daha yüksek erime gizli ısısına sahip olmalarına karşın faz geçişi esnasında hacim değişiminin büyük olması yüksek basınca dayanıklı kapların kullanımını gerektirdiği için ısı depolamaya uygun değildir. Faz değişimi sırasında hacimdeki büyük değişim sistemin tasarımını oldukça karmaşık hale getirir. Bu faktörler sistem maliyetine arttıracığı için yapı uygulanabilirlikten uzaklaşır. Sıvı-sıvı dönüşümlerinde de depolanabilecek enerji çok azdır. Bu yüzden, katı-katı ve katı-sıvı faz değişim türleri hem tersinir durum olmaları hem de uygulanabilirlik açısından daha uygundur (Lane, 1983; Hasnain, 1998a; Sarı, 2000).

Faz değişim periyodu, faz değişiminin başından sonuna olan periyodu tanımlar. Faz değişim periyodunun sınırı; malzemenin faz değişim sıcaklığının  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  aşılması aralığı olarak belirlenir. FDM tamamen eridikten sonraki fazla ısı FDM'in sadece duyulur ısısını artırır (Dinçer ve Rosen, 2002). Bu periyotta yapılan termal depolama, Faz değiştiren maddenin (FDM) gizli ısı depolama kapasitesini belirler. FDM ile ilgili kapsamlı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir. FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi yüksek olsa bile katı fazının ısı iletim katsayısının düşük olması ve erimiş fazda düşük taşınım etkilerinden dolayı FDM'ye olan ısı transferi güçleşmektedir. GIED sistemindeki faz değişim maddesinin (FDM) enerji depolama kapasitesi aşağıdaki denklemler ile ifade edilir:

$$Q = \int_{T_i}^{T_e} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot H_e + \int_{T_e}^{T_s} m \cdot c_s \cdot dT \quad (2)$$

$$Q = m \cdot [H_e + c_k(T_e - T_i) + c_s \cdot (T_s - T_e)] \quad (3)$$

Burada;  $T_o$ , (K) başlangıç sıcaklığını,  $T_e$ , (K) erime sıcaklığını,  $T_s$  (K), son sıcaklığı,  $C_p$  (kJ/kgK,) maddenin katı fazının sabit basınçtaki özgül ısısını,  $C_s$  (kJ/kgK), sıvı fazın sabit basınçtaki özgül ısısını ve  $H_e$  (kJ/kg) erime gizli ısısını simgelemektedir. Şekil 6' de gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi verilmiştir. 1 ve 3 nolu bölgeler duyulur ısı depolamayı, 2 nolu bölge ise gizli ısı depolamayı ifade etmektedir. Şekil 6a saf maddeler için olan entalpi-sıcaklık değişimini gösterirken Şekil 6b ise saf olmayan maddeler için olan entalpi-sıcaklık değişimini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi sabit sıcaklıkta faz değiştirme (a), sıcaklık aralığında faz değiştime (b)

Gizli ısı depolama metodunun diğer metotlara göre üstün özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (Mazman, 2000):

- Duyulur ısıya göre ısı depolama kapasitesi daha yüksektir ve kullanılan ısı deposu hacmi daha küçüktür,
- FDM'nin birim kütleinin ve hacminin ısı depolama kabiliyeti daha yüksektir,
- FDM'nin faz değişim sıcaklığı, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanım için uygundur,
- Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için uygundur.

Gizli ısı yoluyla ısıl enerji depolamanın yukarıda sözü edilen üstünlüklerinin yanındabazı dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Farid vd., 2004):

- FDM'lerin düşük ısı iletkenliği,
- Depolama sırasında meydana gelen yoğunluk değişimi,

- Uzun süreli kullanım sonucunda maddenin yapısında ortaya çıkan kararsızlıklar,
- Faz ayrılması ve aşırı soğuma.

Tablo 4’de bazı duyulur ve gizli ısı depolama maddelerinin termofiziksel özellikleri verilerek  $10^6\text{J}$ ’lük enerji depolamak için hacimsel ve kütleli olarak ne kadar madde gerektiği inorganik FDM referans alınarak oransal olarak gösterilmiştir. Kütleli olarak karşılaştırma yapıldığında bir kg inorganik FDM’nin depolayabildiği enerjiyi dört kat daha fazla su veya on beş kat daha fazla kayanın depolayabileceği, hacimsel olarak karşılaştırma yapıldığında ise  $1\text{ m}^3$  inorganik FDM’nin sağladığı enerjiyi  $11\text{ m}^3$  kayanın veya  $6\text{ m}^3$  suyun sağlayabildiği görülür.

Tablo 4. Duyulur ve gizli ısı depolama sistemlerinin enerji depolama kapasitesi bakımından karşılaştırılması (Hasnain, 1998b).

Termofiziksel özellikler	Kaya	Su	Faz değiştiren maddeler	
			Organik	İnorganik
Yoğunluk ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2240	1000	800	1600
Özgül ısı ( $\text{kJ}/\text{kg.K}$ )	1,0	4,2	2,0	2,0
Gizli ısı ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	-	-	190	230
Gizli ısı ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )	-	-	152	368
$10^6\text{J}$ enerji depolamak için gerekli hacim (kg)	67	16	5,26	4,35
$10^6\text{J}$ enerji depolamak için gerekli hacim ( $\text{m}^3$ )	30	16	6,6	2,7
Bağıl kütle	15	4	1,25	1,0
Bağıl hacim	11	6	2,5	1,0

Aşağıda sıvı-buhar, katı-katı, katı-sıvı faz değişimleri kısaca açıklanmıştır.

a. Sıvı-Buhar Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama: gaz fazı moleküllerinin enerji düzeyleri sıvı ve katı fazınkilere oranla yüksektir. Bu nedenle de gaz yoğunlaşırken veya donarken çevreye büyük miktarda enerji verir. Ancak; sıvı-buhar faz geçişinde buharın yüksek basıncı ve meydana gelen hacimsel genişmeden dolayı hacimce geniş ve basınca dayanıklı depolara ihtiyaç duyulur. Bu da, depo maliyetlerini artırdığından genellikle ısı depolamada tercih edilmez. Buna ilaveten, buhar tüm enerji depolama işlemleri için düşük bir ısı iletimine sahiptir (Son ve Morehouse, 1991).

b. Katı-Katı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama: Katı durumdaki bir materyal kristalleşerek diğer bir katı faza dönüştüğünde (katı-katı değişimi), kristalleşme ısısı şeklinde ısı depolanır. Bu olaya katı-katı faz değişimi ile ısı depolama denir. Materyal ilk durumdaki katı fazına yeniden dönüştüğünde, faz değişimi sırasında depolanan ısı da geri kazanılır.

Katı-katı faz değiştiren malzemeler, düşük gizli ısıya ve yüksek faz değişim sıcaklıklarına sahiptir. Bu nedenle, ısı depolama çalışmalarında yeterli ilgiyi görmezler. Ancak, faz değiştirme süresince düşük hacim değişimi, sızdırmazlık probleminin olmayışı, depoda daha az aşınma ve bileşiklerinin ayrışması daha az olduğundan daha uzun hizmet ömrü gibi avantajlara sahiptirler (Wang vd., 2000b). Bu avantajlarının yanında, katı-katı faz değiştiren malzemeler, iki kritik probleme sahiptir. Bunlardan biri, her iki katı fazının ısı iletim değerleri faz değişim bölgesindeki ısı iletim değerlerinden büyük olmasıdır; bu yüzden, faz değişimi için uygulanan depolama sıcaklığı ile maddenin faz değişim sıcaklığı arasındaki farkın büyük olması gerekir. Aksi takdirde, ısı depolama süresi uzar. İkinci problem ise, bu malzemelerin hava sızdırmaz bir kap içinde muhafaza edilmediklerinde süblime olmasıdır. Fakat, katı-katı faz değiştiren malzemelerin buhar basınçları düşük olduğu için üzerlerine basınç uygulamak sorun değildir. Literatürde yapılan birçok araştırmada katı-katı faz değiştiren malzemeler ile ilgili verilerin ısı iletim değerleri uyumsuzdur (Son ve Morehouse, 1991).

Katı-katı faz değiştiren maddelerin üç tipi vardır. Bunlar; organometalikler, geçiş polimerleri ve hidrokarbon moleküler kristallerdir (Li, 1999; Wang vd., 2001).

c. Katı-Sıvı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama: Katı-sıvı faz değişimi diğer tür gizli ısı depolama yöntemlerinde bahsedilen olumsuzlukları içermez. Ayrıca bu faz değişimi esnasında hacim değişimi oldukça küçüktür (% 10 veya daha az) ve bu tip faz değişiminden yararlanılarak çalışan sistemleri tasarlamak diğerlerine oranla daha basittir (Abhat, 1983). Bu sebeple, katı-sıvı faz geçişleri ekonomik açıdan daha uygundur.



Katı-sıvı faz değişimi ile gizli ısı depolama diğer faz geçiş yöntemleri ile depolamaya göre daha yoğun kullanılmaktadır. Literatür ve uygulamalarda faz geçişi ile ısı depolama denildiğinde katı-sıvı faz geçişi ile gizli ısı depolama ifade edilir. Bu çalışmada da, katı-sıvı faz değişimi yerine sadece “faz değişimi” ifadesi kullanılacaktır ve erimenin faz değişimi akla gelecektir.

Katı-sıvı faz değişim malzemeleri ile gizli ısı depolamanın uygulama avantajlarına karşın,

- Katı-sıvı faz değiştiren malzemelerin düşük ısı iletkenliği,
- Sıcaklıkla yoğunluk değişimi,
- Aşırı soğuma ve bazı maddelerde faz ayrışması,
- Uzun süreli çevrimlerde termofiziksel özelliklerde değişim

gibi olumsuzluklar yüzünden uygulamada sıkıntılar yaratmaktadır (Farid vd., 2004).

Gizli ısı depolama, FDM’lerin erime sıcaklıklarına bağlı olarak; soğuk depolama, düşük sıcaklıkta depolama ve yüksek sıcaklıkta depolama olarak sınıflandırılır. Aşağıda bu farklı üç tür kısaca izah edilmiştir (Akgün, 2006):

1. Soğuk depolama: soğuk depolamanın ana hedefi işletme maliyetinin düşürülmesidir. Soğutucu sistemlerin en fazla çalıştığı ve maliyetinin yüksek olduğu gündüzdeki(pahalı elektrik) zaman dilimini, daha ucuz olan gece(ucuz elektrik) kullanımlarındaki maliyetlere getirmek için yapılır. Genelde FDM olarak su, glikol ve ötektik tuzlar kullanılır. Maksimum erime yeteneği olan tuzlar termal depolama için uygun olsa da tuzların sudan daha pahalı olması, daha fazla korozyon etkisi, yoğun faz ayrışmaları ve yükleme/boşaltmadaki kayıplardan dolayı çok fazla tercih edilmez. Suyun korozyon ve hacimsel genleşme gibi dezavantajlarına rağmen ucuz ve bol bulunması dolayısıyla ısı depolama malzemesi olarak yaygın kullanılır (Hasnain, 1998b; Chen vd., 2000; Ismail ve Henriquez, 2000; Erek vd., 2005).

Buzla gizli ısı depolamada, FDM erirken çoğu diğer FDM’lerden farklı olarak buzun yoğunluğu erimiş fazinkinden daha az olduğu için buz erimiş bölgenin üstüne çıkar. Bu da yatay gizli depolama sistemlerinde, suyun ısı depolama zamanını kısaltmaktadır. Diğer soğuk depolama FDM’lerinde, erimiş madde yukarı doğru çıkarken katı madde sıvı fazın altına doğru kayar (Liu vd., 2005b). Soğuk depolama duyulur veya gizli ısı depolama şeklinde yapılmakla birlikte FDM ile depolama yoğunluğunun fazla olması dolayısıyla genelde su ile gizli ısı depolama çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

2. Düşük sıcaklıkta depolama: düşük sıcaklıkta depolama yöntemi(erime sıcaklığı düşük olan FDM'ler), hacim ısıtma, evsel sıcak su ihtiyacı ve sera ısıtma gibi uygulamalarda ya doğrudan veya bir yardımcı ısı kaynağı ile birlikte kullanılır. Depolama sistemlerinin imalatının kolaylığı, faz değıştiren maddelerin genelde fiyatlarının ucuzluğu ve çalışma sıcaklık aralıklarının düşük olması (20-120°C) nedeniyle düşük sıcaklıkta depolama yaygın olarak kullanılmaktadır. Erime sıcaklık aralığı ve termofiziksel özellikleri gizli ısı depolamaya uygun olan FDM kullanılır (Akgün, 2006).

3. Yüksek sıcaklıkta depolama: yüksek sıcaklıkta depolama; sanayi, odaklanmış güneş yansıtıcı buhar sistemleri ve yüksek sıcaklık isteyen uygulamalarda kullanılır. Kimyasal maddeler yanında yüksek sıcaklıkta eriyen maddeler (demir ve alaşımları), beton ve kayalar bu depolama sistemlerinde kullanılır (Akgün, 2006).

### **1.3. Gizli Isı Depolama Sistemlerinde Kullanılan Faz Değiştiren Maddeler**

FDM'ler, belirli sıcaklık aralıklarında fazlarını değıştirme yeteneğine sahip maddelerdir. Faz değıştiren maddeler (FDM) yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü faz değıştiren maddeler son derece geniş bir uygulama yelpazesi içerisinde kolaylıkla değerlendirilebilmektedirler.

Uygun bir sıcaklık aralığında faz değışimine uğrayan maddeler (FDM) aynı zamanda gizli ısı depolama maddeleridir. Ortam sıcaklığı artarken FDM katıdan sıvıya faz değıştirir. Faz değışimi endotermik bir işlemdir ve bu nedenle FDM ısı alır. Faz değışim sıcaklığına ulaşıldığı zaman depolama maddesinde depolanan ısı maddeyi eritmeye başlar. Erime işlemi tamamlanıncaya kadar sıcaklık sabit kalır. Maddenin faz değışim işlemi (erime, şarj) süresince depolanan ısı, gizli ısı olarak adlandırılır. Yani, bu maddeler içinde buldukları ortamın sıcaklığı faz değışim sıcaklığının üzerine çıktığında çevreden ısı alırken soğuma (katılaşma, deşarj)esnasında bu ısıyı tekrar çevreye vermektedirler. Bu sayede faz değıştiren maddeler içinde buldukları ortamda sıcaklığın dalgalanmasını regüle ederek konfor sağlamaktadır. FDM'lerin bu şekilde bina içi ısıtma ve iklimlendirme sistemlerinde ciddi ısı tasarrufu sağlayabildiği bilinmektedir. Gizli ısı depolama maddeleri, çok küçük sıcaklık değışimi ile büyük miktarda ısı depolayabilirler ve bu yüzden yüksek depolama yoğunluğuna sahiptirler. Faz değışimleri sabit sıcaklıkta meydana geldiğinden dolayı enerjiyi sabit bir sıcaklıkta depolarlar. Gizli ve duyulur ısı depolama maddeleri

karşılaştırıldığı zaman, gizli ısı depolama maddelerinin tipik olarak 5-10 kat daha yüksek bir depolama yoğunluğuna sahip olduğu görülür (Garg vd., 1985; Hasnain, 1998).

Gizli ısı depolama geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir ve FDM olarak kullanılacak birçok maddenin erime sıcaklıkları ve erime ısıları bilinmektedir. FDM'nin erime noktası veya aralığı, erime gizli ısısı ve termofiziksel özelliğini belirlemek için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC: Differential Scanning Calorimetry) ve ısıl analiz (TA: Thermal Analysis) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Bu iki ölçme tekniği, yapılan ölçümlerin tipine, deneylerde kullanılan numunelerin miktarına ve sonuçların elde edilme hızına göre kendilerine has özellikler gösterir. Örneğin; DSC analizinde çok küçük miktarlarda (1-10 mg) numune kullanılarak enerji-zaman diyagramları şeklinde süratli ve güvenilir sonuçlar verir. Numunenin erime ve katılaşması esnasındaki faz geçiş sıcaklıklarının daha kesin tespit edilmesinde, erime gizli ısısı ve özgül ısı değişiminin belirlenmesinde bu yöntem kullanılır. TA tekniği, sıcaklık-zaman (T-t) diyagramlarının veya numunenin erimesi ve katılaşması esnasında kaydedilen ısıtma ve soğutma eğrilerinin çizilmesini içerir. TA tekniği, kullanılan cihaza bağlı olarak 10 g ile birkaç kg arasında değişen ağırlıkta numune kullanıldığından DSC yöntemine göre daha yavaştır (Abhat, 1983).

Kullanım amacına uygun olarak FDM'nin seçimi için bazı önemli kriterler göz önüne alınmalıdır. Gizli ısı depolama maddesi olarak kullanımı düşünülen birçok kimyasal bileşik ve karışım olmasına rağmen, bunların birçoğu, ekonomik, güvenlik veya fiziksel, kimyasal ve ısıl özelliklerinden dolayı tercih edilmezler. Bu amaçla yapılabilecek çalışmalar sonucu gizli ısı enerji depolama sistemlerinin (GIED) dizaynında kullanılacak FDM'lerde dikkat edilmesi gereken özellikler dört ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar (Sharma ve Sagara, 2005);

#### 1. Termofiziksel özellikler

- Erime sıcaklığı istenen sıcaklık çalışma aralığında olmalıdır.
- Birim hacim başına yüksek erime gizli ısısına sahip olmalıdır. Bu durum gerekli depo hacmini küçültür.
- Duyulur ısı depolama işlemini sağlamak için yüksek özgül ısıya sahip olmalıdır.
- Depolama sistemlerinin enerji yükleme ve boşaltmasını sağlamak için katı ve sıvı fazlarının yüksek ısı iletkenliğine sahip olması gerekir.

- Faz değişimi sırasında hacim değişimleri küçük olmalıdır ve depolama problemlerini azaltmak için çalışma sıcaklığındaki buhar basıncı küçük olmalıdır.
- Her bir erime katılaşma çevrimi esnasında maddenin sabit depolama kapasitesi için faz değiştiren madde uygun erime noktasına sahip olmalıdır.

#### 2.Kinetik zellikler

- Bir sıvı fazın aşırı soğumasını önlemek için yüksek çekirdekleşme hızına sahip olmalıdır,
- Yüksek kristal büyüme hızına sahip olmalıdır. Bu durumda sistem depodan ısı dönüşüm ihtiyacını karşılayabilir.

#### 3.Kimyasal zellikler

- Kimyasal denge ( Her iki yöndeki faz değişim hızının aynı olması),
- Erime/katılaşma çevriminde tam bir dönüşme (tersinirlik),
- Pek çok erime/katılaşma çevriminden sonra bozulmama,
- Depo malzemesinde korozyona sebep olmama,
- Emniyet için zehirli, yanıcı ve patlayıcı olmama,
- Ucuz ve bol miktarda bulunabilme.

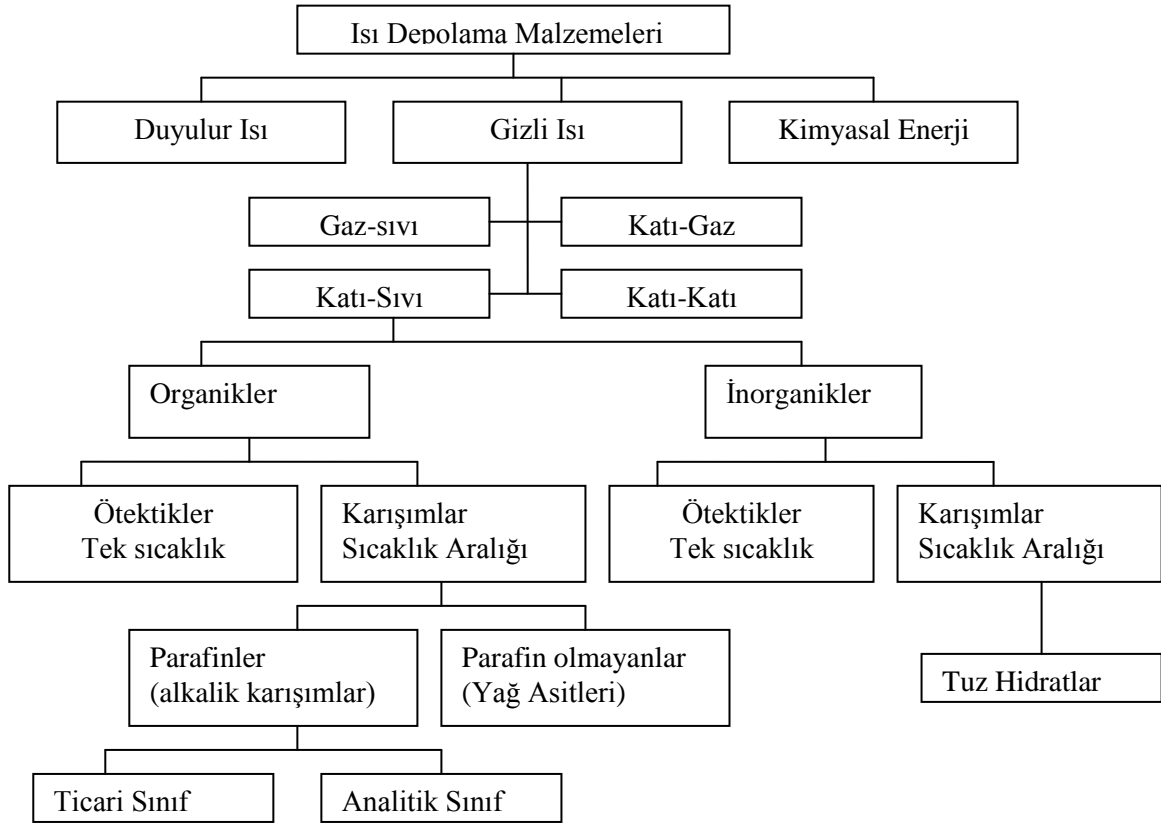
#### 4.Ekonomik zellikler

- Kolay temin edilebilir olmalı,
- Düşük maliyete sahip olmalı.

### 1.3.1. FDM'lerin Sınıflandırılması

Faz Değiştiren Maddeler (FDM) inorganik ve organik olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Termal enerji depolama yöntemleri ve bununla beraber gizli ısı depolama malzemelerinin sınıflandırılması Şekil 7'de verilmiştir. İnorganik FDM' lere tuz hidratları ve klatrat hidratları (gaz hidratlar) örnek verilebilir. İnorganik FDM' lerin avantajları; yüksek ergime ısısı, iyi termal iletkenlik, ucuz ve yanıcı olmamaları, dezavantajları ise; korozif olmaları, aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması ve hidrat sayısında azalma şeklinde özetlenebilir. Organik FDM'lere parafinleri ve yağ asitlerini örnek gösterebiliriz. Organik PCM'lerin avantajları; kimyasal yönden kararlı, az veya hiç aşırı soğuma göstermemesi, korozif ve toksik olmamaları, yüksek ergime ısısı ve düşük buhar basıncı göstermeleri, dezavantajları ise; düşük termal iletkenlik, faz değişimi sırasında büyük

hacim değişimi, yanıcı olmaları seklinde özetleyebiliriz. Organik FDM'lerin erime ısıları (ısı depolama kapasitesi) inorganik tuzlarınkinin yarısı kadardır.



Şekil 7. Isı depolama malzemelerinin sınıflandırılması (Zalba vd., 2003).

Erime sıcaklığı ve erime gizli ısı bakımından FDM olarak tanımlanabilecek çok sayıda organik, inorganik ve bunların ötektik karışımları mevcuttur. FDM'lerin birçoğunun erime sıcaklıkları ve depolama ortamı için gerekli özellikleri uygun değildir. İdeal bir ısı depolama ortamı için gerekli tüm özelliklere sahip FDM mevcut olmadığı için mevcut maddelerin kullanılması gerekir. Bu sebeple, sistemin tasarımı ile zayıf olan özelliklerin iyileştirilmesi gereklidir. Örneğin FDM'lerin ısı iletkenliğini arttırmak için metalik kanatçıklar (ısı transferi alanı artırılır) kullanılabilir. Diğer taraftan depolama maddesine uygun çekirdekleştirici ilave edilerek aşırı soğumanın önüne geçilebilir ve yine uygun bir yoğunlaştırıcı kimyasal madde kullanılarak uygunsuz erime olayı önlenir (Telkes, 1974). Bu maddelerin çok farklı ısı ve kimyasal davranışları için detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir. Gizli ısı depolama sistemlerinin tasarımında bu özellikler oldukça

önemlidir. Dolayısıyla maddeyi seçmeden önce istenen özelliklerin en iyi şekilde bilinmesi gerekmektedir. Tablo5’de organik ve inorganik depolama maddelerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo5. Isı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırması (Sharma ve Sagara, 2005).

Organikler	İnorganikler
<p>Avantajları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Korozyon yok</li> <li>• Aşırı soğutma yok ya da az</li> <li>• Kimyasal ve termal denge</li> </ul>	<p>Avantajları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Büyük erime entalpisi</li> </ul>
<p>Dezavantajları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük erime entalpisi</li> <li>• Düşük ısı</li> <li>• Kolayca yanabilme</li> </ul>	<p>Dezavantajları</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aşırı soğuma</li> <li>• Korozyon</li> <li>• Faz ayrışması</li> <li>• Faz bozulması, termal dengesizlik</li> </ul>

### 1.3.1.1.Organik Faz Değiştiren Maddeler

Organik FDM’ler kimyasal olarak kararlı olup uzun ömürlüdürler. Bu maddelerde aşırı soğuma ve faz ayrılması gibi sorunlarla pek karşılaşılmaz. Korozif değildir, içine kondukları deponun malzemesi ile uyumlu çalışırlar. Buna karşılık faz değiştirme entalpileri ve ısı iletkenlikleri inorganik FDM’lere göre daha düşüktür. Yanıcı ve daha pahalıdır. Organik FDM’ler, ötektik FDM’ler ve bileşik (karışımlar) FDM’ler olarak ikiye ayrılırken, bileşik FDM’ler de parafinler ve parafin olmayan bileşikler (yağ asitleri vb.) olarak ikiye ayrılır. En yaygın olarak kullanılan organik FDM’ler parafinlerdir. Bazı organik FDM’lerin listesi Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Organik FDM'lerin listesi (Sharma ve Sagara, 2005).

Malzeme	Erime noktası, °C	Gizli ısı, kj/kg
n-tetradekan	5,5	226
Formikasit	7,8	247
n-pentadekan	10,0	205
Asetikasit	16,7	273
n-hegzadekan	16,7	237
Kaprilon	40,0	260
Dodesilbromür	40,0	201
n-henikosan	40,5	161
Fenol	41,0	120
n-laurikasit	43	183
n-hegzakosane	56,3	257
Balmumu	61,8	164

1.Organik Karışımlar (Bileşikler): bu grupta yer alan FDM'ler parafin ve parafin olmayanlar olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

Parafinler: parafin mumu petrolden elde edilen renksiz, kokusuz bir mum çeşididir. Parafin mumu ilk defa 1829 yılında Carl Reichenbach tarafından odun katranından; daha sonra bütümlü tabakalardan; 1867'den sonra da petrolden elde edildi. 1947'de de sentetik parafin mumu yapıldı. Petrolün bir yan ürünüdür ve ham petrolün, parafininin giderilmesi gerekir. Ham petrolün rafinasyonunda yan ürün olarak elde edilen yağlı parafin önce sıcakta eritilir, sonra da soğutulur ve yalnız parafinin donması sağlanır ve donan parafin şeklindeki parafin yağlı kısımlarından süzülerek ayrılır. Yeni metodlara göre yapılan parafin mumları % 20 kadar yağ ihtiva eder. Bazı durumlarda yağ miktarı % 3'e kadar düşürülür. Daha ileri saflaştırma ile renk, koku ve tadı daha iyileştirilir. Saflaştırma işleminde sülfat asidi ve kil kullanılır. Parafin mumları, Pennsylvania ham petrolü gibi parafin esaslı petrol türlerinden elde edilir. Ham parafin mumunun erime noktası 37 ile 48°C tam rafine edilmiş parafin mumunun erime noktası ise, 48 ile 66°C arasında değişir. Erime noktası yüksek olan parafin mumu çoğunlukla 26-30 karbonlu alkanlardır (URL-1).

$C_nH_{2n+2}$  formülü ile karakterize edilen parafinler birbirlerine çok benzeyen ısıl ve kimyasal davranışa sahip olup hidrokarbonlar grubundandır. Serideki ilk dört alkan

(metan'dan (CH<sub>4</sub>)-pentan'a (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>)) oda sıcaklığında, atmosfer basıncında gazdır. Karbon sayıları C<sub>5</sub> ve C<sub>15</sub> arasında bulunan parafinler sıvı halde, geriye kalanlar (n>15) wax'lı katılar halinde bulunurlar. Parafin wax en çok kullanılan ticari organik ısı depolama malzemesidir (Hale, vd., 1971; Lane,1983). Parafin waxlar düz zincirli hidrokarbonlar olup erime sıcaklığı 23-67 °C arasındadır (Abhat, 1983). Ticari parafin wax, petrolün damıtılmasından elde edilir ve saf değildir. Ancak, farklı hidrokarbonların bileşimidir. Genelde hidrokarbon zincirinin ortalama uzunluğundan daha uzun olan hidrokarbonlar yüksek erime sıcaklığı ve erime gizli ısısına sahiptir (Hiran vd., 1994). Bazı parafinlerin özellikleri Tablo 7'de verilmiştir. Parafinler, üreticilerden kolayca temin edilebilir ve tuz hidratlardan daha pahalıdır.

Ticari parafin waxlar, orta ısı depolama yoğunluğuna ve geniş bir erime aralığına sahiptir. Belirli bir kimyasal formülleri yoktur ve diğer tüm özellikleri parafinle aynıdır.

Saf parafinler çok pahalıdır ve sadece deneysel çalışmalarda kullanılır. Bu nedenle çoğu araştırmacılar uygulama değerleriyle uyuşsun diye çok daha ucuz olan ticari parafini kullanmışlardır.

Parafinlerin, enerji depolama yanında gıda sektörü, sanayi, tıp, malzemelerin güvenli ve uzun süreli depolanması ve ev süs eşyaları gibi çok geniş bir kullanım alanı vardır.

Avantajları: parafin waxlar faz ayrışması eğiliminde değildir. Ancak, literatürde oksijene maruz bırakıldıklarında yavaş bir oksidasyon gösterdikleri belirtildiğinden kapalı kaplarda depolanmaları tavsiye edilir. Sharma vd. (1998, 1999 ve 2002), yaptıkları deneysel çalışmada ticari parafinlerin de 1500 erime/katılama çevrimi sonunda bile kararlı özelliklere sahip olduklarını göstermiştir. Parafin wax, tekrarlanan erime katılama çevrimlerinden sonra ısı özelliklerinde düzenli bozulma göstermez. FDM olarak kullanılan malzemelerin çok azında çevrim etkisi araştırılmıştır. Üç parafin karışımı üzerinde gerçekleştirilen deneylerle parafinlerin özellikleri üzerinde çevrimlerin etkisinin olmadığı kanıtlanmıştır (Hadjieva vd., 1992). Tablo 7'de görüldüğü gibi parafinler yüksek erime gizli ısılarına sahiptir. Aşırı soğuma göstermezler ve dolayısıyla çekirdekleştiricilere ihtiyaç duymazlar. Parafin waxlar kimyasal reaksiyona girmez, zehirli ve patlayıcı değildir. Bu maddeler, tüm metal depolayıcılarla uyumludur ve ısı depolama sistemlerine kolaylıkla doldurulabilir. Plastik depolarda bu maddeleri kullanırken dikkatli olmak gerekir. Çünkü parafinler, plastik kaplardan sızabilirler (Lane, 1983).

Dezavantajları: parafinler katı hallerinde gözenekli yapısından dolayı ısı iletim katsayısı düşüktür. Bu durum katılama esnasında yüksek ısı transfer hızları gerektiğinden problem



oluşturur. Velraj vd. (1998), bu problemin kanatçıklı kaplar ve metalik dolgu maddeleri veya gizli/duyulur ısı kombinasyonu kullanılarak azaltılabileceğini belirtmiştir. Parafinler, katı ve sıvı fazları arasında hacim değişmesine sahiptir. Bu durum depo tasarımında dikkate alınmalıdır. Yine literatürde parafinlerin ısı depolama kapasitelerinin nispeten düşük (inorganik maddelere kıyasla) olduğu belirtilmiştir. Tuz hidratlarının aksine ticari parafinler, genelde çok belirli erime noktaları göstermez. Parafinler yanıcı olduğundan yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına doğrudan temas etmemelidir. Parafinlerin tablo halinde avantaj/dezavantajları verilmiştir (Tablo 8).

Tablo 7. Bazı parafinler ve özellikleri (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	'C' atomu sayısı	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)
n-Dodecane	12	-12	750	0.21 <sup>K</sup>	-
n-Tridecane	13	-6	756	-	-
n-Tetradecane	14	4.5-5.6	771	-	231
n-Pentadecane	15	10	768	0,17	207
n-Hexadecane	16	18.2	774	0.21 <sup>K</sup>	238
n-Heptadecane	17	22	778	-	215
n-Octadecane	18	58.2	814 <sup>K</sup> (14), 775 <sup>S</sup> (14)	0.35 <sup>K</sup> (14), 0.149 <sup>S</sup> (14)	245
n-Nanodecane	19	31.9	912 <sup>K</sup> , 769 <sup>S</sup>	0.21 <sup>K</sup>	222
n-Parafin (polimerik)	-	32	785 <sup>K</sup> (15), 749 <sup>S</sup> (15)	0.514 <sup>K</sup> (15), 0.224 <sup>S</sup> (15)	251
n-Hegzakosan	26	56	770	0.21 <sup>K</sup>	257
n- Heptakosan	27	59	773	-	236

K: katı, S: sıvı

Tablo 8.Parafinlerin avantaj ve dezavantajları

FDM	Avantaj	Dezavantaj
Parafin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faz ayrımı göstermezler</li> <li>• Kimyasal olarak kararlıdır</li> <li>• Aşırı soğuma eğilimi göstermezler. Bu nedenle çekirdekleştirici madde gerekmez.</li> <li>• Erime gizli ısıları yüksektir.</li> <li>• Korozif ve zehirleyici özellikte değildirler.</li> <li>• Düşük maliyete sahiptirler.</li> <li>• Kolay temin edilirler.</li> <li>• Düşük buhar basıncına sahiptirler.</li> <li>• Erime esnasında büyük hacim değişimi göstermezler.</li> <li>• Erime noktaları geniş bir aralık içindedir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isıl iletkenlikleri düşüktür.</li> <li>• Yanıcıdırlar.</li> <li>• Sabit bir erime sıcaklığına sahip değildirler.</li> </ul>

#### a. Parafin Olmayan Organik Bileşikler

Gizli ısı depolama için en geniş madde gurubunu oluştururlar. Abhat (1983), parafin olmayan maddeler için esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikollerin enerji depolama için uygun olduğunu ifade etmiştir. Bu organik maddeler daha çok yağ asitlerinin alt grupları ve parafin olmayan diğer organik maddelerdir. Yüksek değişken özelliklere sahip faz değiştiren maddelerin çoğunluğunu parafin olmayan organikler teşkil eder. Bu maddelerin her biri, kendi özelliklerine sahip olup, parafinlerin özelliklerinden farklıdır. Bu maddeler yanıcı olduklarından yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmamalıdır. Düşük ısıl iletkenliğe ve düşük oranda zehirlenme özelliğine sahiptirler (Keleş, 2003).

#### 2. Organik Ötektik Karışımlar

Ötektik karışım, kristallenme süresince bileşen kristallerinin bir karışım oluşturduğu, her birinin düzenli olarak eridiği ve katılaştığı iki veya daha fazla bileşenin minimum erime noktalı karışımıdır (Lane, 1989; Sharma, 2005; Sarı, 2005). Ötektikler, genelde faz ayrışması olmaksızın erir ve katılaştır. Çünkü onların yeni karışımı, her bir maddenin kendi kristalleri oluşuncaya kadar donarlar. Erime durumunda ise, ötektiği meydana getiren her iki kristal kendiliğinden sıvılaşır ve birbirinden ayrılır. Yağ asidi ötektik karışımları, literatürde en fazla yer alan organik ötektiklerdir. Yağ asitleri ötektik karışımları konusunda literatürde birçok çalışmaya rastlamak mümkündür (Akçay, 2006)

### 1.3.1.2. İnorganik Faz Değiştiren Maddeler

İnorganik FDM'lerin faz değiştirme entalpileri ve ısı iletim katsayıları organik FDM'lerden daha yüksektir. Genellikle daha ucuzdurlar. Fakat bunun yanında aşırı soğumaya ve faz ayrılmasına eğilimlidirler. Kimyasal kararlılıkları iyi değildir ve koroziftirler. Bu dezavantajların giderilmesi için ek önlemlerin alınması gerekir. İnorganik FDM'ler de organik FDM'ler gibi ötektik FDM'ler ve bileşik FDM'ler (tuz hidratlar) olarak ikiye ayrılır. En çok bilinen inorganik FDM 'ler tuz hidratlar ve bunların ötektik karışımlarıdır (Kimura ve Kai, 1988; Abhat, 1983; Zalba vd., 2003).

### 1.3.1.3. Polimerler

Yukarıda belirtilen FDM'lerin dışında kullanımları çok yaygın olmamakla birlikte farklı FDM'ler de vardır. Bunlar;

Çapraz-bağlı Polietilen, eridiği zaman sıvı hale dönmesini engelleyen zayıf çapraz bağlara sahip ve plastik şişelerde kullanılan polietilene çok benzerdir. Kristalin yapısı bozulduğu zaman ve tekrar oluştuğu zaman enerji depoladığı için katı-sıvı FDM'ye benzer. Çapraz bağlı polietilen katı-sıvı FDM'den daha kararlıdır ve başka bir madde içinde depolanmaksızın kullanılabilir (Akçay, 2006).

Polialkoller, alkoller, alkanlardan bir hidrojen çıkarıp yerine hidroksil (-OH) grubu geçmesiyle oluşan organik bileşiklerdir. Polialkoller, daha düşük sıcaklıkta heterojen halden daha yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik şeklinde bir yapı değişimi ile enerjiyi depolar. Polialkoller küçük hacim değişimi gösterme, akma davranışı ve faz ayrışması göstermeme gibi katı-sıvı FDM'lerin üzerinde birçok avantaja sahiptirler. Bu avantajların yanında düşük gizli ısı değerine, yüksek faz değişim sıcaklığına ve yüksek maliyete sahip olma gibi dezavantajları vardır (Wang vd., 2000).

## 1.4. Gizli ısı depolama sistemlerinin performansı

Gizli ısı depolama sistemlerinin en önemli üstünlüğü, depolama ünitesinin küçük hacimli olmasıdır. Bu nedenle ısı depolama ünitesinden daha az ısı kaybı oluşur. Gizli ısı depolama sistemlerinde aşağıdaki uygulamalarla daha etkin olarak yararlanılabilir (Öztürk, 2008):

- Hacimsel enerji gereksiniminin yüksek olduğu, sera veya hayvan barınakları gibi bitkisel veya hayvansal üretim yapılan tarımsal yapıların iklimlendirilmesi
- Sabit veya düşük sıcaklık aralığında enerji gerektiren uygulamalar
- Isı deposu boyutlarının önemli olduğu durumlar.

Gizli ısı depolama sistemlerinden en iyi performansı alabilmek için göz önünde bulundurulması gereken faktörler ve sistem tasarımında dikkat edilmesi gereken etkenler Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Gizli ısı depolama sistemlerinin performans ve tasarım faktörleri (Öztürk, 2008).

Sistem performansında etkili faktörler	Tasarımda dikkate alınan faktörler
<ul style="list-style-type: none"> <li>• FDM'nin termo-fiziksel özellikleri</li> <li>• Erime/katılaşma süresince olan ısı transferi</li> <li>• Isı değiştirici malzemesi</li> <li>• Isı değiştirici tasarımı</li> <li>• Isı taşıyıcı akışkan hızı</li> <li>• Isı taşıyıcı akışkanın termo-fiziksel özellikleri</li> <li>• Sıcaklık, ısı transferi ve depolanan ısının zamanla değişimi</li> <li>• FDM ve ısı transfer akışkanı arasındaki düşük sıcaklık farkıyla, depolanan ısının uygun olarak taşınması</li> <li>• Isı deposunun ortalama sıcaklığı</li> <li>• Isı depolama süresi</li> <li>• Isı geri kazanım süresi</li> <li>• Isı deposunun yalıtımı</li> <li>• Isı deposundan oluşan ısı kayıpları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isı depolama için sıcaklık aralığı tanımlanmalıdır.</li> <li>• Belirli bir sıcaklık aralığında ısı iletkenliği uygun FDM seçilmelidir.</li> <li>• Katı fazdaki ısı genleşme katsayısı uygun olan FDM seçilmelidir.</li> <li>• Depolama ve geri kazanım işlemlerinin aynı ısı değiştirici kullanılarak gerçekleştirilmesi durumunda, ısı değiştirici tasarımına önem verilmelidir.</li> <li>• Isı transferi gerçekleşen yüzey alanını artırmak için, FDM ile ısı transfer akışkanının doğrudan teması gibi etkin yöntemler uygulanmalıdır.</li> <li>• Isı transfer hızının azalmaması için, ısı değiştirici kullanılmalıdır.</li> <li>• Sistemde korozyonu önleyici kimyasal maddeler kullanılmamalıdır.</li> <li>• Geri kazanılacak ısı miktarlarının belirlenmesinde, çalışma ve bekleme sürelerindeki ısı kayıpları dikkate alınmalıdır.</li> <li>• Isı deposundaki basınç azalması, sistemde kullanılan fanlarla karşılanabilecek bir değerde olmalıdır.</li> <li>• FDM'nin ısı deposu malzemesiyle uygunluğu araştırılmalıdır.</li> <li>• FDM'ye laboratuvar testleri yapılmalıdır.</li> <li>• Depolanan ve geri kazanılan ısı miktarı ile bu işlemler için tüketilen enerji miktarı dikkate alınarak, ekonomik uygulanabilirlik saptanmalıdır.</li> </ul>

### 1.5. Faz Değiştiren Maddelerin Kullanım Alanları

Organik yapıdaki FDM'lerin büyük bölümü katı-sıvı faz değiştiren maddelerdir ve bir dış kaba gereksinim duyarlar. Yeterince hızlı ısı transferi sağlayabilen metal kapsüllerin maliyetleri oldukça fazladır. Üstelik makrokapsül olarak da bilinen bu tip uygulamalarda faz değiştiren maddeler için dekoratif bir görünüm sağlanabilmesi de mümkün değildir. Organik yapıdaki faz değiştiren maddeleri, polimer içerisinde hapsederek şekilce kararlı faz değiştiren maddeleri üretmek mümkün olmakla birlikte bu tip maddelerin doğrudan tekstil liflerinde kullanılabilmesi mümkün olamamaktadır. Bu amaçla çok az sayıda faz değiştiren madde polimerik bir yapı içerisinde mikro ölçekte hapsedilerek uygulanmıştır. Mikrokapsül haline getirilmiş faz değiştiren maddeler (Mikro FDM'ler) kullanılarak tekstil ürünlerinin termal özelliklerinin geliştirilmesi son on yılda ortaya çıkmış bir teknolojidir. Ancak, faz değişim teknolojisinin kullanımı 1970'lı yıllarda, NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından yürütölen bir araştırma programına dayanmaktadır. Bu programdaki asıl amaç, astronot giysilerine uzaydaki aşırı sıcaklık dalgalanmalarına karşı termal koruma etkinliğinin kazandırılmasıdır. Bu noktadan hareketle ortaya çıkan FDM ile birleştirilmiş tekstil ürünleri günümüzde artık tekstil endüstrisiyle ilgili pazarlarda yer bulmaya başlamıştır.

Mikrokapsül haline getirilmiş faz değiştiren maddeler tekstil yanında biyomedikal ve biyolojik taşıma, inşaat vb. pek çok alanda kullanım olanağı bulmaktadır (Chen, 2008, Mattila, 2006). FDM ile termal enerji depolamada kullanılan bazı ürünler Şekil 8'de uygulama alanları ise Tablo 10'de verilmiştir:



Şekil 8. Binalarda yapı malzemesi (a), bebek tulumu (b), sporcu yeleği (c), işlemcinin soğutulması (d), dizüstü bilgisayar soğutucu (e), gıda depolama (f), kan ünitesi (g), organ taşıma çantası (h)

Tablo 10. FDM kullanım alanları (Mazman, 2000; Özönur, 2004).

Kullanım alanı	Uygulama
Bilişim	Elektronik cihazların soğutulmasında, sıcaklığa duyarlı elemanların soğutulması (devre kartları, işlemci, gibi)
Çevre	Yapı malzemelerinde binaların ısıtma ve soğutma yükünün azaltılmasında, Fotovoltaik elementlerin soğutulması, Ev ısıtma ve sıcak su, seraların iklimlendirilmesi, buzdolapları
Otomotiv	Motorlu taşıtlar için ısı depolama sistemi
Tekstil	Sporcu kıyafetleri, bebek tulumları vb.
Gıda	Taze gıdaların depolanması
Tıp	Sağlık uygulamalarında kan numuneleri ve organ taşımacılığı, ilaç vb. saklama, ameliyat masaları
Uzay	Astronotların vücut ısılarının korunmasında (tekstil)

### 1.6. Literatür Araştırması

Enerji depolama sistemleri; depolama yöntemleri (mekanik, kimyasal, elektrik, biyoloji vb.) uygulama alanları (tıp, tekstil, çevre ) ve bünyelerindeki bileşenler aracılığıyla disiplinler arası bir çalışma konusu haline almıştır.

Çalışma kapsamında enerji depolama ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış; ancak bu bölümde çalışma konusuyla ilişkili olan araştırmalara (gizli ısı depolama) yer verilmiştir. İlgili araştırma ve araştırmacılar aşağıdaki gibidir;

Dietz (1984), bir dikdörtgen ısı depolama modülü içerisine belirli bir düzende düşey silindirik depolayıcılar yerleştirmiş, FDM olarak kalsiyum klörür heksahidrat kullanmış ve etrafından ITA olarak da hava geçirmiştir. FDM'nin şarj ve deşarjı sırasında elde edilen deneysel sonuçlara dayanılarak, ITA tipi, debi ve sıcaklığı, FDM tipi ve depo boyutlarına bağlı olarak tüplerin termal performansını önceden belirlemeyi sağlayacak basit bir matematiksel model geliştirmiştir.

Cao vd. (1991), silindirik yatay halka kesite sahip gizli ısı depolama sisteminde akış, ısı ve erime karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Geometride iç aralıktaki FDM bulunmakta, halka aralıktan ise ısı transfer akışkanı geçirilmektedir. FDM ve akışkan içerisindeki sıcaklık dağılımlarını Reynolds ve Stefan sayısına bağlı olarak elde



etmişlerdir. Sonuç olarak, kısa süreli etkin ısı depolama için, bu geometrinin kullanımının uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Akgün (1992), düşey silindirik depolayıcıya yerleştirilmiş kalsiyum klorür heksahidratın depolama performansına ısı transfer akışkanının farklı debi ve sıcaklıklarının etkilerini incelemiştir. Ayrıca, depo içerisindeki FDM'nin erime katılma davranışını gözlemiştir.

Choi ve Kim (1992), kanatçıklı düşey silindirik bir depoda magnezyum klorür heksa hidratın katılma davranışını incelemişlerdir. FDM ve tüp arasındaki ısı transfer katsayısının, kanatçıklı geometride kanatçiksıza göre 3,5 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, ısı performans üzerinde kanatçıklı geometride debinin, kanatçiksız geometride ise akışkan giriş sıcaklığının daha etkin olduğu göstermişlerdir.

Hasan (1994), stearik asitin erime davranışını, yatay ve düşey olarak konumlandırılmış silindirik depolayıcılarda deneysel olarak incelemiştir. Düşey konum için şarj ve deşarj sürelerinin daha kısa olduğunu ortaya koymuştur

Esen ve Ayhan (1996), Esen vd. (1998), bir silindirik ısı depolama modülü içerisine, belirli çap ve adetlerde silindirik depolayıcıların yerleştirildiği termal ısı depolama sisteminde erimedeki davranış teorik olarak (entalpi yöntemi) incelemişlerdir. Akışkan sıcaklığının, akışkan debisinin, silindir yarıçapının ve FDM tipinin erime davranış üzerindeki etkilerini sayısal olarak ortaya koymuşlardır.

Domansk vd. (1997), yatay olarak konumlandırılmış silindirik halka geometrideki faz değıştiren maddenin (eş eksenli durum) ergime sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. Stefan sayısındaki artışın doğal taşınımı daha etkin hale getirdiğini bulmuşlardır.

Zhang vd. (1997), yatay olarak konumlandırılmış eş eksenli olmayan halka geometrideki FDM'nin soğuma davranış sayısal olarak incelenmiştir. Eksen kaçıklığının katılma süresini artırdığını bulmuşlardır.

Ng vd. (1998), yatay olarak konumlandırılmış halka aralıklı silindirik bir depoda FDM 'nin (n-oktadekan) erime davranışını, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Rayleigh sayısına doğal taşınımın üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Artan Rayleigh sayısı ile erimenin hızlandığını ortaya koymuşlardır.

Khillarkar vd. (2000), saf bir FDM'nin erime sürecini, iki farklı konfigürasyona sahip eş merkezli yatay halka geometride (yatay kare tüp içerisinde silindirik halka aralık ve yatay dairesel tüp içerisinde kare halka aralık) sayısal olarak incelemişlerdir. Rayleigh

sayısının artışı ile doğal taşınımın iyileştiği ve erime sürecinin hızlandığını ortaya koymuşlardır.

Ismail vd. (2001), aksel kanatçıklar bulunduran düşey silindirik ısı depolama tankı içerisindeki parafinin katılma davranışını deneysel ve teorik (entalpi yöntemi) olarak incelemişlerdir. Kanatçık sayısı, uzunluğu ve kalınlığının, süper ısıtmanın ve halka boşluğun boyut oranının, depolanan toplam enerji, katılmış kütle parçası ve tamamen katılma için geçen zaman üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Kanatçık sayısı ve kanatçık uzunluğunun deşarj süresini kısaltmasında önemli bir etkiye sahipken, kanatçık kalınlığının önemli bir etkisinin olmadığı ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, deneysel ve sayısal sonuçların uyum içinde olduğunu görmüşlerdir.

Lamberg vd. (2003), dikdörtgen kesite sahip bir kanaldaki FDM'nin erime/katılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanatlı ve kanatsız durum için çalışma yapılmıştır. Doğal taşınımın erime sürecini hızlandığını belirtmişlerdir.

Stritih (2003), dikdörtgen kesitli bir kanaldaki FDM'nin erime/katılma davranışını (kanatlı ve kanatsız durum) deneysel olarak incelemiştir. Kanat ilavesinin, katılma süresini azalttığı gözlenirken diğer taraftan doğal taşınım etkisini azaltması sebebiyle erime süresini artırdığı gözlenmiştir.

Trp (2005), düşey olarak konumlandırılmış ve içerisinde birden fazla ısı transfer borusunun bulunduğu silindirik kabuk içerisindeki FDM'nin, erime/katılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu ortaya koymuşlardır.

Akgün vd. (2007), halka aralık düşey geometri içindeki FDM'nin (dokasane) erime/katılma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Depo dış kabuk geometrisinin, ısı transfer akışkan sıcaklığının ve debisinin katı/sıvı ara yüzeyine olan etkisini araştırmışlardır.

Aydın vd. (2007), düşey halka aralık kesit geometrisinin FDM'nin (dokasane) erime/katılma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı depo dış kabuk açılarındaki yapılan deneyler sonucu en uygun geometri ortaya konularak optimizasyon yapmışlardır. Isı transfer akışkan sıcaklığının ve debisinin etkisi de araştırılmıştır.

Akgün vd. (2007), halka aralık düşey geometri içerisindeki FDM'nin, erime/katılma davranışını farklı akışkan giriş sıcaklığında ve debisinde incelemişlerdir. Artan akışkan giriş sıcaklığında erime süresinin kısaltıldığı, debinin ise erime sürecinde etkisinin olmadığı ortaya koymuşlardır.

Akgün vd. (2008), düşey halka kesit geometrideki FDM'nin erime/katılma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak üç farklı FDM kullanılmış olup farklı akışkan giriş sıcaklıklarında ve debilerinde deneyler yapmışlardır. Reynolds ve Stefan sayılarının erime/katılma davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır.

Dutta vd. (2008), yatay olarak konumlandırılmış halka kesit geometri içerisindeki FDM'nin erime davranışını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Deneysel kısımda sadece eş merkez için erime davranışı incelenirken sayısal bölümde ise farklı bir eksen kaçıklığı (açısal eksen kaçıklığı) için erime sürecini araştırmışlardır.

Tan vd. (2009), küresel kapsül içerisinde bulunan FDM'de erime sürecinde meydana gelen doğal taşınım mekanizmasını incelemiştir.

Darzi vd. (2012), yatay olarak konumlandırılmış halka kesit içerisindeki FDM'nin erime sürecini farklı depo geometrileri (kaçık eksen) için sayısal olarak incelemiştir. Artan eksen kaçıklığına bağlı olarak erime hızının arttığını bulmuşlardır.

Lipnicki vd. (2012), düşey halka aralık geometri içerisindeki FDM'nin (su) doğal katılma sürecini ve doğal taşınım mekanizmasının etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir.

Yapılan çalışmalar Tablo 11'de ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 11. Yapılan çalışmalar

Yazar	FDM	Depo geometrisi	İnceleme konusu	Bulgular
Dietz (1984)	Kalsiyum klorür heksahidrat	Dikdörtgen kesitli depo	ITA tipi, debisi ve sıcaklığı ile FDM tipi ve depo boyutlarına bağlı olarak tüplerin termal performansı	Termal performansını önceden belirlemeyi sağlayacak basit bir matematiksel model geliştirmiştir
Cao vd. (1991)	Lityum hidrür (LiH)	Yatay silindirik halka kesit	FDM ve akışkan içerisindeki sıcaklık dağılımları (Reynolds ve Stefan sayısına bağlı olarak).	Kısa süreli etkin ısı depolama için, bu geometrinin kullanımının uygun olduğunu belirlemişlerdir.
Choi ve Kim (1992)	Magnezyum klorür heksahidratın ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )	Düşey silindirik depo	Depo dış çapı, akışkan debisi, akışkan giriş sıcaklığı ve kanatçık durumunun sistem performansına etkileri	FDM ve tüp arasındaki ısı transfer katsayısının, kanatçıklı tip için kanatçiksıza göre 3.5 kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte ısı performansını kanatçıklı tipte debi etkilerken, kanatçiksız tipte akışkan sıcaklığı daha etkin olduğu belirtmişlerdir.
Hasan (1994)	Stearikasitin	Düşey ve yatay silindirik depo	Depo konumu etkisi	Düşey konum için şarj ve deşarj sürelerinin daha kısa olduğunu ortaya koymuştur
Domansk vd. (1997)	n-octadecan	yatay silindirik depo	Ergime süreci ve doğal taşınım etkisi (deneysel olarak)	Stefan sayısındaki artışın doğal taşınımı daha etkin hale getirdiği görülmüştür.
Zhang vd.(1997)	-	yatay silindirik depo (kaçık eksen)	Eksen kaçıklığının FDM'nin soğuma davranışına etkisi (sayısal olarak)	Eksen kaçıklığının soğuma davranışını kötüleştirdiği görülmüştür.
Ng vd. (1998)	n-oktadekan	yatay silindirik depo	Rayleigh sayısına bağlı olarak doğal taşınımın etkisi	Artan Rayleigh sayısı ile erimenin hızlandığı görülmüştür. Yerel ısı transferinin erimiş maddenin akış şekline bağlı olduğu gösterilmiştir.
Khillarkar vd.(2000)	n-oktadekan	Farklı iki konfigürasyon için yatay halka geometri	Rayleigh sayısının etkisi	Artan Rayleigh sayısı ile ısı transferi iyileşmiştir.

Tablo 11'in devamı

Yazar	FDM	Depo geometrisi	İnceleme konusu	Bulgular
Stritih ( 2003 )	Parafin (ergime noktası: 30 °C)	Dikdörtgen kesitli depo	Kanatçığin olduğu ve olmadığı durum için erime/katılma davranışı incelenmiştir.	Kanat ilavesinin katılmaı iyileştirdiği görülrken; erimde ise kanatlar doğal taşınım etkisini azalttığı için kötüleşme meydana gelmiştir
Akgün vd.(2007)	Saf parafin (Dokosane)	Düşey silindirik depo	Erime/ katılma sürecine, depo dış kabuk geometrisinin, ısı transfer akışkanın sıcaklık ve, debisinin etkisi.	Akışkan giriş sıcaklığındaki artış, erime süresini kısaltmıştır. Debinin ise etkisi olmadığı görülmüştür.
Aydın vd. (2007)	Saf parafin (Dokosane)	Düşey silindirik depo	Depo dış kabuk geometrisinin etkisi	Depo kabuk açısına bağlı olarak erime süresindeki değişim ortaya konmuştur. En kısa erime süresi 5°'lik eğikliğe sahip depo için elde edilmiştir.
Akgün vd. (2007)	Saf parafin (Dokosane)	Düşey silindirik depo	Akışkan giriş sıcaklığına ve debisinin erime/katılma davranışına etkisi	Akışkan giriş sıcaklığındaki artış erime süresini kısaltırken debinin ihmal edilecek bir etkisi olduğu ortaya konmuştur.
Akgün vd.(2008)	Saf parafin (dokosane, trikosane, hezacosane)	Düşey silindirik depo	Reynolds ve Stefan sayılarının erime/katılma üzerindeki etkisi	Reynolds sayısının önemli etkisinin olmadığı gözlenirken, artan Stefan sayısı ile erime süresinin kıaldığı görülmüştür.
Dutta vd.(2008)	Parafin wax	yatay silindirik depo	Erime sürecinde açılal eksen kaçıklığının etkisi (sayısal olarak)	Eksen kaçıklığının, sıvı faz hareketinde ve ısı akısı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur
Tan vd. (2009)	n-oktadekan	küresel kapsül	Erime sürecindeki Doğal taşınım mekanizması incelenmiştir	Erime sürecindeki etkin mekanizmanın doğal taşınım olduğu görülmüştür
Darzi vd.(2012)	n-eicosane	yatay silindirik depo	Eksen kaçıklığının erime sürecine etkisi sayısal olarak incelenmiştir.	Eksen kaçıklığındaki artış ile erime hızının arttığı görülmüştür.
Lipnicki vd.(2012)	su	Düşey silindirik depo	Düzensiz katılma davranışı	Katılma sürecinde soğuk bölge ile katılmalan bölge arasındaki temas yüzeyinin önemi ortaya konmuştur.

### 1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Günümüzde bütün modern enerji sistemleri, arz güvenilirliği (süreklilik), sistem kararlılığı enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması iletim/dağıtım problemlerinin ve maliyetlerinin en aza indirilmesi gibi birçok nedenlerle enerjinin depolanmasını zorunlu kılar. Bu sebeple, enerji depolama sistemleri endüstrisi yeni, önemli ve tüm dünyada hızla gelişmekte olan bir endüstri seçeneğidir (Tutuş, 2012).

Termal enerji depolama sistemlerinde en önemli unsur; var olan ısının en kısa sürede depolanabilmesi/geri kazanılabilmesidir. Bu ise, ısı transferinin iyileştirilmesine bağlıdır. FDM'in genellikle kötü bir ısı iletkeni olduğu hatırlanacak olursa, bu durumu ortadan kaldırmak için iki yöntem uygulanmaktadır: sisteme enerji girişinin olduğu aktif yöntem ve ek bir enerji ilavesi olmaksızın geometrik düzenlemeler ile ısı transferinin iyileştirildiği pasif yöntem.

Isı transfer çalışmalarında, katı bir ortamla akışkan arasındaki ısı transferi Newton soğuma yasası;

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

kullanılarak belirlenir.

İlgili yasa gereğince, ısı transferinin arttırılabilmesi için toplam ısı transfer katsayısının, ısı transfer yüzey alanının veya sıcaklık farkının arttırılması gerekmektedir. Sıcaklık farkının sınırlı olduğu düşünülecek olursa, ısı transferini arttırmanın en pratik yolu toplam ısı transfer katsayısının veya ısı transfer yüzey alanının arttırılmasıdır. Isı taşınım katsayısının arttırılması, ısı transfer boru geometrisi ve konumunun ve dış kabuk geometrisinin değiştirilmesiyle sağlanır. Isı transfer yüzey alanının arttırılması ise kanatçık ilavesi veya ısı transfer borusunun çapının arttırılması gibi düzenlemelerle sağlanır. Bu düzenlemeler transfer edilen ısı miktarını önemli düzeyde arttırmakta iken, sabit bir depo hacmi için kullanılacak FDM miktarını ve sıvı faz bölgesindeki akışkan hareketini azaltmaktadır. Isı taşınım katsayısının akışkan alanının bir fonksiyonu olduğu hatırlanacak olursa, yukarıda bahsedilen düzenlemelerin doğal taşınım etkisini azaltacağı bir başka ifadeyle taşınımla transfer edilen ısı miktarını azaltacağı açıktır.

İlgili literatür dikkatle incelendiğinde, FDM ile ısı depolama çalışmalarında ısı transfer yüzey alanının artırılması üzerine yoğunlaşmış ve doğal taşınımın iyileştirilmesine yönelik pasif yöntem içeren detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatürde, konuyla ilgili olarak düşey konumlandırılmış depolar üzerine yapılan çalışmaların fazlalığı dikkat çekmektedir. Yatay depo konumundaki çalışmaların azlığı ise üç boyutlu geometri modellemenin karmaşıklığından kaynaklanmaktadır. Düşey depo geometrisinde ise iki boyutlu geometrik model ile katı/sıvı ara yüzey çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca, literatürdeki mevcut sayısal çalışmalara karşın deneysel çalışmalarında sınırlı olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmaların az olması sayısal çalışmaların varlığını da kısıtlamaktadır.

Yapılan çalışma, bu alandaki eksikliklerin giderilmesine yönelik veriler üretmeyi amaçlayan deneysel bir çalışmadan oluşmaktadır. Bu tez kapsamında, FDM ile ısı depolamada (sabit yüzey alanı) geometrik düzenlemelere gidilerek pasif bir yöntem uygulanmıştır. Yatay olarak konumlandırılan depo geometrisinde, ısı transfer borusunun konumu (eksen kaçıklığı,  $e$ ) değişken parametre olarak seçilmiştir. Depo hacmi sabit tutulmak şartıyla eş merkez ( $e=0$  mm) ve üç farklı eksen kaçıklığı ( $e=10, 20, 30$  mm) durumunda ve farklı akışkan giriş sıcaklıklarında erime/katılaşma deneyleri yapılmıştır. Isı deposunun uzunluğu boyunca çevresel olarak farklı istasyonlarda sıcaklık taramaları yapılmış ve şarj /deşarj süreçlerine ait optimum depo geometrileri belirlenmiştir. Bu çalışma ile farklı depo geometrilerinde ve akışkan giriş sıcaklıklarında doğal taşınımın etkisi ve FDM'nin katı-sıvı bölgelerinin gelişimi kapsamlı olarak incelenmiştir. Literatürde bu pasif yöntemin ilk kez detaylı olarak incelendiği vurgulanmalıdır. Elde edilen verilerin bundan sonraki sayısal çalışmalar için bir referans teşkil edeceği de belirtilmelidir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, yatay olarak konumlandırılan halka aralığındaki FDM'nin erime (şarj) ve katılma (deşarj) süreçlerine ait ısı depolama ve geri kazanım karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Halka aralığı (depo geometrisi) iç içe geçmiş, her biri dairesel forma sahip, bir dış gövde ve 4 farklı eksen konumuna sahip (eş merkez,  $e=0$  mm ve kaçık merkez,  $e=10, 20, 30$  mm) ısı transfer borusundan meydana gelmektedir. Akgün vd., 2007, yapmış oldukları çalışmada debinin, erime/katılma süresi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu sebeple her bir geometrik konfigürasyon için sabit hacimsel debide ( $Q=280$  l/h) deneyler yapılmıştır. Akışkan giriş sıcaklığının belirlenmesinde ise şu faktörler dikkate alınmıştır: ITA'nın, FDM'nin erime/katılma sıcaklığına yakın olması ısı depolama/geri kazanım sürelerini ve depodan olan kayıplarını önemli oranda arttırırken, erime/katılma sıcaklığından çok yüksek olması ise depolama kayıplarını arttırmaktadır. Dolayısıyla uygun akışkan giriş sıcaklıklarının seçilmesi ısı depolama/geri kazanımı sistemlerinin tasarımında oldukça önemlidir. Bu paralelde, her bir depo geometrisi için farklı akışkan giriş sıcaklıklarında (şarj süreci için  $T_{ag}=75, 80, 85^{\circ}C$ ;deşarj süreci için,  $T_{ag}=20, 25, 30^{\circ}C$ ) deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel olarak halka aralığına farklı mesafe ve açılarla yerleştirilen termoeleman çiftleri sayesinde depo içerisindeki sıcaklık alanları zaman bağımlı olarak elde edilmiştir. Buna bağlı olarak eksen kaçıklığının ve akışkan giriş sıcaklığının her bir süreç için etkisi irdelenmiştir.

### 2.1. Deney Düzenegi ve Çalışma Prensipleri

Depo geometrisinin ısı depolama/geri kazanımı performansı üzerindeki etkisini incelemeye yönelik tasarlanan deney düzeneginin fotoğrafı, Şekil 9'da verilmiştir. Deney düzenegi ana hatlarıyla üç bölüme ayrılmıştır: şartlandırma bölgesi, by-pass bölgesi ve test bölgesi. Her bir bölge fonksiyonuna ait detaylı bilgi aşağıdaki gibidir. Şekil 10b'den görüldüğü gibi sistem bir taşıyıcı gövde üzerine monte edilmiştir. Ana bileşen olarak 40 mm'lik PP-R kompozit boru, izolasyon malzemesi, küresel vanalar ve bağlantı elemanlarında oluşmaktadır

Şartlandırma bölgesi: Isı transfer akışkanı (ITA) debisinin ve test bölgesi giriş sıcaklığının istenen değere ayarlandığı bölgedir (Şekil 10a). Sabit sıcaklık banyosu, rotametre, bağlantı



elemanları ve küresel vanadan oluşmaktadır. İlgili cihazlara ait özellikler Tablo 12’de verilmiştir.

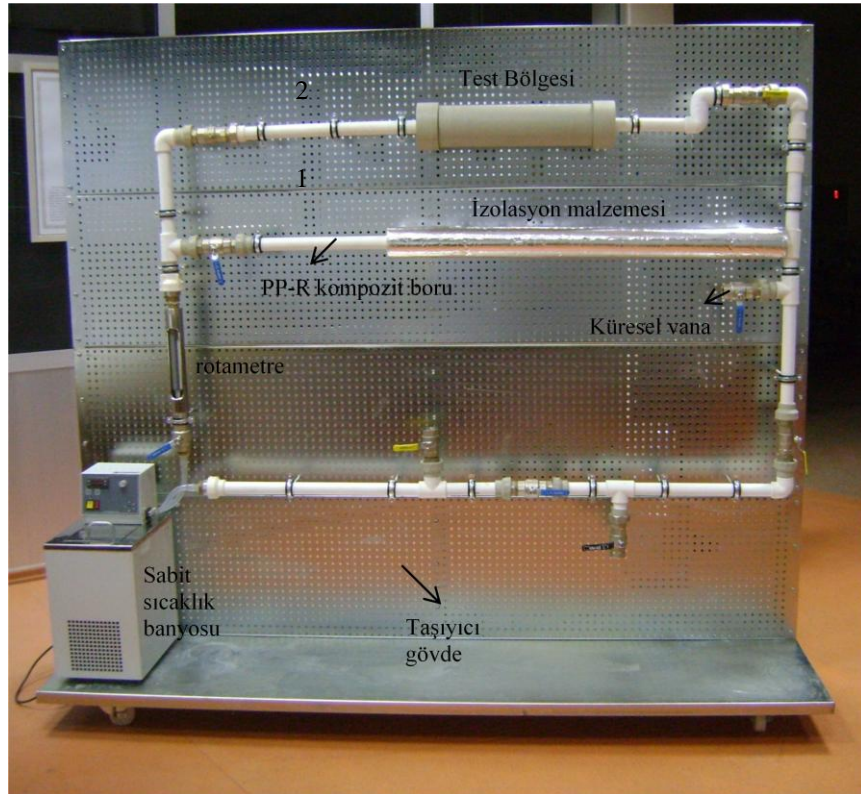
by-pass bölgesi: Isı transfer akışkanının test bölgesine yönlendirilmeden önce şartlandırma işleminin gerçekleştirildiği (istenilen sıcaklık değerine ulaştırıldığı) bölgedir (Şekil 10b). by-pass bölgesi ayrıca ek ısıtıcı ve pompa ilavesine cevap verebilecek şekilde iki harici çıkışa sahiptir.

Test bölgesi: Isıl enerjinin depolandığı/geri kazanıldığı bölgedir. Detaylı bilgi ilgili başlıklar altında verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen üç ana bölge paslanmaz çelik malzemeden yapılmış taşıyıcı bir çelik gövde üzerine monte edilmiştir.

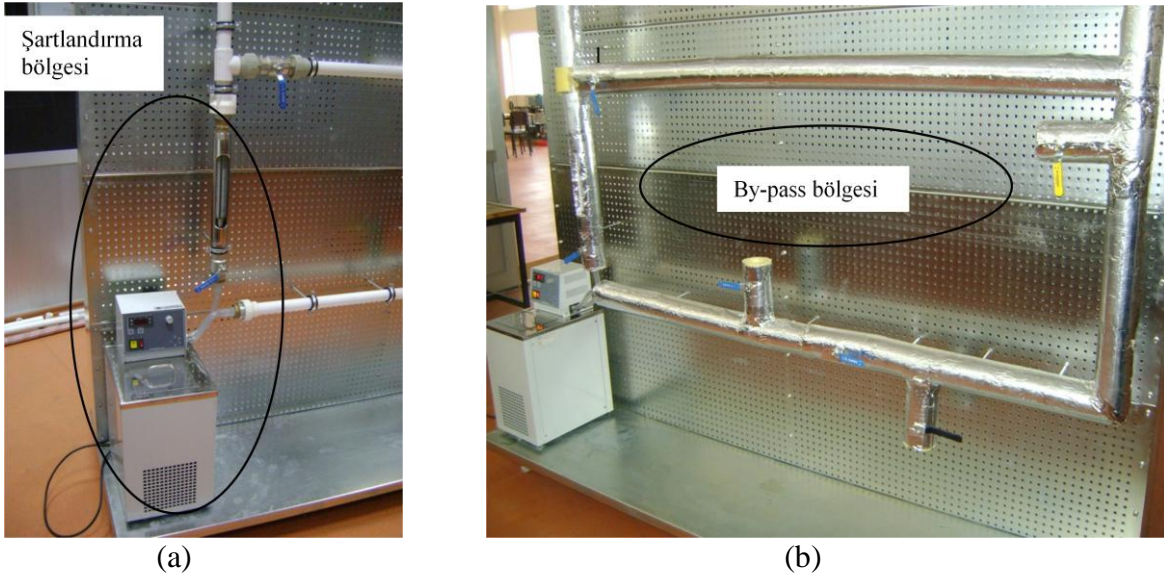


(a)



(b)

Şekil 9. Deneý düzeneğinin genel görünüşü: izolasyonu yapılmış (a), yapılmamış (b)



Şekil 10. Deney düzeneğinin bölümleri: şartlandırma bölgesi (a), by-pass bölgesi (b)

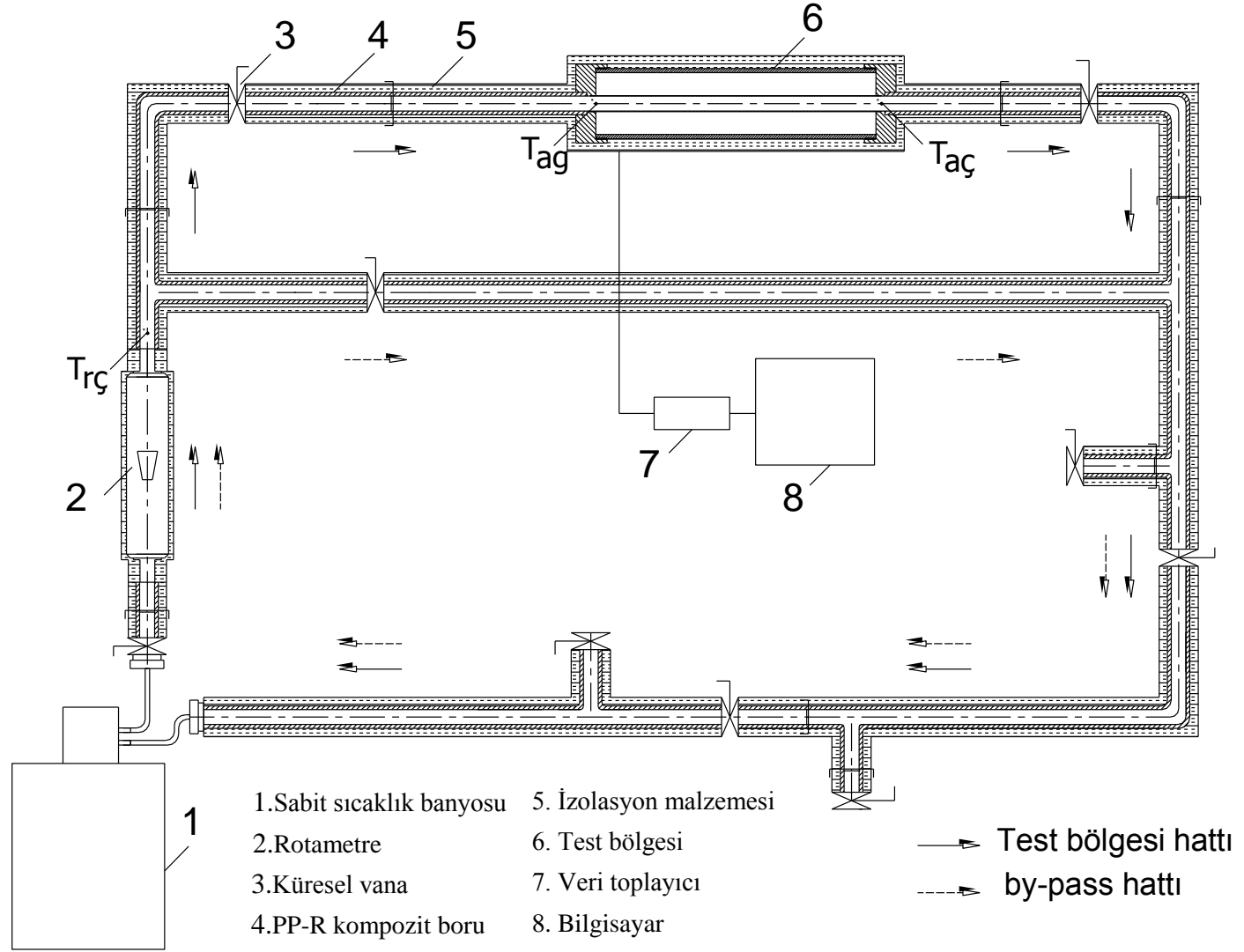
Deney düzeneğinin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir: sabit sıcaklık banyosunda istenilen sıcaklık değerine ayarlanan ısı transfer akışkanı (ITA ) sırasıyla küresel vanayla debisi kontrol edilen bir rotametreden geçirilerek by-pass hattına (bölgesine) ulaştırılmaktadır. ITA'nın by-pass hattında izlediği yol Şekil 11'de kesikli ok ile gösterilmiştir. İstenilen çıkış sıcaklığına ulaşan ITA "1 nolu" vananın kapatılıp ve "2 nolu" vananın açılmasıyla test hattına yönlendirilir (Şekil 9b). Benzer şekilde ITA'nın test bölgesi boyunca izlediği yol Şekil 11'de düz ok ile gösterilmiştir. İlgili hat üzerinde ısı transferini gerçekleştiren ITA, tekrar sabit sıcaklık banyosuna dönerek aldığı/verdiği ısıyı sırasıyla vererek/alarak tekrar test bölgesi üzerinden kapalı döngüsüne devam eder. Ana devre, yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımına sahip PPR-C boru malzemenen oluşmaktadır. Ana devre elemanları (PP-R kompozit boru: 1,10 W/m.K) ve test bölgesi ısı kaybının en aza indirgenmesi için 30 mm kalınlığında uygun olan cam yünü (boru ve levha tipi) ile yalıtılmıştır (Şekil 9a).

Isı depolama karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen deneylerde, hacimsel debi ve sıcaklık olmak üzere iki ana ölçüm yapılmıştır. Hacimsel debi ölçümleri akış hattı üzerinde yer alan standart tip bir rotametre ile gerçekleştirilmiştir (Tablo 12).

Isı depolama deneylerinde ana çıkışı sıcaklık ölçümleri oluşturmaktadır. Sıcaklık ölçümleri, eş merkez ( $e = 0$  mm) ve kaçık merkez geometrileri ( $e=10, 20, 30$  mm) için akış hattı üzerinde 3 yerel istasyonda (ITA test bölgesi giriş,  $T_{ag}$ , çıkış,  $T_{aç}$  ve ITA rotametre çıkış,  $T_{rc}$  sıcaklığı) ve test bölgesi içerisinde 25 yerel istasyonda T-tipi (bakır-konstantan)

teflon izoleli termoeleman çiftiyle zaman bağımlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan termoeleman çiftleri 0,01 inç çapında olup hassasiyeti 0,02°C'dir Akış hattı üzerine yerleştirilen termoeleman konumları Şekil 11'de gösterilmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde, Keithley 2700 integra serisi veri derleme cihazı ve Keithley7702 model 40 kanallı bir veri kartı kullanılmıştır (Şekil 9a). Veri kartı "cold junction" özelliğine sahip olup harici bir referans sıcaklığını gerektirmemektedir. Ölçümlerde kanallar arası geçiş süresi 0,2 s ve ölçümler arası geçiş süresi 60 s olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin çevreden etkilenmemesi/en aza indirgenmesi için veri toplayıcı cihazı ara yüzeyinden filtreleme (window=10, filter=8) işlemi uygulanmıştır. Elde edilen sıcaklık verileri ölçüm cihazının "XLINX Start up" ara yüzeyinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. İlgili ara yüz aynı anda zaman bağımlı olarak sıcaklık değişimlerini grafiksel formda verebilme özelliğine sahiptir. Bu özellik sayesinde eş zamanlı olarak FDM içerisindeki farklı yerel istasyonlar ve yerel akışkan sıcaklık değişimleri belirlenebilmektedir. Çalışmada kullanılan her bir termoeleman çifti sabit sıcaklık banyosuna (kalibrasyon banyosu) daldırılarak kalibre edilmiş ve sapmaların 0,1°C mertebesinde olduğu belirlenmiştir.



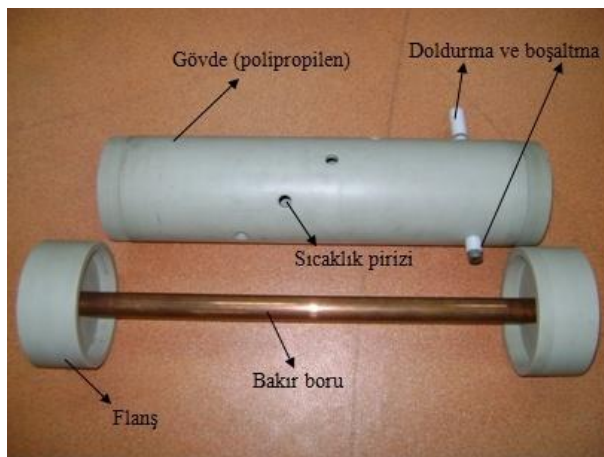
Şekil 11. Deneysel düzeneğin şematik görünüşü

Tablo 12. Kullanılan cihazların özellikleri

Ölçüm cihazı	Cihaz kodu/Ürün	Ölçüm aralığı	Hassasiyeti
Sabit sıcaklı banyosu	Labo DX-300 Dijital PID kontrol	-20÷+100°C	±0,03°C
Veri toplayıcı/ veri kartı	2700 integra serisi/ 7701 40 kanallı	-200÷+1820°C	0,001°C
Rotametre	Y-G10-25 /Cam tüp debimetre/ paslanmaz çelik	40÷400 l/h	±0,05 l/dk

## 2.2. Test Bölgesi

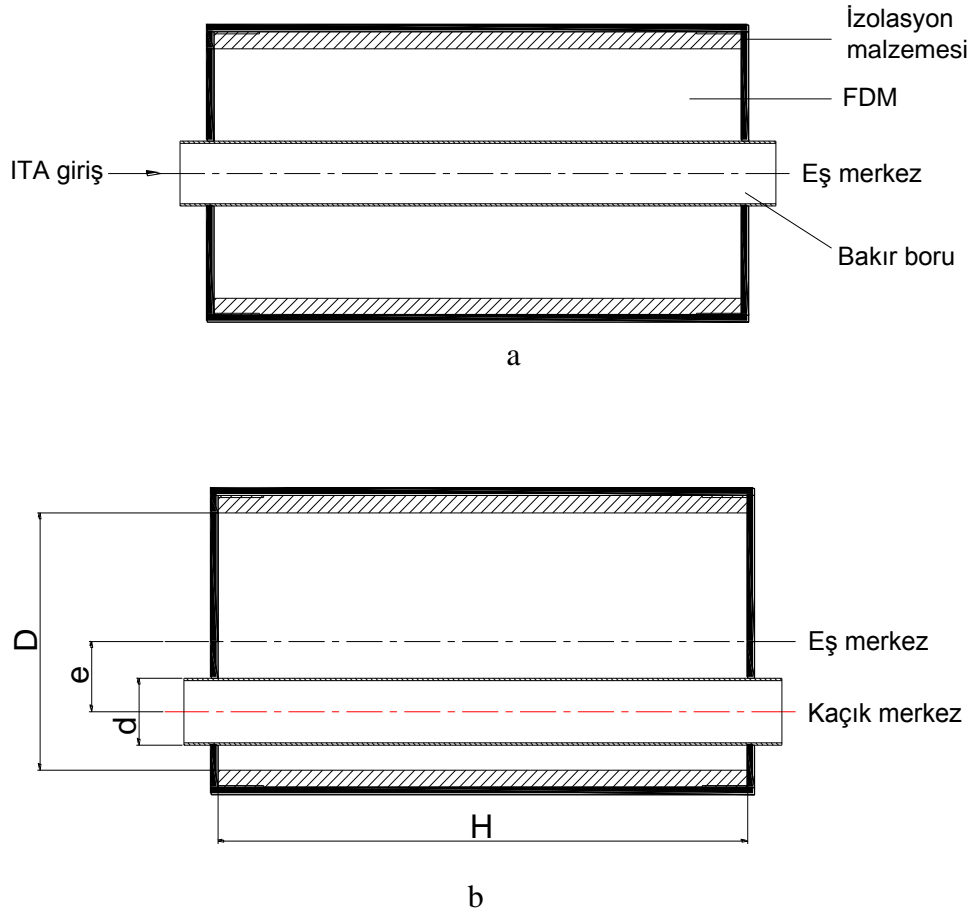
Test bölgesi, 2 adet flanş, ısı transfer borusu ve gövde olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır (Şekil 12). Test ünitesi modüler bir yapıya sahip olup montaj ve demontaj işlemleri rahatlıkla yapılabilir. Test bölgesi, halka aralık (depo geometrisi) iç içe geçmiş, her biri dairesel forma sahip, bir dış gövde ve 4 farklı eksen konumuna sahip (eş merkez,  $e=0$  mm ve kaçık merkez,  $e=10, 20, 30$  mm) ısı transfer borusundan meydana gelmektedir. FDM bu iki bileşen arasındaki kapalı hacimde depolanmaktadır. Isı transfer borusu ısı iletim katsayısı yüksek olan bakır malzemeden ( $394 \text{ W/mK}$ ) üretilmiştir. Flanşlar ve gövde ise ısı iletim katsayısı düşük olan standart PP malzemeden ( $0.20 \text{ W/mK}$  polipropilen) üretilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Test bölgesi bileşenleri

Bu çalışmada etkisi incelenen ana parametre, ısı transfer borusunun değişken konumunu ifade eden eksen kaçıklığının ( $e$ ) şarj ve deşarj süreçlerine etkisidir. Bu amaçla

tasarlanan ve üretilen eş merkez ve üç farklı kaçık merkez konumuna sahip test bölgesine ait şematik resimler ve geometrik parametreler sırasıyla Şekil 13’de ve Tablo 13’de verilmiştir. Burada, eş ve kaçık merkezli test bölgelerine ait ısı transfer alanları ve depo hacimlerinin aynı olduğu vurgulanmalıdır. Bu düzenleme, ısı transfer yüzey alanını artırmaksızın aynı miktardaki FDM’nin erime ve katılaşma davranışını incelemeye imkân sağlamaktadır (pasif iyileştirme).



Şekil 13. FDM deposu; eş eksen (a), kaçık eksen(b)

Isı deposu ana bileşenlerinin imalatı özel tezgâhlarda (kalıpcı freze tezgahı) yapılmıştır. Flanşların depoya montajı vidalı birleştirme ile gerçekleştirilmiştir. Bakır boru ve PP-R kompozit boruların flanşlara bağlantısı O-ring contaların yer aldığı sıkı geçme yöntemi ile sağlanmıştır.

Tablo 13. Isı deposuna ait geometrik parametreler

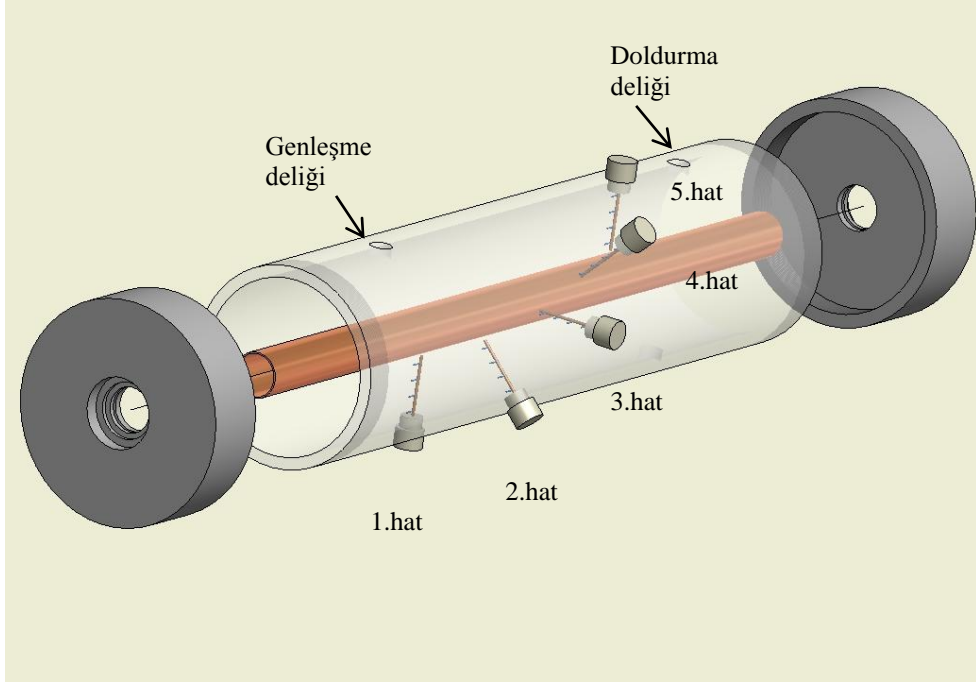
Depo yüksekliği H(mm)	Depo çapı, D(mm)	Isı transfer borusu, d(mm)	Eksen kaçıklığı, e (mm)
500	110	28,5	0
			10
			20
			30

Test bölgesi giriş ve çıkışında olmak üzere iki yerel istasyonda ve ısı deposunda ( $e=0$  mm), 25 yerel istasyonda sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Isı deposu içerisinde yer alan sıcaklık ölçüm noktaları eş merkez ( $e = 0$  mm) durumu için Şekil 14’de ise üç boyutlu, Şekil 15’de ise iki boyutlu olarak verilmektedir. Şekil 14’de görüldüğü üzere ısı deposu boyunca  $45^\circ$ ’lik açılarla çevresel doğrultuda 5 farklı hat boyunca radyal yönde sıcaklık taraması yapılmıştır. İlgili geometrik düzenlemede  $\Theta=0^\circ$  “1 nolu” hattı,  $\Theta = 180^\circ$  ise “5 nolu” hattı göstermektedir. Radyal doğrultuda termoelemanlar arası mesafe 10 mm olup; bu mesafelere bütün eksen kaçıklıklarında bağlı kalınmıştır (Tablo 14). Burada termoelemanların FDM hareketini engellemeleri için ise her bir hat eksenel mesafede (x) 50 mm kaydırıldığı vurgulanmalıdır (Şekil 15).

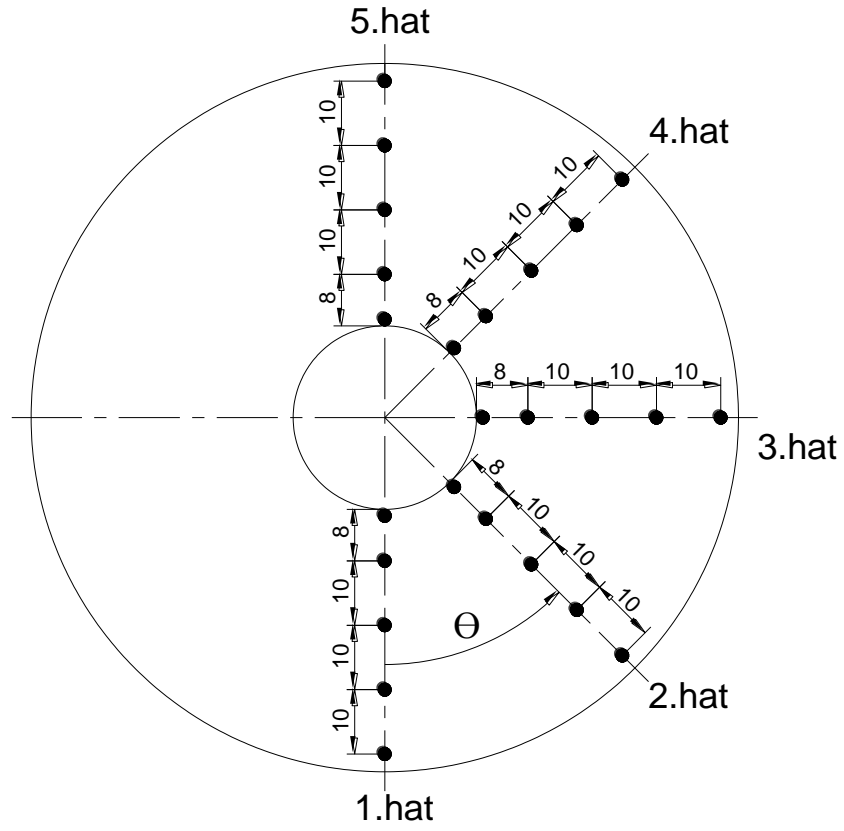
Tablo 14. Termoelemanların birbirlerine göre konumu

Hat	Çevresel konum, $\Theta$	Eksenel uzaklık, x [mm]
1.hat	$0^\circ$	150
2.hat	$45^\circ$	200
3.hat	$90^\circ$	250
4.hat	$135^\circ$	300
5.hat	$180^\circ$	350



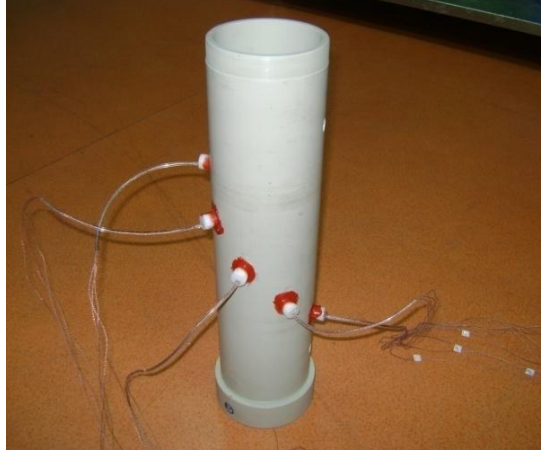


Şekil 14. Termoelemanların test bölgesindeki yerleşimi, eş merkezli durum



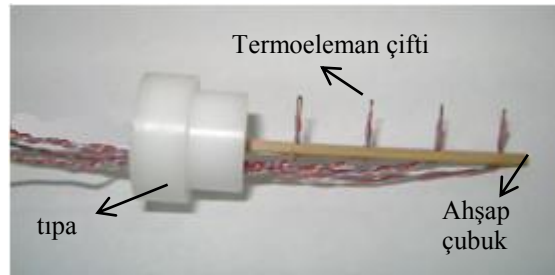
Şekil 15. Termoeleman yerleşimi (eş merkez)

Her bir depo geometrisi için, bakır boru referans alınmak üzere; gövde üzerine 45°'lik açılarla yerleştirilen sıcaklık prizleri, Şekil 16'da ve ölçüm probu Şekil 17'de görülmektedir. Benzer şekilde, ısı transfer borusu üzerine de yüzey sıcaklığının belirlenmesine yönelik yukarıdaki tanımlı hatlara uygun olarak termoeleman çiftleri monte edilmiştir.



Şekil 16. Sıcaklık prizlerine ait montaj resmi

Ölçüm probu, delrin malzeme üzerinde dikey olarak konumlandırılmış 3 mm çapında bir ahşap çubuktan oluşturulmuştur. İlgili çubuk üzerine 1 mm'lik delikler açılarak termoeleman çiftleri yerleştirilmiş ve özel yapıştırıcılarla sabitlenmiştir. Her bir hat için farklı boya sahip (farklı eksen kaçıklıkları) ölçüm problemleri 300°C'ye dayanıklı sıvı conta kullanılarak dış gövde üzerine açılan deliklere monte edilmiştir.

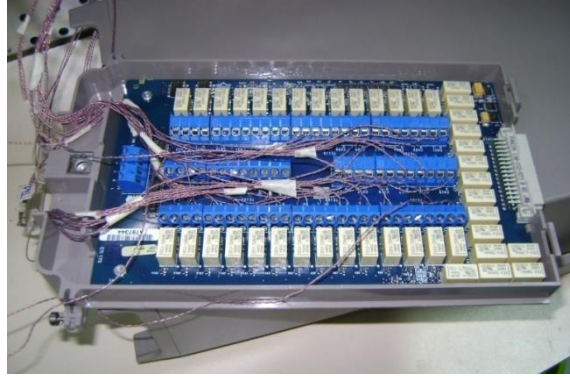


Şekil 17. Termoeleman bağlantı yapısı

Deneylere başlamadan önce harici bir kap içerisinde kullanılan FDM'nin elektriksel iletkenliği kontrol edilmiş ve FDM'nin iletken olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle

termoeleman çifti uçları üzerine elektriksel iletkenliği yok edecek herhangi bir yalıtım malzemesiyle kaplanmamıştır.

Akış hattı üzerinde ve ısı deposu içerisinde yer alan bütün termoeleman çiftlerinden elde edilen veriler 40 kanallı bir veri derleme kartı üzerinden (Şekil 18) bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 18. Termoelemanların veri kaydediciye bağlantısı

FDM'nin ısı deposuna doldurulması ve boşaltılmasını sağlamak üzere  $\Theta = 0^\circ$  ve  $\Theta = 180^\circ$ 'lik konumlarda iki adet 14 mm çapında delik açılmıştır. Deneysel çalışmada erime sıcaklığı  $56-58^\circ\text{C}$  olan saf parafin (hexacosane) kullanılmıştır (Şekil 19). Tablo 15'de parafine ait özellikler verilmiştir.

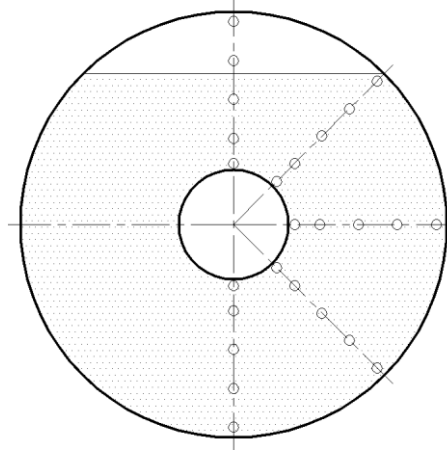


Şekil 19. Çalışmada kullanılan parafin

Tablo 15. Kullanılan parafinin termofiziksel özellikleri

Özellikler	Isı depolama malzemesi
Üretici firma/kodu	Merck/107337
Ürün adı	Hexacosane
Erime sıcaklığı	56-58 °C
Erime gizli ısısı	250 kJ/kg
Yoğunluk	880 (30°C) – 762 (80 °C)
Özgül ısı	1,84 (30°C) 2,37 (80 °C)
Mol ağırlığı	366 kmol
Alevlenme sıcaklığı	350 °C

Çalışmada kullanılan FDM miktarı, 80°C sıcaklığındaki sıvı parafin referans alınarak 3.300 kg olarak belirlenmiştir. İlgili çalışma sıcaklıkları dikkate alınarak katı fazdaki doluluk oranı, Şekil 20’de verilmektedir. Burada “5.hat” üzerindeki dış cidara yakın iki termoelemanın erime ve katılaşma süreci boyunca parafin sıcaklığını algılayamadıkları görülmektedir. Bu durum irdeleme bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 20. Katı faz doluluk oranı

Katı-sıvı faz geçişi esnasında meydana gelen hacimsel genişleme, enerji depolama çalışmalarında bazı problemlere neden olmaktadır. Erimenin ilk olarak bakır boru çevresinde meydana gelmesi ve eriyen FDM’nin belirli bir bölge içerisinde sınırlandırılması, test bölgesi içinde aksel doğrultuda yüksek basınçlara neden olmakta

ve sızdırma problemini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, ilgili olumsuzlukları önlemek için test bölgesinin girişinde 6x300 mm boyutlarında bir genleşme borusu kullanılmıştır. Genleşme borusu malzemesi pleksiglas olup; düşük ısıl iletkenliğe (0.19 W/mK) sahiptir. Genleşme borusunun bakır boru yüzeyine oturacağı bölgelerde FDM'nin kolay akışını sağlamak için farklı boyutlarda delikler açılmıştır. Ayrıca, boru üzerinde genişleyen FDM'nin test bölgesi içerisinde kalmasını sağlamak için kanallar açılmıştır. Burada genişleyen hacmin ısı deposu dışına alınmadığı vurgulanmalıdır.

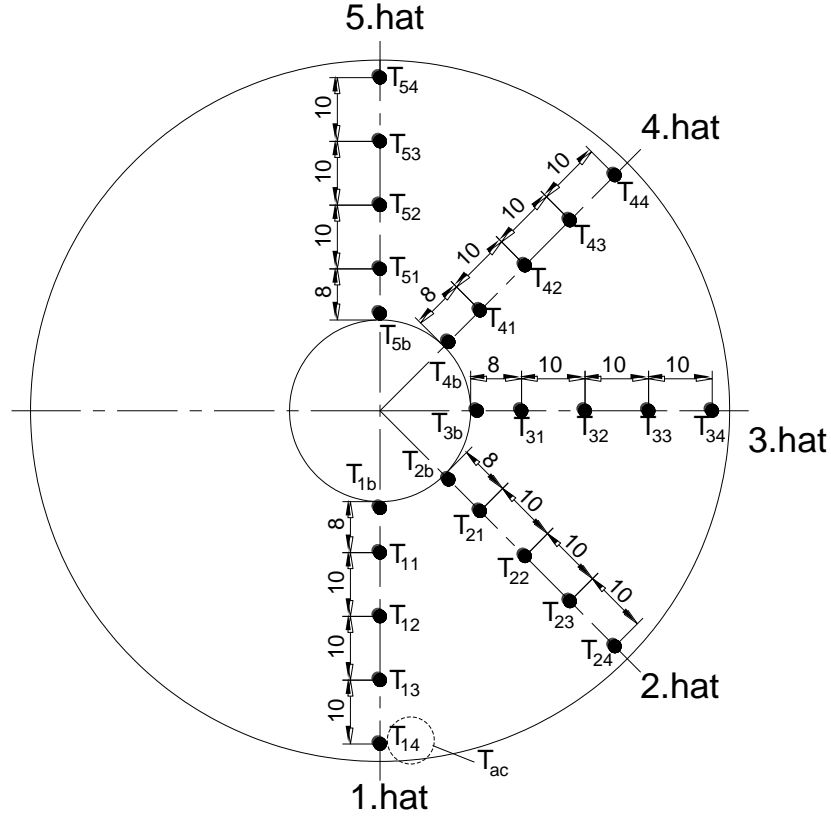
### 2.2.1. Deneilerin Yapılışı

Isı depolama/geri kazanım performansının incelenmesi amacıyla dört farklı ısı depolama geometrisinde ( $e = 0,10,20,30$  mm) deneyler yapılmıştır. Deneylerde FDM'nin hem erime hem de katılaşma davranışları incelenmiştir. Üç farklı akışkan giriş sıcaklığında (şarj için  $75, 80, 85^{\circ}\text{C}$  ve deşarj için  $20, 25, 30^{\circ}\text{C}$ ) sıcaklıklarında deneyler yapılmıştır. Çalışmada ısı transfer akışkanı olarak saf su ve ısı depolama malzemesi olarak erime sıcaklığı  $56-58^{\circ}\text{C}$  olan saf parafin (Merck/hexacosane) kullanılmıştır. Deneyler,  $30^{\circ}\text{C}$ 'de şartlandırılmış bir ortamda gerçekleştirilmiştir.

Erime (şarj)süreci öncesinde iç ortam sıcaklığı yaklaşık  $T = 30^{\circ}\text{C}$  olacak şekilde şartlandırılarak bütün yerel istasyonların  $t=0$  anında aynı sıcaklık değerinde erime sürecine dâhil olmaları sağlanmıştır. Isı transfer akışkanı (ITA), istenilen hacimsel debi (280 l/h) ve giriş sıcaklığına şartlandırıldıktan sonra test bölgesine yönlendirilmiş, erime süreci başlatılmıştır. Erime sürecinde hacimsel genleşme borusu kullanılarak depo içerisindeki yerel basınç artışı ve buna bağlı olarak sızdırmazlık problemi ortadan kaldırılmıştır. Bu süreçte, 5.hat eriyene kadar genleşme borusunun açık kalması (tikanmaması) sağlanmıştır. Isı deposu içerisindeki tüm FDM eriyinceye kadar şarj işlemi devam ettirilmiştir. Tüm depo geometrileri göz önüne alındığında şarj sürecinde erimeye en son katılan bölgenin en alt yerel nokta ( $T_{14}$ ) olduğu görülmüştür. Şekil 21'de eş merkezli depo geometrisine ait termoeleman konumları verilmektedir.

Şarj süreçlerinde en alt yerel nokta, kritik yerel nokta olarak belirlenmiştir. En alt noktanın  $59^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı anda "gizli ısı depolama + duyulur ısı depolama" süreçleri sona ermektedir. Grafiklerde kesikli çizgi (Şekil 22a)olarak verilen doğru, "gizli ısı + duyulur ısı depolamanın sona erdiği zamanı" göstermektedir. Grafiklerde, bu zaman adımından sonra

da deneyler sürdürülerek sadece duyulur ısı depolamanın etkisi gösterilmiştir. Sıcaklık ölçümleri, veri toplayıcı tarafından birer dakikalık aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

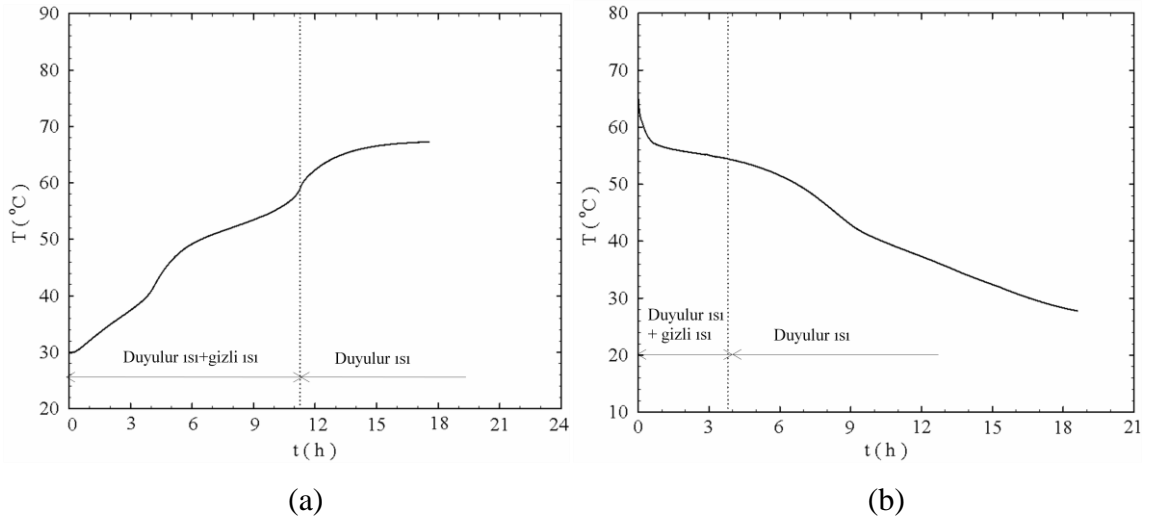


Şekil 21. Termoeleman yerleşimi, eş merkezli durum

Şekil 21’de gösterilen  $T_{ac}$  termoelemanların konumunu belirtmektedir. “a” alt indisi termoelemanın hangi hatta ait olduğunu belirtirken, “c” indisi ise o hattaki termoelemanın bakır borudan olan mesafesini ifade etmektedir. Örnek olarak,  $T_{14}$ ; 1.hat üzerinde radyal doğrultu üzerindeki en son termoelemanı göstermektedir. “b” ile gösterilen alt indisi ise bakır boru yüzeyindeki termoelemanların konumunu simgelenmektedir. Örnek olarak,  $T_{1b}$  1.hatta yer alan bakır boru üzerindeki termoelemanı temsil etmektedir.

Katılma (deşarj) sürecinin başlangıcında ise ısı deposu iç ortam sıcaklığı yaklaşık  $T=65^{\circ}\text{C}$  ’ye sabitlenmiştir. Bu şekilde, bütün yerel istasyonların  $t=0$  anında aynı başlangıç sıcaklığında katılma sürecine dâhil olmaları sağlanmıştır. Bu durum, ısı deposu içerisindeki sıcaklık dağılımlarının sağlıklı bir şekilde karşılaştırılmasına imkân sağlanmıştır. Şarj sürecindeki gibi ısı transfer akışkanı (ITA) istenilen hacimsel debi ve giriş sıcaklığına şartlandırıldıktan sonra test bölgesine yönlendirilmiş, katılma süreci

başlatılmıştır. Isı deposu içerisindeki tüm FDM katılaşımaya kadar deşarj işlemi devam etmiştir. Tüm depo geometrileri ( $e=0, 10, 20, 30$  mm) göz önüne alındığında deşarj sürecinde en son katılan bölgenin 4. ve 5.hatların üst yerel noktalarının ( $T_{44}, T_{44}, T_{44}, T_{55}$ ) olduğu görülmüştür En alt noktanın  $55^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı anda “gizli ısı + duyulur ısı geri kazanımı” sona ermektedir. Grafiklerde kesikli çizgi olarak verilen doğru, “gizli ısı + duyulur ısı geri kazanımın” sona erdiği zamanı göstermektedir (Şekil 22b). Grafiklerde, eğriler bu zaman adımından sonra da devam ettirilerek sadece depolanan duyulur ısının yerel sıcaklıklar üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 22. Gizli ve duyulur ısı depolama zamanı

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmada, yatay olarak konumlandırılan halka aralığındaki FDM'nin erime (şarj) ve katılaşma (deşarj) süreçlerine ait ısı depolama ve geri kazanım karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Halka aralığı (depo geometrisi) iç içe geçmiş, her biri dairesel forma sahip, bir dış gövde ve 4 farklı eksen konumuna sahip (eş merkez,  $e = 0$  mm ve kaçık merkez,  $e=10, 20, 30$  mm) ısı transfer borusundan meydana gelmektedir. Her bir geometrik konfigürasyon için sabit hacimsel debide ( $Q=280$  l/h) ve farklı akışkan giriş sıcaklıklarında (şarj süreci için  $T_{ag}=75, 80, 85^{\circ}C$ ;deşarj süreci için,  $T_{ag}=20, 25, 30^{\circ}C$ ) deneyler gerçekleştirilmiştir. Faz değiştiren madde olarak saf parafin (hexacosane), ısı transfer akışkanı olarak ise saf su kullanılmıştır. Tez kapsamında incelenen her bir geometri için yerel sıcaklık değişimleri ayrıntılı olarak sunulmuş ve irdelenmiştir.

#### 3.1. Şarj (Erime) Sürecinin İncelenmesi

Isıl enerji depolama sistemlerinde, belirli bir miktardaki ısıl enerjiyi mümkün olan en kısa sürede depolamak ana hedeftir. Katı-sıvı faz geçişini temel alan sistemlerde depolama süresinin en aza indirgenmesi, ilgili hacim içerisindeki FDM'nin tamamının eş zamanlı olarak erime sürecine katılmasını gerekli kılmaktadır. Erime sürecinde etkili olan fiziksel mekanizmalar, katı-sıvı faz bölgelerinin oluşumuyla bir başka ifadeyle sıcaklık alanın zaman bağımlı değişimiyle ilişkilidir.

Tez kapsamında üç farklı akışkan giriş sıcaklığı için (şarj süreci için  $T_{ag}=75, 80, 85^{\circ}C$ ) deneyler yapılmasına karşın bu bölümde tek bir akışkan giriş sıcaklığı,  $T_{ag}=80^{\circ}C$ , için yerel sıcaklık değişimleri detaylı olarak verilecektir. Farklı giriş sıcaklıkları için elde edilen veriler sadece karşılaştırma grafiklerinde sunulacaktır.

Eşmerkezli kanal geometrisi ( $e=0$  mm) için, farklı  $\theta$  açılarında ( $\theta=0, 45, 90, 135, 180^{\circ}$ ) radyal doğrultudaki sıcaklık değişimleri Şekil 23a-e'de verilmektedir. Genel karakter olarak her bir hat üzerindeki yerel sıcaklıklar iç cidardan dış cidara doğru bir azalış göstermektedir. Bu davranış ısı geçişinin iç cidardan dış cidara doğru gerçekleşmesinin bir sonucudur. İlgili grafiklerde yer alan kesikli çizgi, hazne içerisinde katı-sıvı faz dönüşümünün tamamen sağlandığı zamanı göstermektedir. Eğrinin sol tarafı "gizli ısı+duyulur ısı depolamanın" olduğu zaman dilimini; sağ tarafı ise yalnızca "duyulur ısı depolamanın" olduğu zaman dilimini göstermektedir. Grafikler dikkatlice incelendiğinde



erime sürecinde en son eriyen bölgenin 1. hat üzerinde yer alan 4. radyal istasyon( $T_{14}$ ) olduğu görülmektedir. Bu bölgede sıcaklık değişiminin  $56^{\circ}\text{C}$  düzeyinde ani bir artış göstermesi gizli ısı depolamanın bir sonucudur. Erime süreci zaman bağımlı olarak incelendiğinde ise, her bir yerel istasyondaki sıcaklığın belirli bir zamana kadar yüksek bir değişim sergilediği (sıcaklık artışı) ve bu zamandan sonra yaklaşık olarak sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Isı transferindeki sürücü potansiyelin sıcaklık farkı ( $\bar{T}_{FDM}-T_{ag}$ ) olduğu hatırlanırsa, zaman artışına bağlı olarak sıcaklık farkının ve ısı transferinin azalacağı açıktır.

Her bir hat kendi içinde değerlendirildiğinde, farklı  $\theta$  açılarında radyal doğrultuda 1. ve 2. hattaki (Şekil 23a, b) sıcaklık değişimlerinin sırasıyla 3., 4. ve 5. hatlara (Şekil 23c-e) kıyasla daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bir başka ifadeyle, belirli depolama süresinden sonra, 3., 4. ve 5. hatlardaki yerel sıcaklıkların birbirine oldukça yakın değerler aldığı, bunun aksine 1. ve 2. hatlarda yerel sıcaklık farklarının hissedilebilir olduğu görülmektedir. Bu durum, çevresel doğrultuda ısı transferinin homojen bir davranış sergilemediğini açıkça ortaya koymaktadır. İlgili davranış, ilerleyen kısımlarda detaylı olarak irdelenecektir.

Şekil 23e dikkatlice incelendiğinde, 5 nolu hat üzerinde dış cidara yakın bölgedeki yerel sıcaklık değişimlerinin ( $T_{53}$ ,  $T_{54}$ ) yukarıda belirtilen davranışları sergilemediği açıkça görülmektedir. Bu davranış, deneysel çalışma kısmında doluluk oranı açıkça gösterilen depo geometrisinde (Şekil 20) ilgili istasyonların FDM ile temas halinde olmamalarıyla açıklanır.

Şekil 24a-d' de aynı radyal mesafedeki yerel istasyonların çevresel doğrultudaki sıcaklık değişimleri verilmektedir. Her bir radyal istasyon çevresel doğrultuda karşılaştırıldığında yerel sıcaklık artışlarının kendi içinde farklı olduğu ve  $\theta$ 'nin artışına bağlı olarak sıcaklıkların arttığı görülmektedir. Çevresel doğrultudaki bu farklılık, ısı transferine katkı sağlayan doğal taşınım mekanizmasının bir sonucudur. Daha net bir ifadeyle, borunun alt kısmında (1 ve 2 nolu hat üzerinde) sadece iletim mekanizması etkin iken sırasıyla 3, 4 ve 5 nolu hatlarda ısı transfer mekanizması, iletimden, iletim+doğal taşınım mekanizmasına geçmekte ve bunun sonucu olarak da dış bölgeye aktarılan ısı miktarı artmaktadır. Bilindiği üzere, sıvı FDM 'de sıcaklık artışına bağlı olarak yoğunluk azalmakta ve bunun sonucu olarak artan kaldırma kuvvetleri etkisiyle yukarı yönlü bir akış hareketi gerçekleşmektedir. Isı taşınımının hızının bir fonksiyonu olduğu hatırlanacak olursa, hızın yüksek olduğu bölgelerde ısı transferinin yüksek olacağı açıktır. Burada yine, 5 nolu

hat üzerinde verilen 3 ve 4 nolu istasyonlara ait sıcaklıkların FDM sıcaklığını ifade etmediği vurgulanmalıdır.

Yukarıda açıklanan doğal taşınım mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına yönelik olarak çevresel doğrultudaki ikinci istasyona ait sıcaklık ( $T_{a2}$ ) alanları zaman bağımlı olarak Şekil 25a 'da verilmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde, şarj süreci başlangıcında ( $30dk < t$ ) çevresel doğrultuda dairesel (homojen) bir sıcaklık dağılımı gerçekleşmesine karşın ilerleyen süreçte ( $t > 30dk$ ) sıcaklık alanının dairesel yapısının bozulduğu görülmektedir. Ortaya çıkan bu yeni asimetric bir yapı (yukarı yönlü genişleyen) depo üst yarı bölgesinde etkin olan doğal taşınımın bir sonucudur. Örnek olarak,  $t=480$  dk anında 1 nolu hat üzerindeki yerel sıcaklığın ( $T_{12}$ )  $61^{\circ}C$  değerine ulaştığı, 5 nolu istasyondaki ( $T_{52}$ ) yerel sıcaklığın ise  $77^{\circ}C$  değerine ulaştığı görülmektedir. Bu grafiğin bir diğer önemli çıktısı ise, aynı zaman adımıyla erimeye katılmayan bölgelerin varlığıdır. Daha net bir ifadeyle, test bölgesinin üst yarı bölgesinde faz değişimi işlemi tamamlanmasına karşın alt bölgede hala faz değişimi işlemi devam etmektedir. Bu sonuç, katı-sıvı faz dönüşümünü esas alan ısı depolama sistemlerinde ısı kaynağının (ısı transfer borusu) aşağı yönlü kaçık eksenli bir yapıya sahip olması gerekliliği göstermektedir.

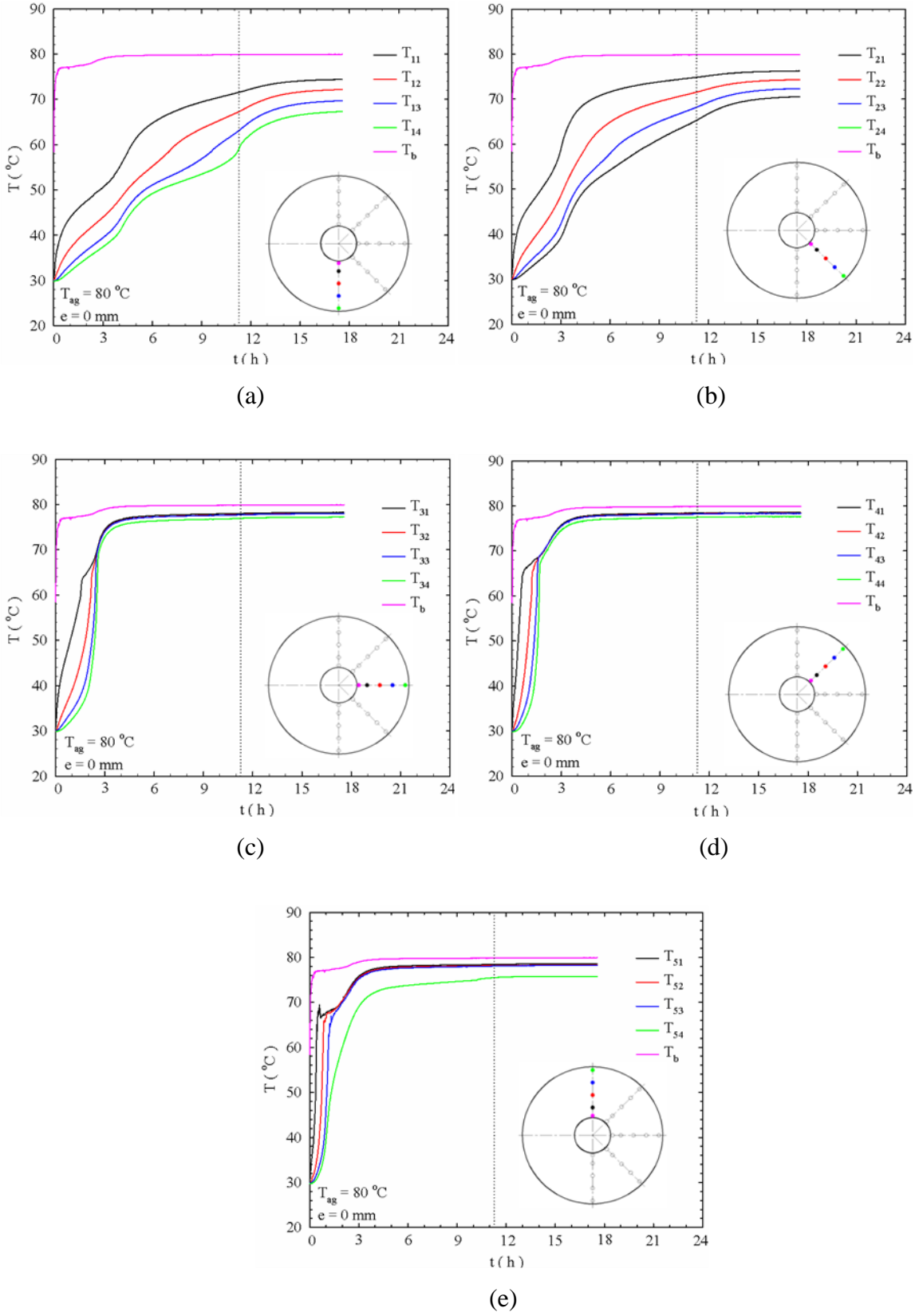
Farklı radyal konumlar için çevresel doğrultudaki yerel sıcaklık değişimleri ( $T_{a1}$  ve  $T_{a2}$ )  $t=30$  dk anı için benzer formda Şekil 25b'de verilmektedir. İlgili grafikte görüldüğü üzere 2 nolu istasyondaki çevresel sıcaklık dağılımı dairesel (üniform) bir yapıya sahip olmasına karşın 1 nolu istasyondaki sıcaklık dağılımı üniform olmayan bir yapıya sahiptir. Bu yapısal farklılık,  $t=30$  dk anında ikinci yerel istasyonlarda ( $T_{a2}$ ) iletim, birinci yerel istasyonlarda ( $\Theta \geq 90^{\circ}$ ) ise doğal taşınım mekanizmasının etkinliğinin bir sonucudur.

Farklı eksen kaçıklıkları için ( $e=10, 20, 30$  mm) elde edilen yerel sıcaklık değişimleri Şekil 26-31 'de verilmektedir. Her bir eksen kaçıklığında FDM sıcaklığının radyal ve çevresel konuma bağlı davranışları genel karakter olarak eşmerkezli kanal durumuyla ( $e=0$  mm) paralellik arz etmektedir. Eşmerkezli durumdan farklı olarak ise ilgili grafiklerde, eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak 1. ve 5. hatta FDM ile temas halinde bulunan yerel istasyon sıcaklıklarının birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, depo üst yarı bölgesinde meydana gelen doğal taşınımın daha geniş bir etki alanı bulması ile ilişkilidir.

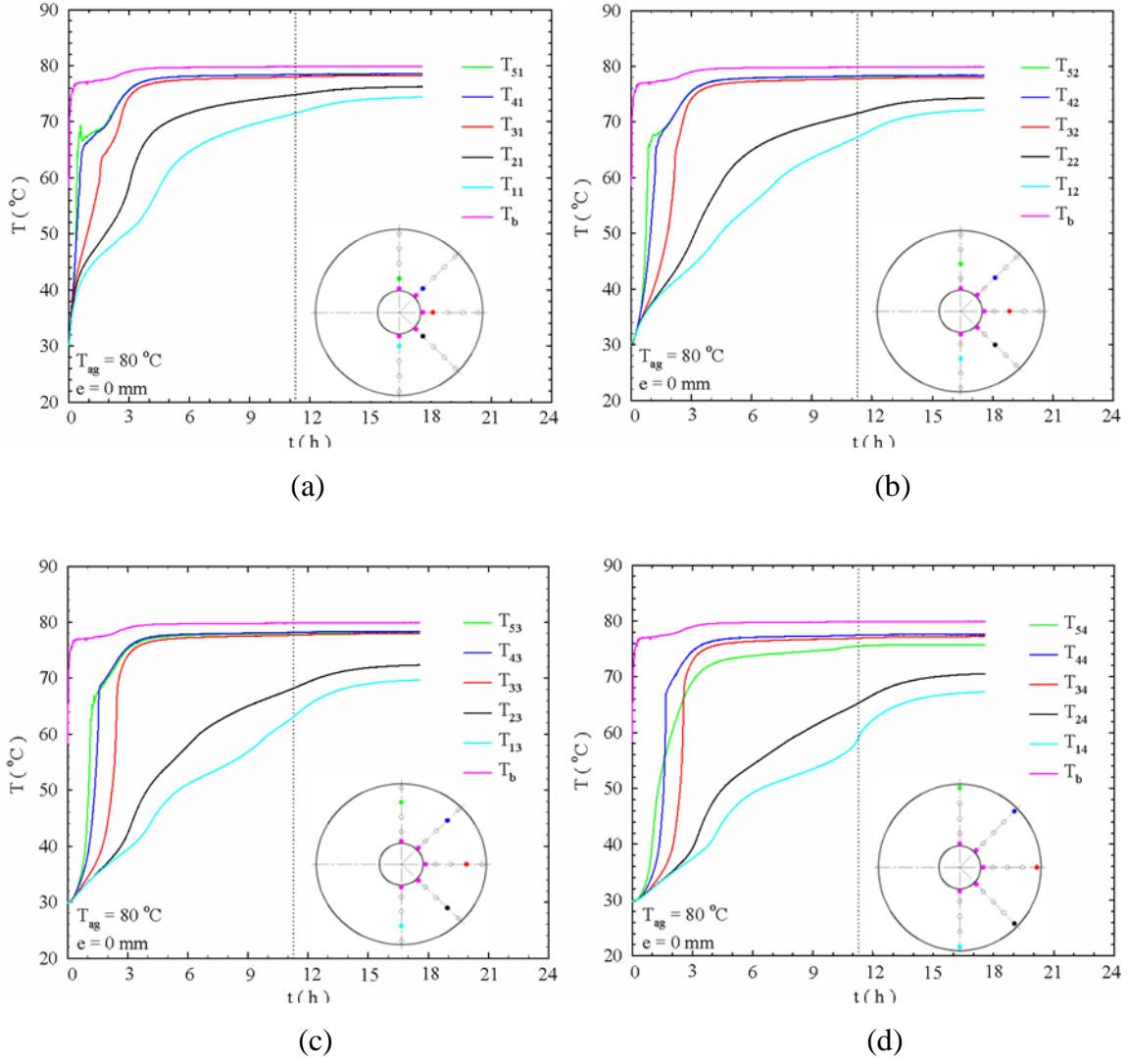
Depolama süresi üzerinde kritik rol oynayan kritik yerel nokta sıcaklıklarının (en son ergiyen yerel bölgeye ait sıcaklık) eksen konumlarına bağlı değişimleri farklı akışkan giriş sıcaklıkları,  $T_{ag}=75, 80, 85^{\circ}C$  için sırasıyla Şekil 32a-c 'de verilmektedir. Burada, her bir

geometri için kritik nokta sıcaklığının (faz değişim sıcaklığının)  $59^{\circ}\text{C}$  alındığı vurgulanmalıdır. İlgili sıcaklık değeri, gizli ısı+duyulur ısı depolama bölgesinden, duyulur ısı bölgesine, geçiş üst sınırını ifade etmektedir ve grafiklerde kesikli çizgi halinde gösterilmektedir. Her bir eksen konumu için yapılan deneylerde kritik noktanın 1 nolu hat üzerinde yer alan en dış yerel istasyona tekabül ettiği belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak depolama süreleri önemli düzeyde azalmaktadır. Burada "depolama süresinin" gizli+duyulur ısı depolamanın sona erdiği zamanı ifade ettiği hatırlanmalıdır. Örnek olarak, akışkan giriş sıcaklığının,  $T_{ag}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  değeri için farklı eksen kaçıklıklarında, ( $e=0, 10, 20$  ve  $30$  mm), depolama sürelerinin sırasıyla yaklaşık olarak 11, 8, 5 ve 4 saat değerlerini aldığı grafikte görülmektedir. Benzer şekilde, akışkan giriş sıcaklığının artışına bağlı olarak depolama sürelerinin önemli düzeyde azaldığı bir diğer bulgudur. Eksen kaçıklığının depolama süresi üzerindeki etkisi Şekil 33'de farklı bir şekilde verilmektedir.

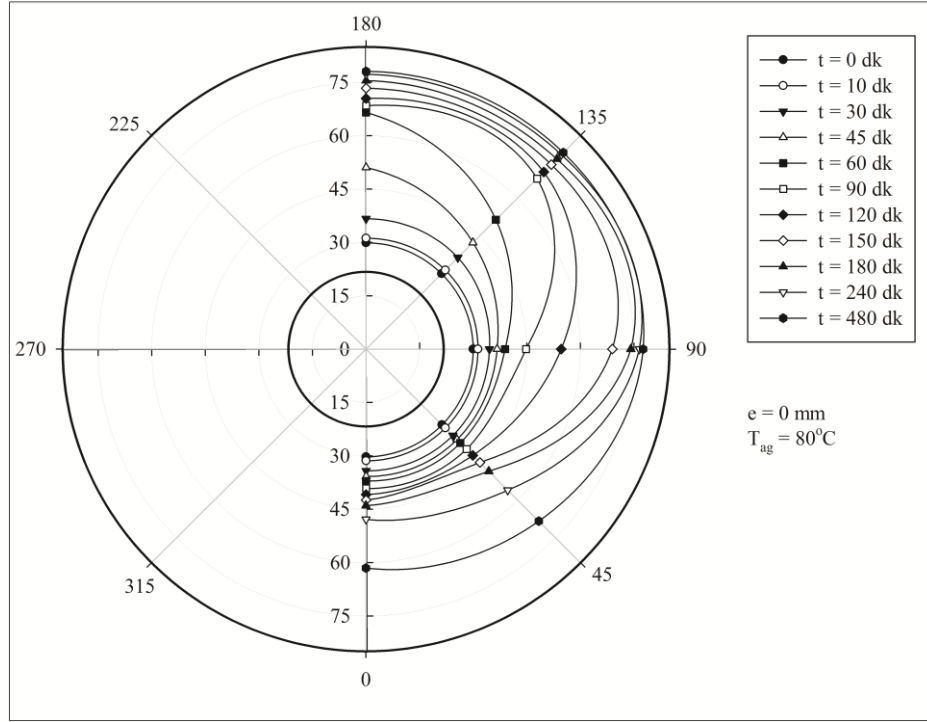
Katı-sıvı faz dönüşüm sürecine ait tez kapsamında yapılan bütün çalışmalar, farklı akışkan giriş sıcaklıkları ve eksen konumları için özet halinde karşılaştırmalı olarak Şekil 34'de verilmektedir. İlgili değişimler dikkatle incelendiğinde, her bir akışkan giriş sıcaklığı için eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak ısı depolama süreleri eşmerkezli duruma kıyasla önemli düzeyde azaldığı görülmektedir. Bu azalım düzeyleri, eşmerkezli duruma kıyasla, akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak, farklı eksen kaçıklıkları ( $e=10, 20$  ve  $30$  mm) için sırasıyla %34, %53, %67 mertebelerindedir. Burada, ısı transfer yüzey alanını değiştirmeksizin yapılan bir geometrik düzenleme ile ısı depolama süresindeki bu azalış önemle vurgulanmalıdır.



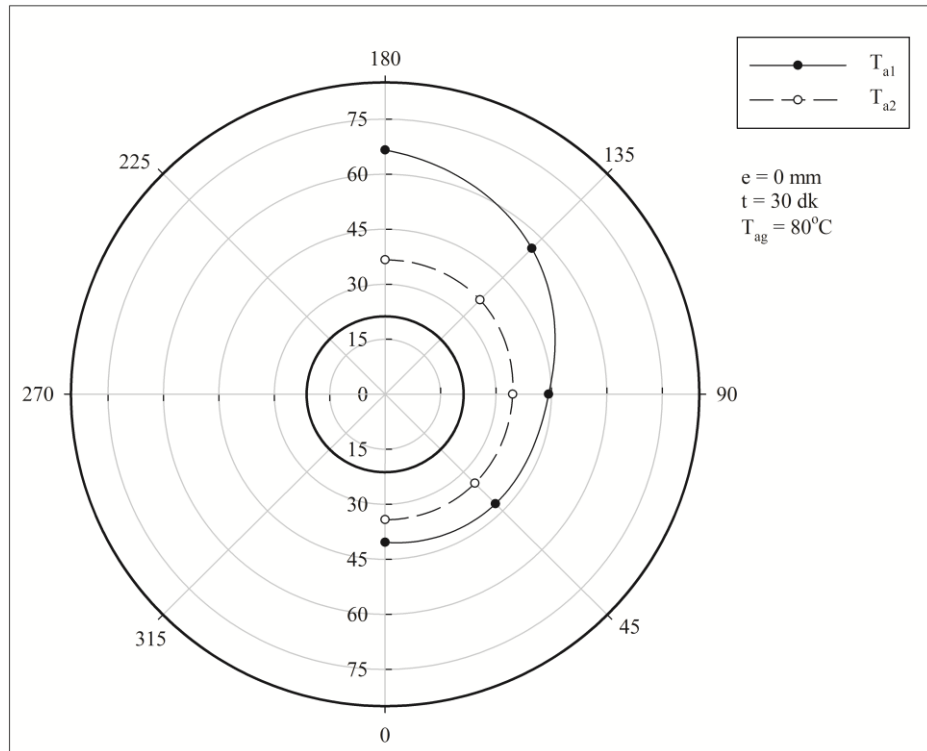
Şekil 23.  $e=0$  mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj)



Şekil 24.  $e=0$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj)

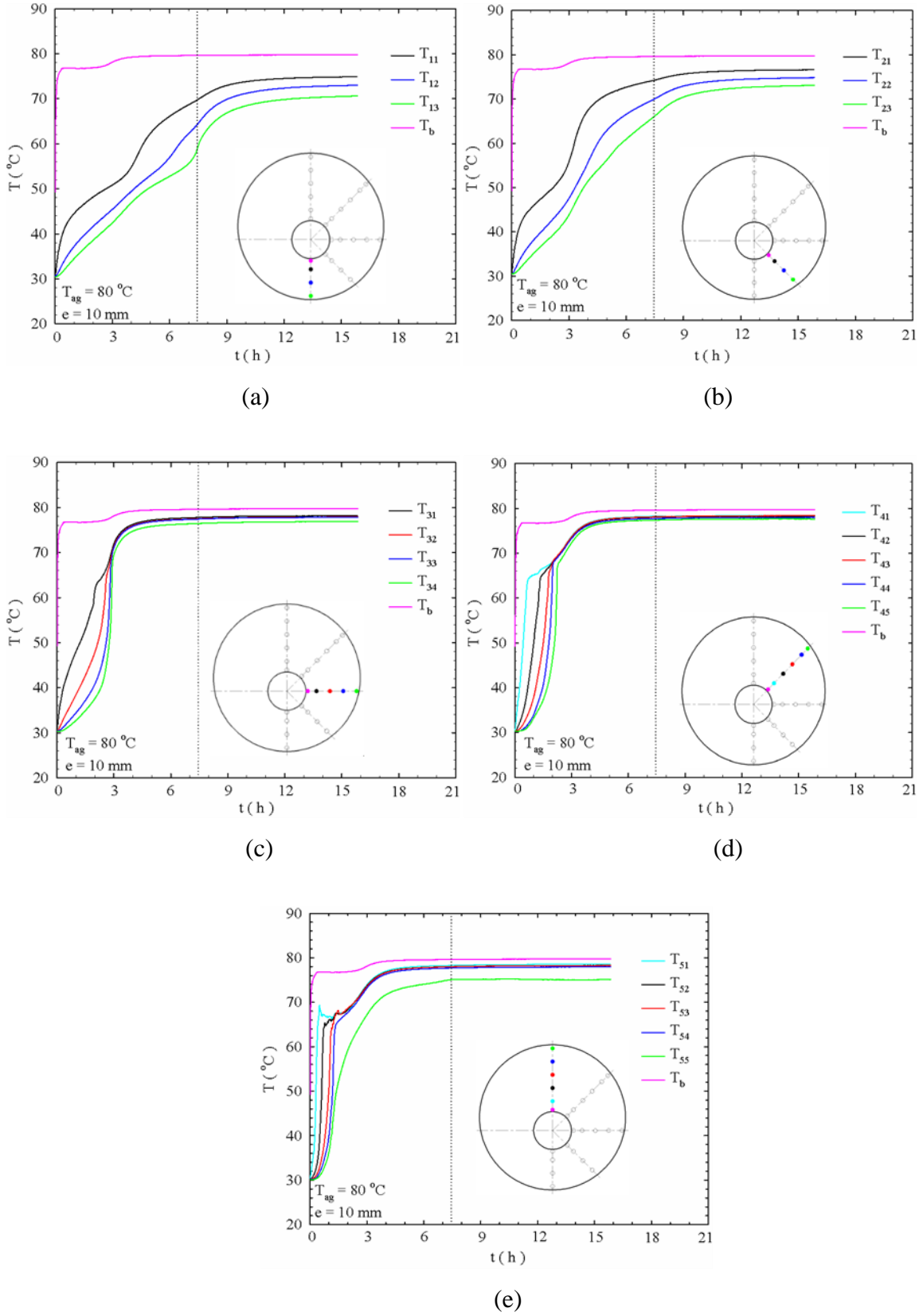


(a)

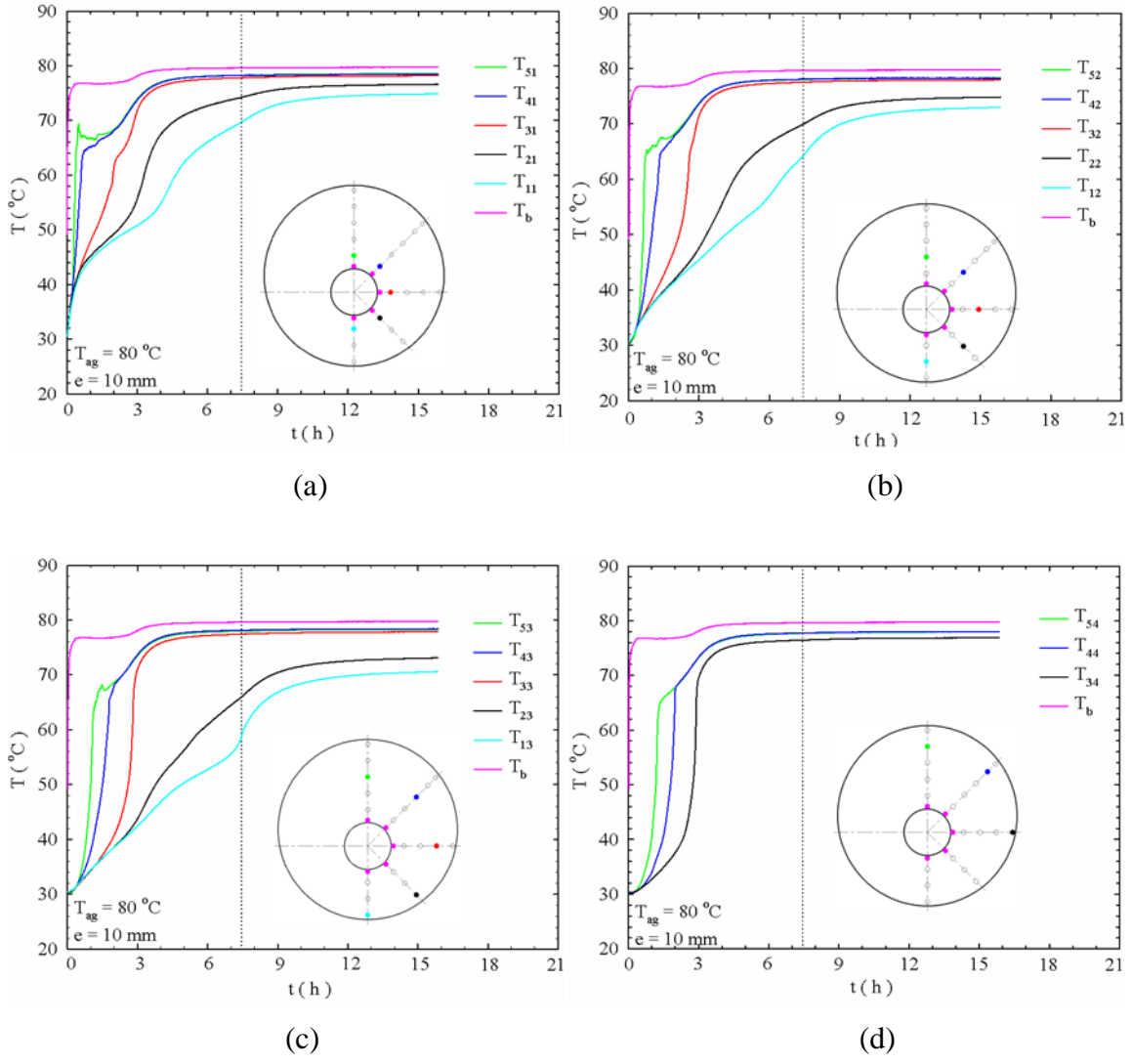


(b)

Şekil 25. Farklı yerel istasyonların çevresel sıcaklık değişimleri (şarj): ikinci yerel istasyona ait sıcaklık değerleri(a), birinci ve ikinci yerel istasyona ait t anı için sıcaklık değerleri(b)

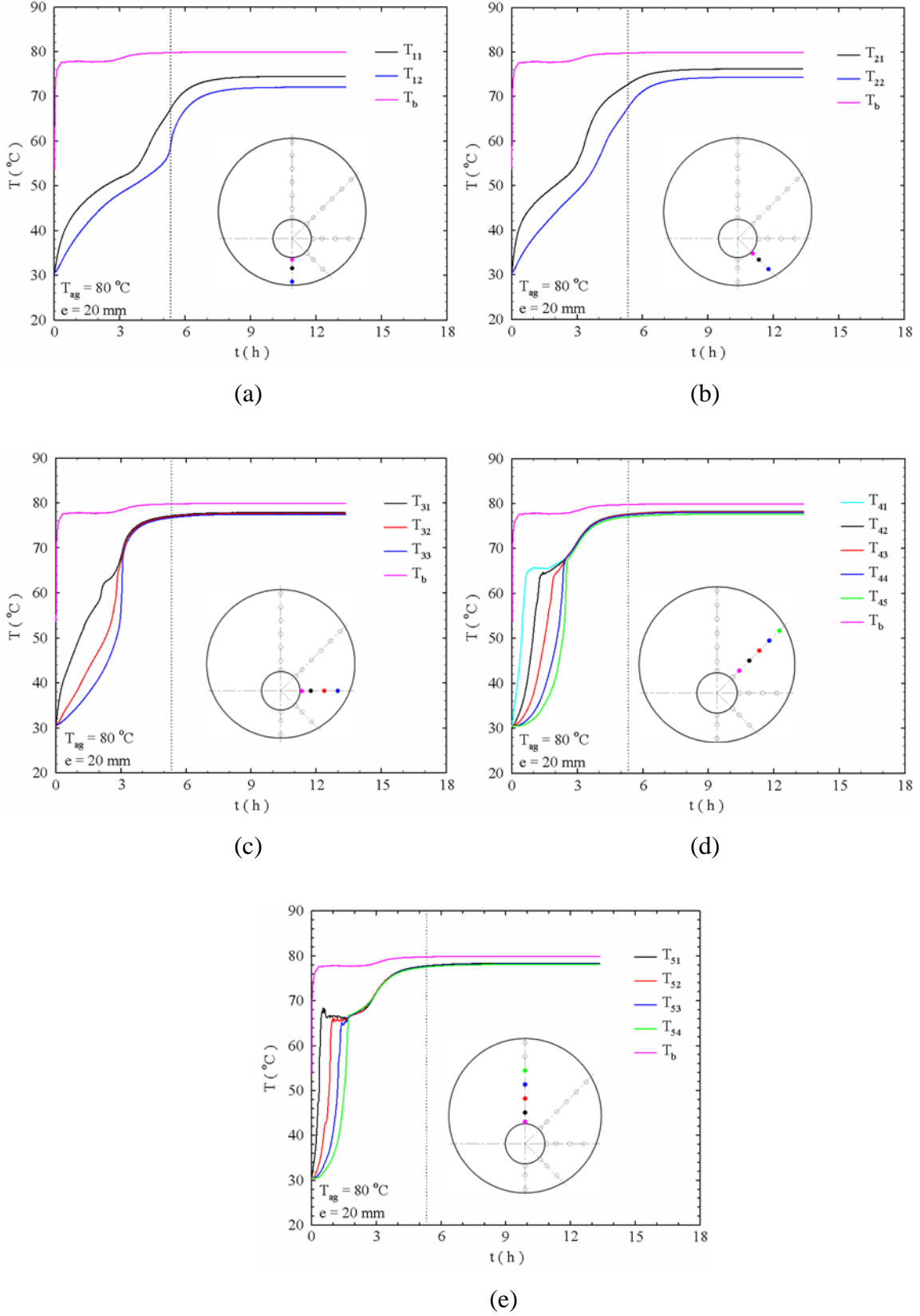


Şekil 26.  $e=10\text{ mm}$  konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj)

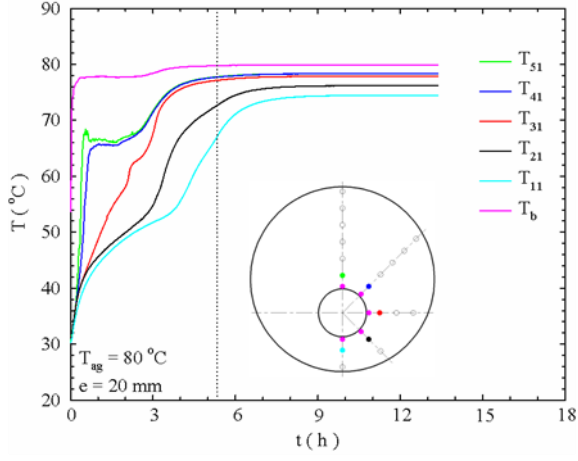


Şekil 27.  $e=10$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj)

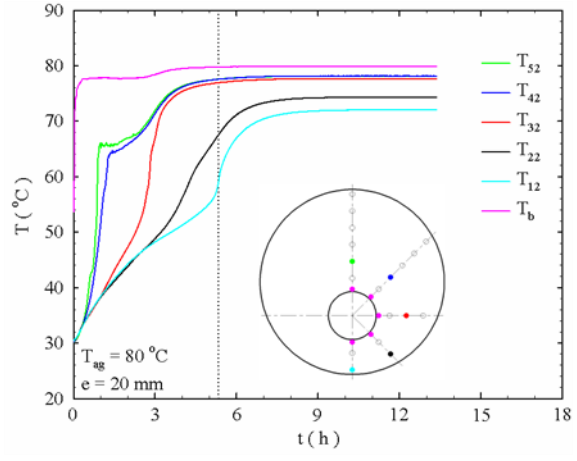




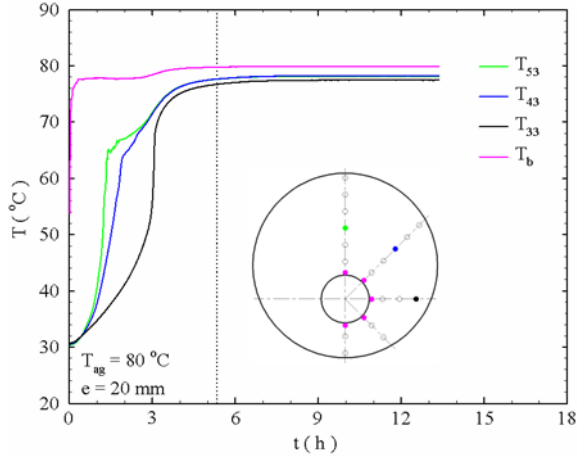
Şekil 28.  $e=20$  mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj)



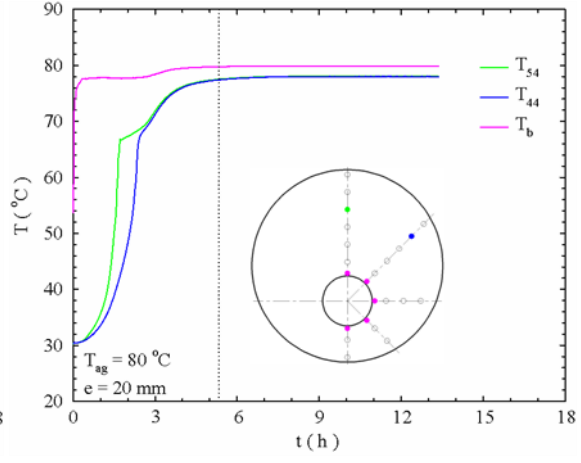
(a)



(b)

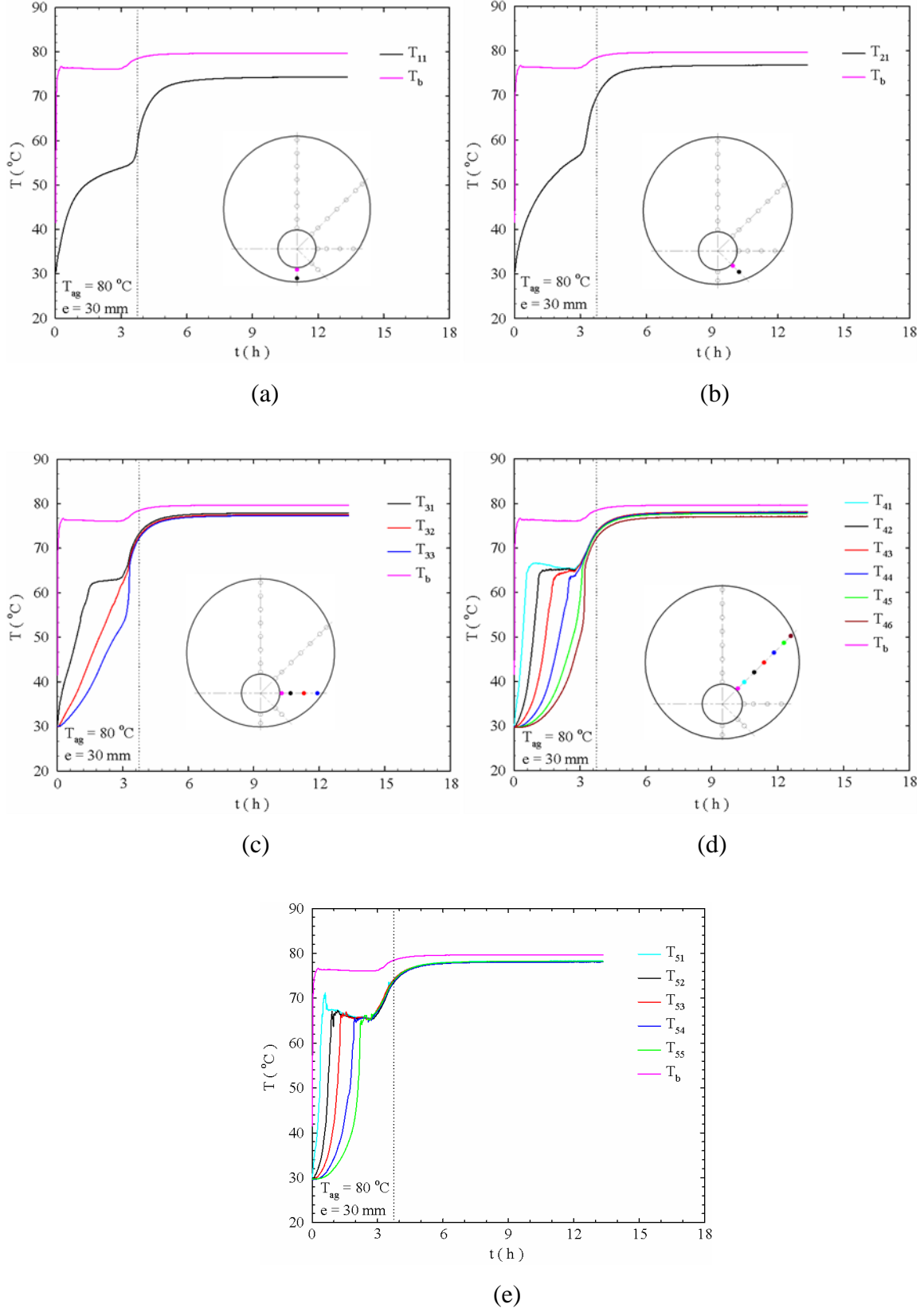


(c)

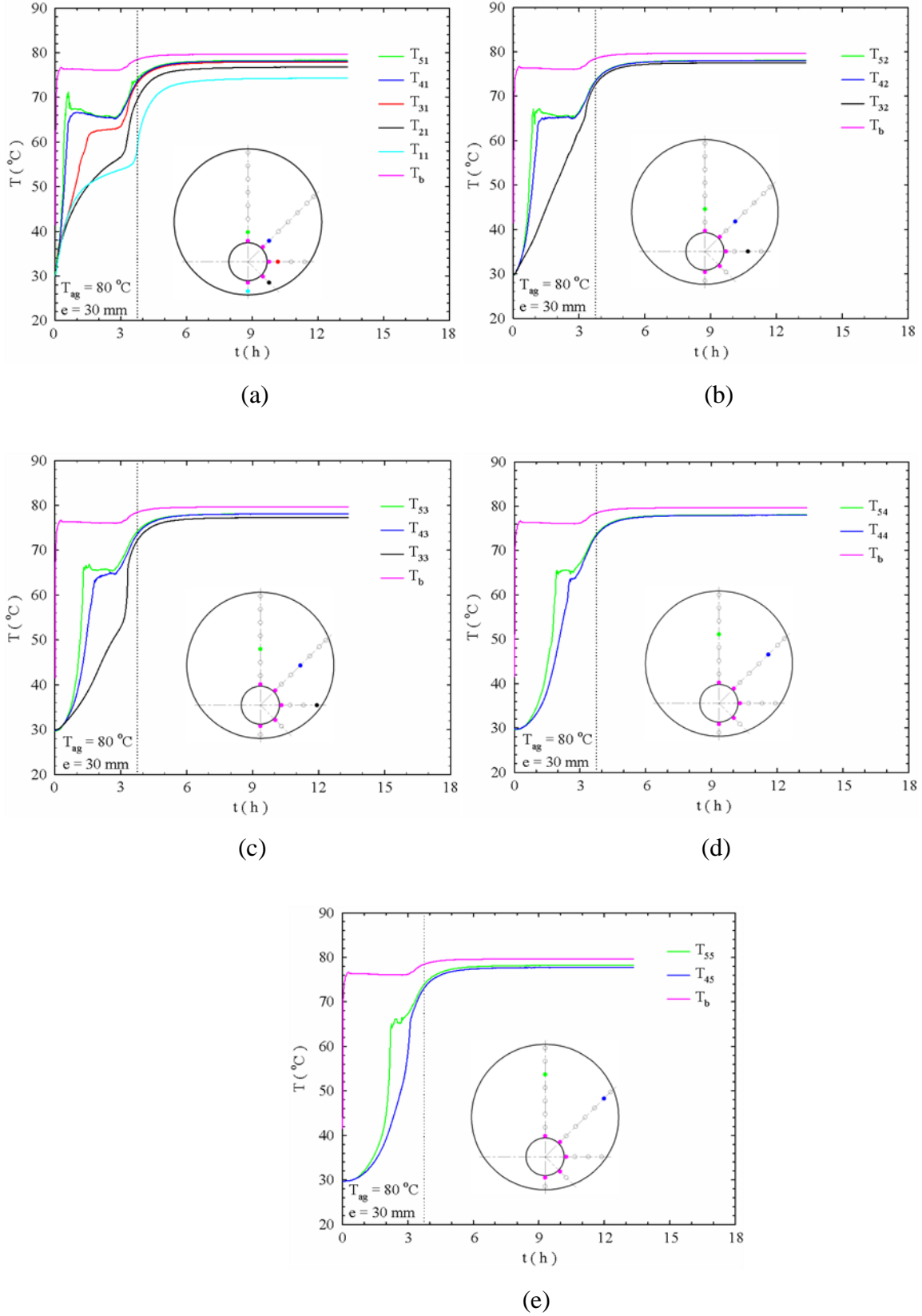


(d)

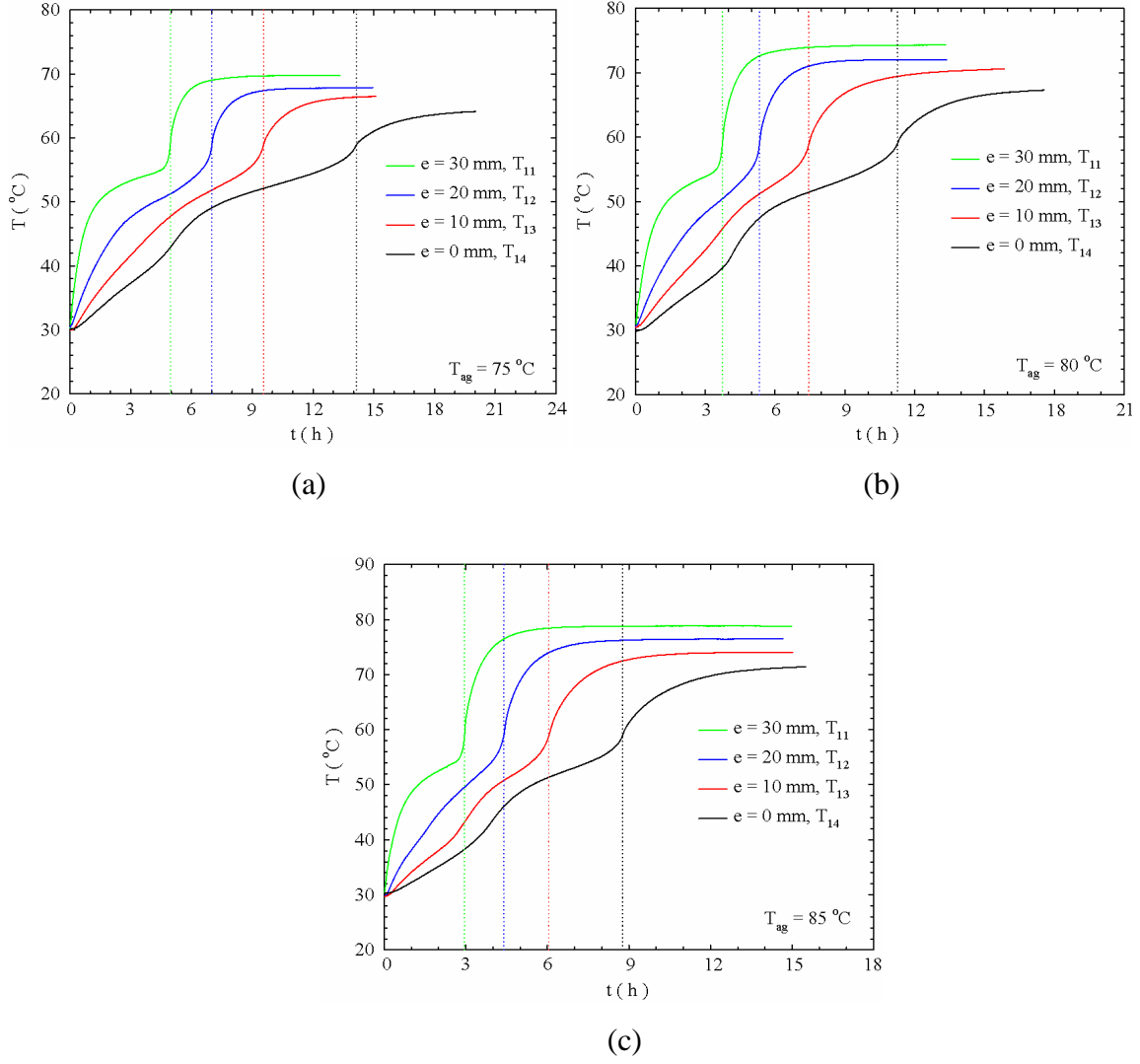
Şekil 29.  $e=20$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj)



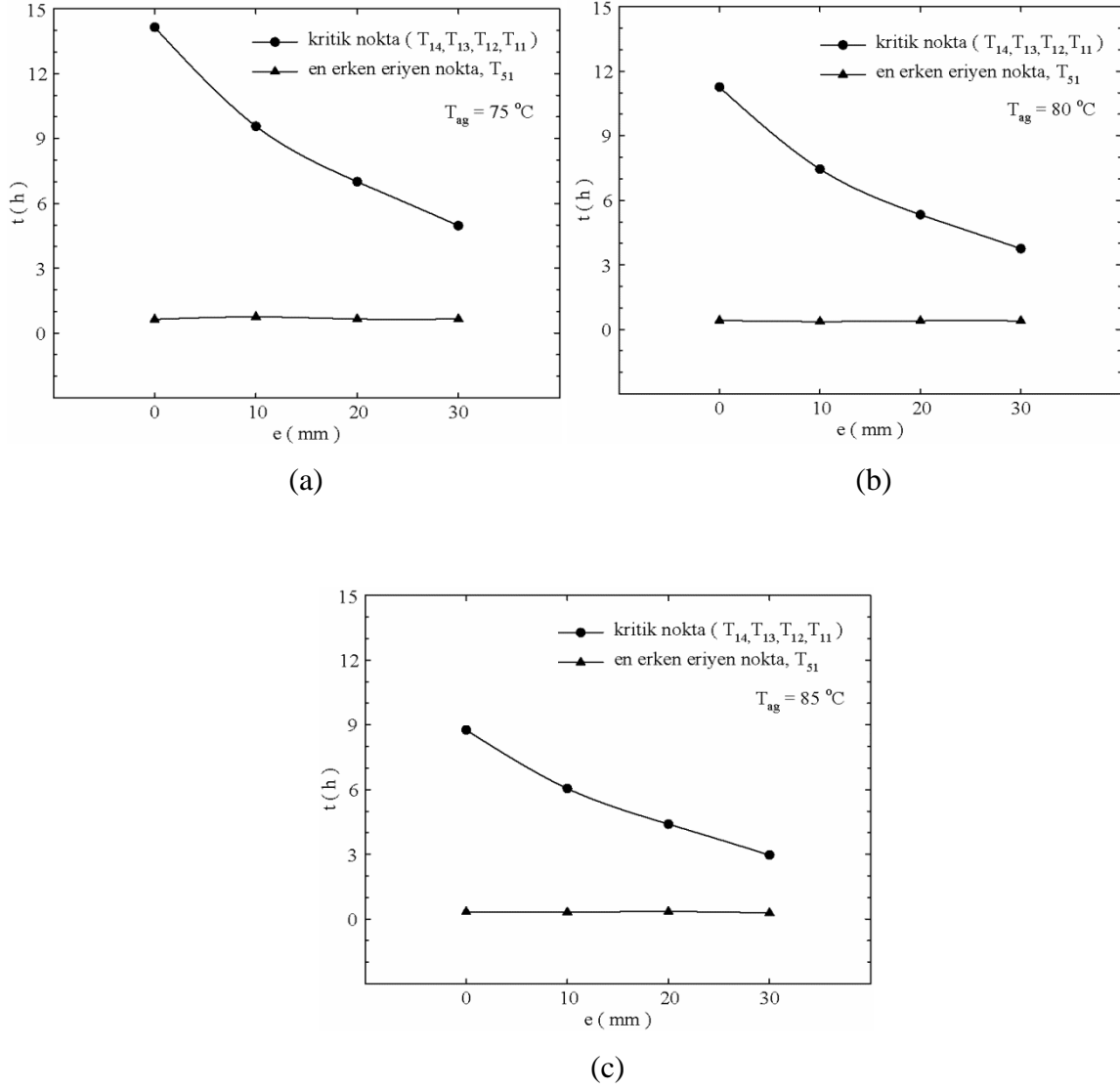
Şekil 30e=30 mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (şarj)



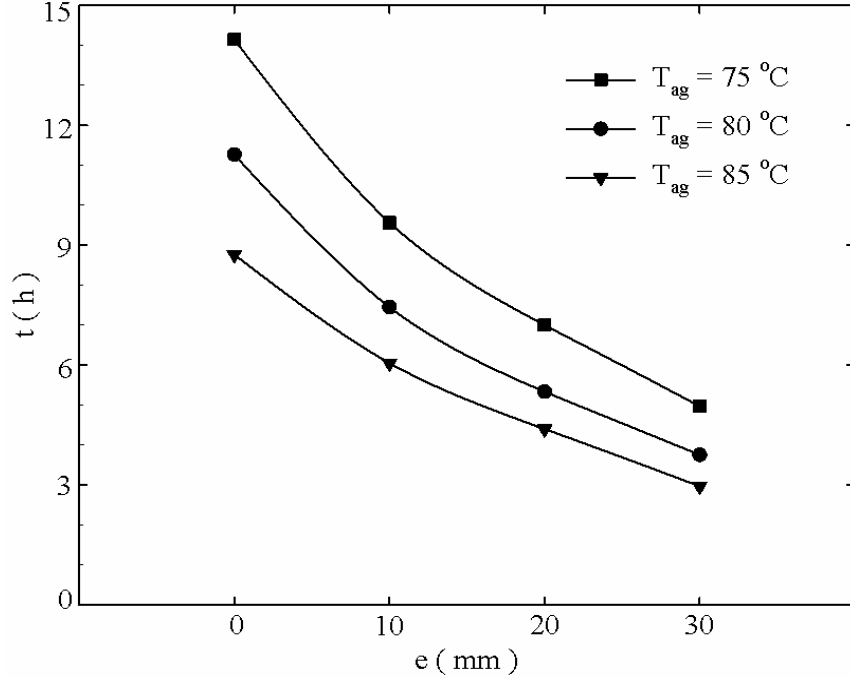
Şekil 31.  $e=30\text{ mm}$  konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (şarj)



Şekil 32. Kritik yerel istasyon sıcaklıklarının (farklı akışkan giriş sıcaklıklarında) eksen konumlarına bağlı sıcaklık değişimi (şarj) :  $T_{ag}=75^\circ\text{C}$  (a),  $T_{ag}=80^\circ\text{C}$  (b),  $T_{ag}=85^\circ\text{C}$  (c)



Şekil 33. Eksen kaçıklığının(farklı akışkan giriş sıcaklığında) depolama süresine etkisi:  $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$  (a),  $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$  (b),  $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$  (c) (şarj)



Şekil 34. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarında eksen konumuna bağlı olarak erime sürelerinin karşılaştırması (şarj)

### 3.2. Deşarj (Katılaşma) Sürecinin İncelenmesi

Depolanan ısının geri kazanıldığı deşarj işlemlerinde, geri kazanım süresinin en aza indirgenmesi ana hedeftir. Tez kapsamında dört farklı eksen konumu ( $e=0, 10, 20$  ve  $30$  mm) ve üç farklı akışkan giriş sıcaklığında ( $T_{ag}=20, 25, 30$  °C) deneyler yapılmıştır. Ancak tez bütününde yapısal sadeliğin korunması açısından, bu bölümde sadece bir akışkan giriş sıcaklığı için yerel sıcaklık değişimleri detaylı olarak verilmiştir. Farklı akışkan giriş sıcaklıkları için elde edilen yerel sıcaklık değişimleri karşılaştırma grafiklerinde sunulmuştur.

Eş merkezli depo geometrisi için ( $e=0$  mm) için, farklı  $\theta$  açılarında ( $\theta=0, 45, 90, 135$  ve  $180^\circ$ ) her bir hatta ait radyal doğrultudaki yerel sıcaklık değişimleri Şekil 35a-e'de verilmektedir. Genel karakter olarak her bir hat üzerindeki yerel sıcaklıkların zaman bağımlı olarak azaldığı görülmektedir. Isı transferindeki sürücü potansiyelin sıcaklık farkı ( $\bar{T}_{FDM}-T_{ag}$ ) olduğu hatırlanırsa, zaman artışına bağlı olarak sıcaklık farkının ve ısı transferinin azalacağı açıktır. Grafik dikkatle incelendiğinde, geri kazanımın ilk periyodunda ( $t<1,5$  h) azalmanın yüksek bir gradyana sahip olduğu, ilerleyen süreçte ise etkisini yitirdiği görülmektedir. İlgili zaman adımında, FDM sıcaklığının sıvı-katı faz dönüşüm sıcaklığına,  $T = 56^\circ\text{C}$ , tekabül ettiği açıkça görülebilir. Bu davranış, gizli ısı depolama bölgesinde ısı geçişinin sabit sıcaklıkta gerçekleşmesinin bir sonucudur. Her bir hat kendi içinde değerlendirildiğinde, radyal doğrultuda iç cidara yakın bölgedeki yerel sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmektedir.

İlgili depo geometrisi için aynı radyal konuma sahip yerel istasyonların çevresel doğrultudaki sıcaklık değişimleri, Şekil 36a-d' de verilmektedir. Yapılan karşılaştırmada ilgili sıcaklık değerlerinin  $\theta$  açısının artışına bağlı olarak daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin,  $t= 30$ dk için 2. çevresel hat üzerinde sıcaklıklar ( $T_{12}, T_{22}, T_{32}, T_{42}, T_{52}$ ) sırasıyla  $58, 58, 59, 62$  ve  $65^\circ\text{C}$  değerlerini almaktadır (Şekil 36b). Bu davranış, şarj sürecine benzer şekilde deşarj sürecinde de çevresel doğrultuda ısı transferinin homojen bir yapı sergilemediği gerçeğini ortaya koymaktadır. İlgili durum ilerleyen kısımlarda detaylı olarak irdelenecektir. Burada,  $T_{53}$  ve  $T_{54}$  yerel istasyonlarının FDM ile temas halinde olmamaları sebebiyle yukarıda bahsedilen davranışı sergilemediği vurgulanmalıdır.

Çevresel doğrultudaki ikinci istasyonlara ait sıcaklık ( $T_{a2}$ ) alanları zaman bağımlı olarak Şekil 37a'da verilmektedir. Şekil dikkatlice incelenecek olursa, deşarj sürecinin ilk periyodunda ( $t=0-120$ dk) çevresel doğrultuda dairesel (homojen) bir sıcaklık alanının ortaya çıkmadığı net olarak görülmektedir. Ortaya çıkan bu asimetric yapı, haznenin alt yarı bölgesinde etkin olan doğal taşınım mekanizmasının bir sonucudur. Bu davranış kısaca şu



şekilde açıklanabilir: İlgili zaman adımında tamamen sıvı fazda olan FDM, sıcaklık azalışına bağlı olarak, artan yoğunluk etkisiyle aşağı yönlü bir harekete zorlanmaktadır. Bu etki sonucunda, sıcaklığı azalan FDM üst yarı bölgeyi terk ederek hızlı bir şekilde hazne alt yarı bölgesine nüfuz etmekte ve katılaşmaktadır. Daha net bir ifadeyle, hazne alt yarı bölgesinde üst yarı bölgeye kıyasla daha hızlı bir sıvı-katı faz dönüşümü meydana gelmektedir. Örnek olarak,  $t=10$  ve  $30$  dk anında, 1 nolu hat üzerindeki yerel sıcaklıklar sırasıyla  $62$  ve  $58^{\circ}\text{C}$  iken 5 nolu hat üzerindeki yerel sıcaklıklar ise, sırasıyla  $68$  ve  $65^{\circ}\text{C}$  değerlerini almaktadır. İlerleyen süreçte ise ( $t>120$ ) sıcaklık alanı dairesel (homojen) bir yapıya kavuşmaktadır. Bu davranış ilgili istasyonların belirtilen zaman diliminde sıvı-katı faz dönüşümlerinin tamamlanması ile ilişkilidir. Ayrıca, ilgili zaman adımında katılaştıran bölge hacminin doğal taşınımın etki alanını azaltması diğer bir etken olarak ifade edilebilir. Burada ısı transfer borusu etrafında meydana gelen ve giderek kalınlaşan katı FDM tabakasının ısı transferi üzerinde olumsuz bir etki yaptığı vurgulanmalıdır. Doğal taşınım etkisinin daha net olarak görülebilmesi için farklı radyal istasyonlara ( $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ) ait sıcaklık alanları Şekil 37b'de verilmektedir. İlgili davranış, sıvı-katı faz dönüşümünü esas alan ısı geri kazanım sistemlerinde, ısı kaynağının (ısı transfer borusu) yukarı yönlü kaçık eksenli bir yapıya sahip olmasını gerektirdiğini göstermektedir.

Farklı eksen kaçıklıkları için elde edilen yerel istasyonlara ait sıcaklık değişimleri Şekil 38-43'de verilmektedir. Her bir eksen kaçıklığında, FDM sıcaklığının radyal ve çevresel konuma bağlı davranışları genel karakter olarak eşmerkezli kanal durumuyla ( $e=0$  mm) benzer karakter sergilemektedir.

Geri kazanım süresini belirleyen kritik yerel istasyon sıcaklıklarının (en son ergiyen yerel bölgeye ait sıcaklık) eksen konumlarına bağlı değişimleri farklı akışkan giriş sıcaklıkları,  $T_{ag}=20, 25, 30^{\circ}\text{C}$  için sırasıyla Şekil 44a-c'de verilmektedir. Burada, her bir depo geometrisi için kritik nokta sıcaklığının (faz değişim sıcaklığının)  $55^{\circ}\text{C}$  alınmıştır. İlgili sıcaklık değeri, "gizli ısı+duyulur ısı depolama bölgesi"nden, "duyulur ısı bölgesi"ne geçiş alt sınırını ifade etmekte olup; grafiklerde kesikli çizgi ile gösterilmektedir. Her bir eksen konumu için yapılan deneylerde kritik noktanın  $e=0, 10$  ve  $20$  mm için 4 nolu hat üzerinde;  $e=30$  mm için ise 5 nolu hat üzerinde yer alan en dış yerel istasyonlara (FDM içerisindeki) denk geldiği belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak geri kazanım sürelerinde önemli artışlar olmaktadır. Burada "geri kazanım süresinin" "gizli+duyulur ısı geri kazanımı"nın sona erdiği zamanı ifade ettiği hatırlanmalıdır. Örnek olarak, akışkan giriş sıcaklığının,  $T_{ag}, 25^{\circ}\text{C}$  değeri için farklı eksen kaçıklıklarında,

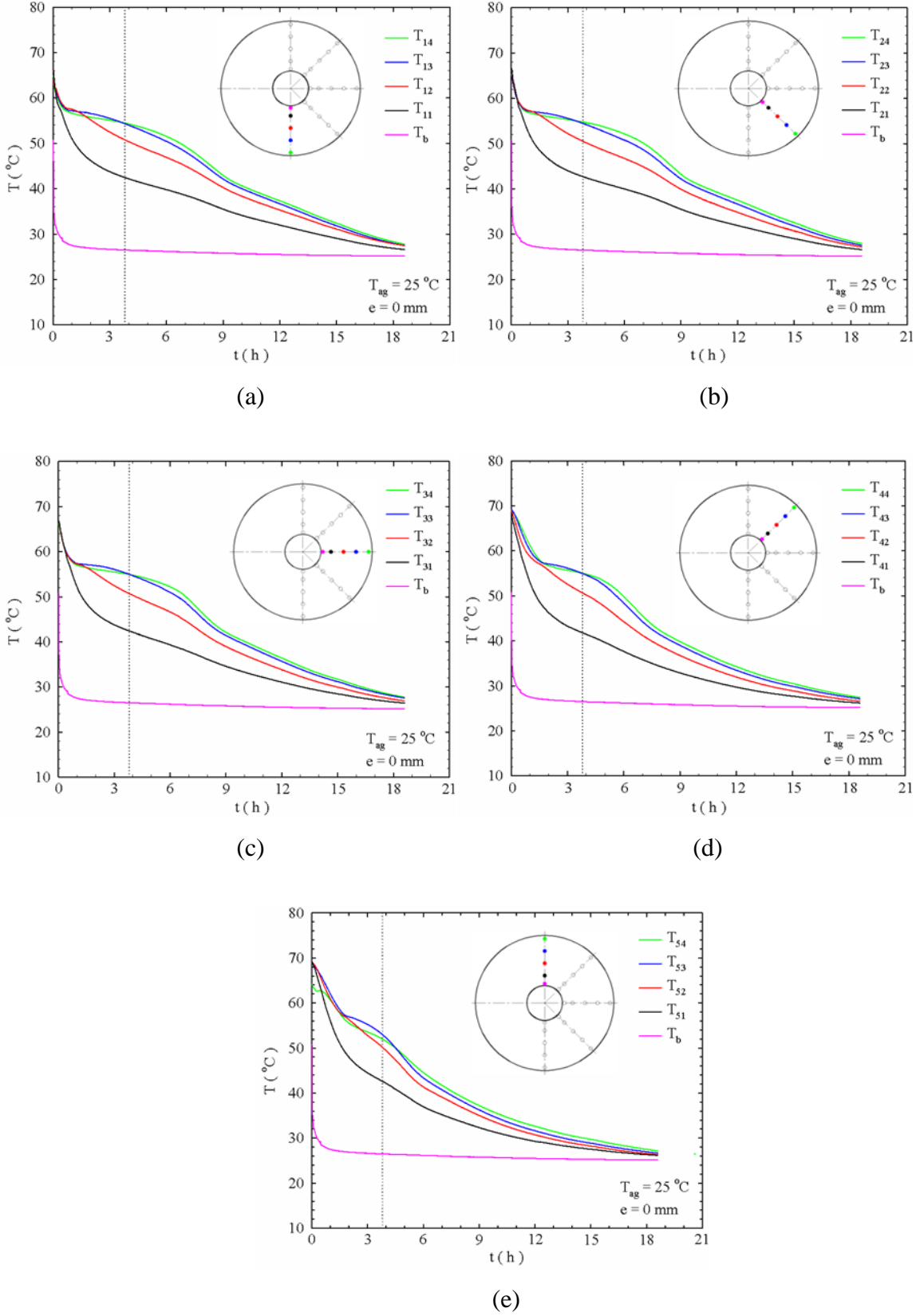
( $e=0, 10, 20$  ve  $30$  mm), geri kazanım sürelerinin, sırasıyla, yaklaşık olarak 4, 5, 6 ve 8 saat değerlerini aldığı grafikte görülmektedir. Benzer şekilde, akışkan giriş sıcaklığının azalışına bağlı olarak, geri kazanım sürelerinin azaldığı bir diğer önemli sonuçtur. Eksen kaçıklığının geri kazanım süresi üzerindeki etkisi farklı bir formda Şekil 45’de farklı bir şekilde verilmektedir.

Tez kapsamında, katılaşma (sıvı-katı dönüşümü) sürecine ait yapılan bütün çalışmalar, farklı akışkan giriş sıcaklıkları ve eksen konumları için özet halinde karşılaştırmalı olarak Şekil 46’da verilmektedir. İlgili değişimler dikkatle incelendiğinde, her bir akışkan giriş sıcaklığı için eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak geri kazanım sürelerinin eşmerkezli duruma göre arttığı görülmektedir. Bu artış düzeyleri nicel olarak her bir akışkan giriş sıcaklığı ve eksen konumu için Tablo 16’da verilmektedir.

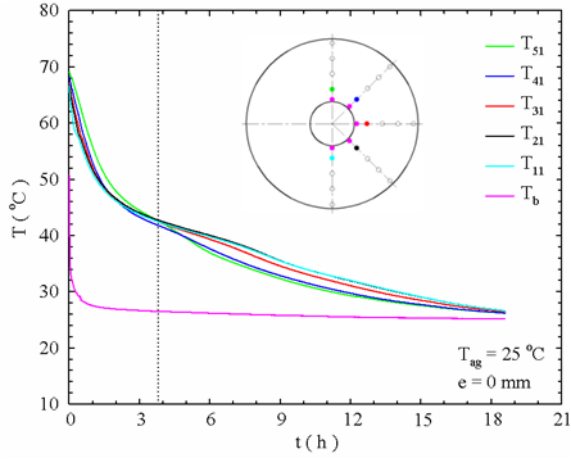
Tablo 16. Eksen kaçıklığına ve akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak katılaşma sürelerindeki artış oranları

Eksen konumu, $e$ (mm)	Artış oranı (%)		
	$T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$	$T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$
10	41	32	20
20	61	55	38
30	143	124	98

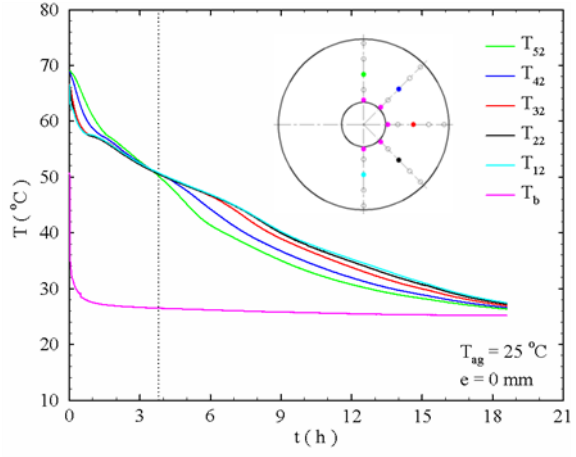
Tez kapsamında incelenen bütün geometriler için şarj ve deşarj süreçlerine ait depolanan ve geri kazanılan ısı miktarları akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Fakat, ilgili sıcaklık farklarının şarj ve deşarj süreçlerinin büyük bir bölümünde oldukça düşük düzeylerde olması (termoeleman hassasiyetinin altında olması,  $0,02^{\circ}\text{C}$ ) yapılacak kıyaslamaları tutarsız kılmıştır. Bu nedenle elde edilen değişimler, tez kapsamına dahil edilmemiştir.



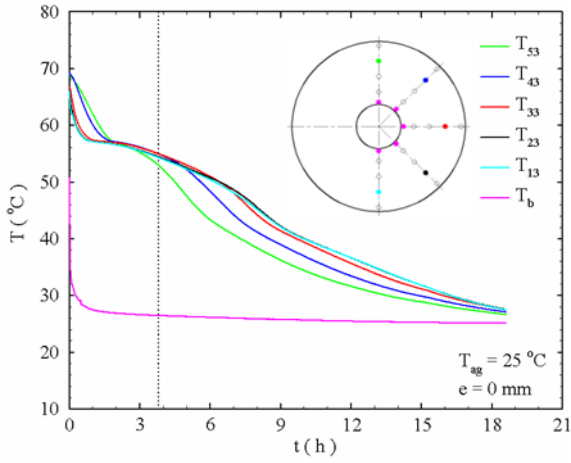
Şekil 35.  $e=0$  mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj)



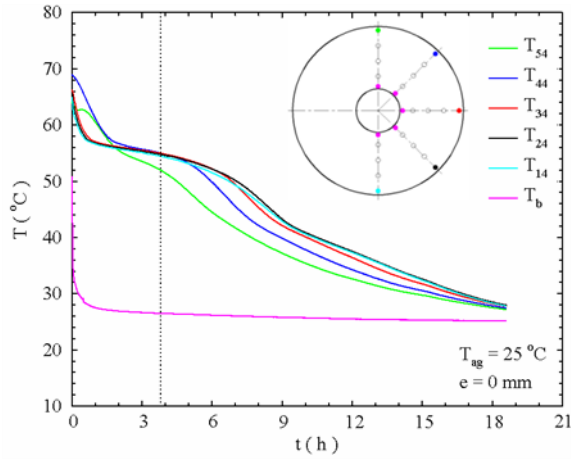
(a)



(b)

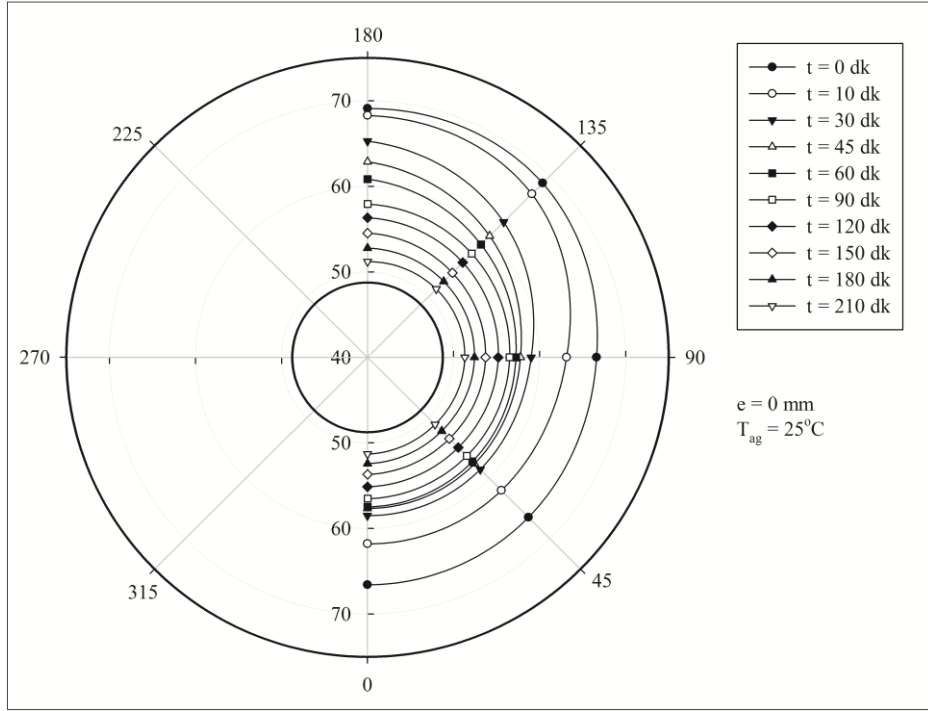


(c)

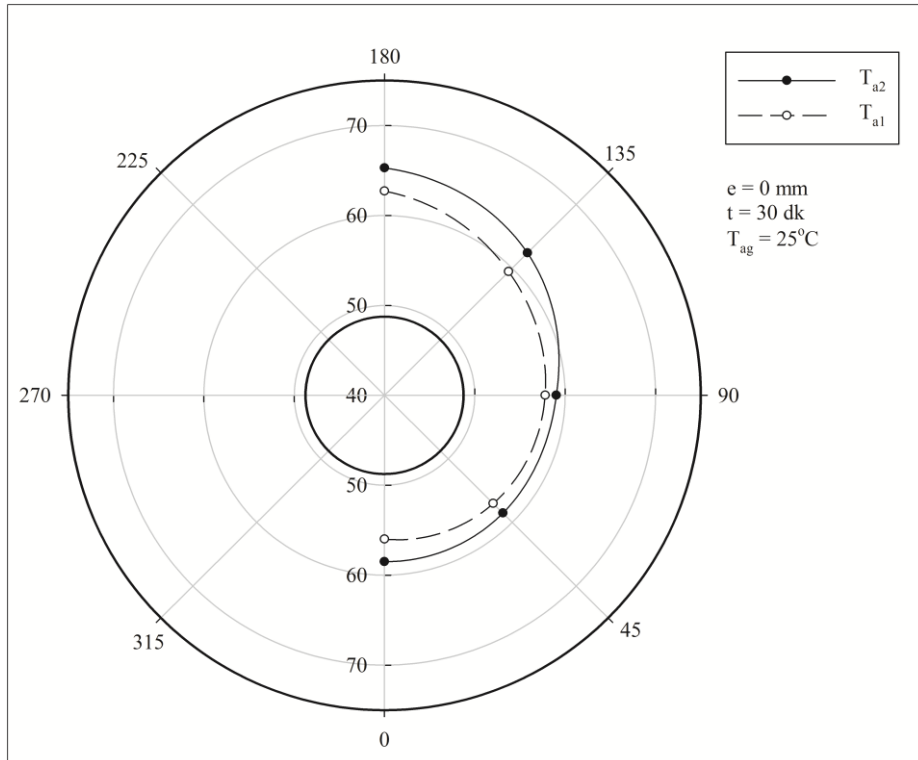


(d)

Şekil 36.  $e=0$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj)

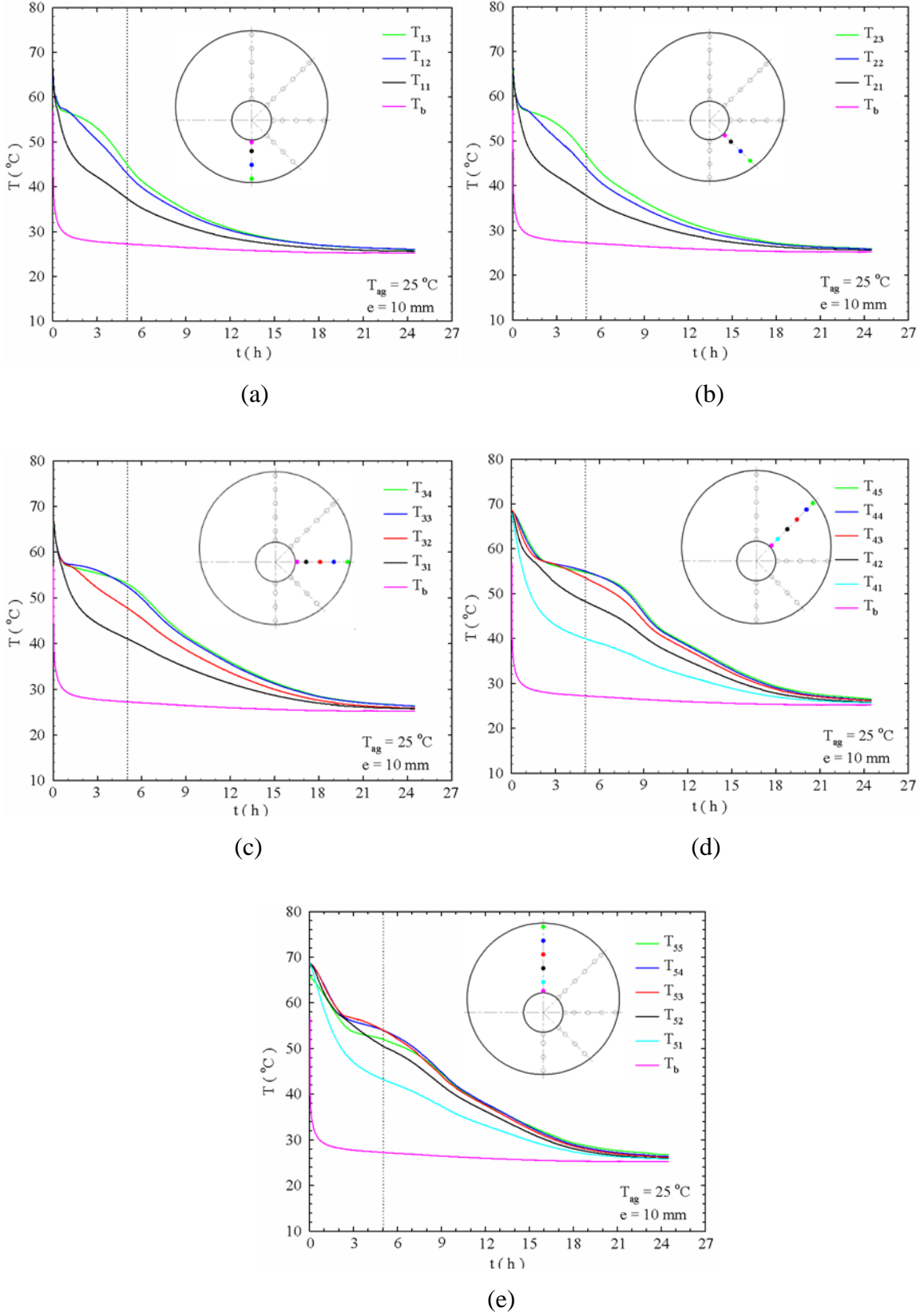


(a)

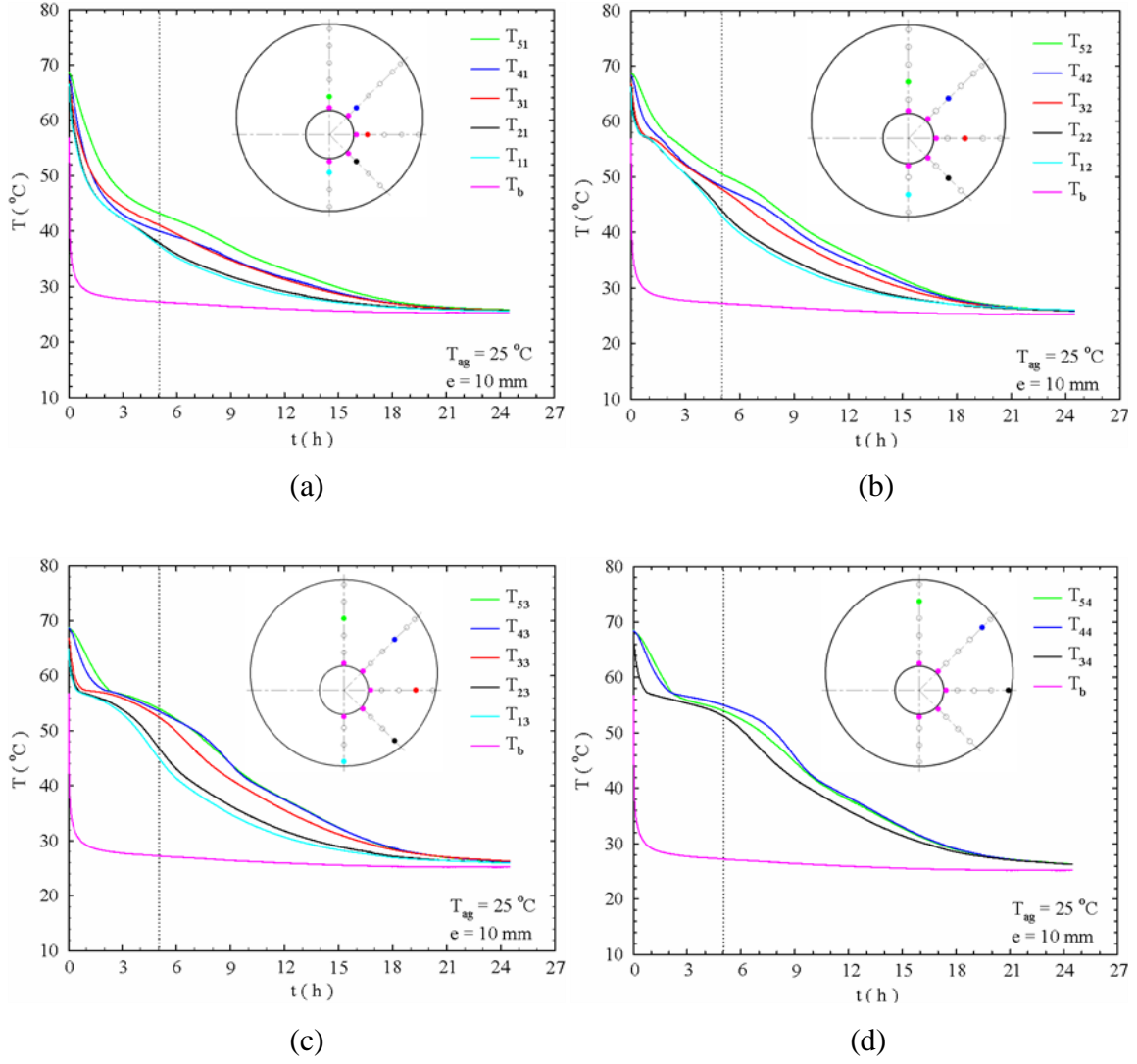


(b)

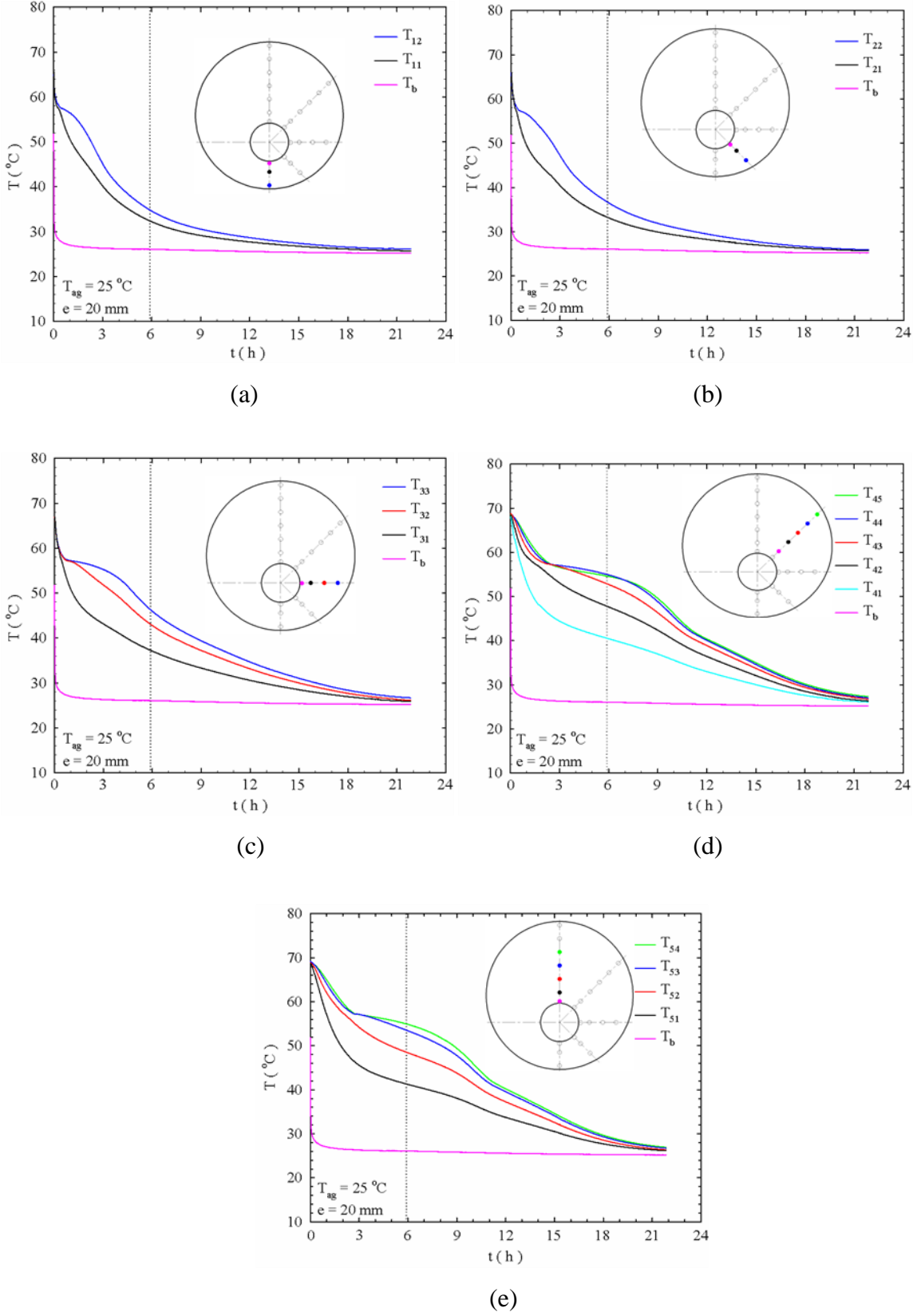
Şekil 37. Sıcaklık alanları (deşarj): ikinci yerel istasyon (a), birinci ve ikinci yerel istasyonların  $t$  anı için karşılaştırması (b)



Şekil 38.  $e=10$  mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj)

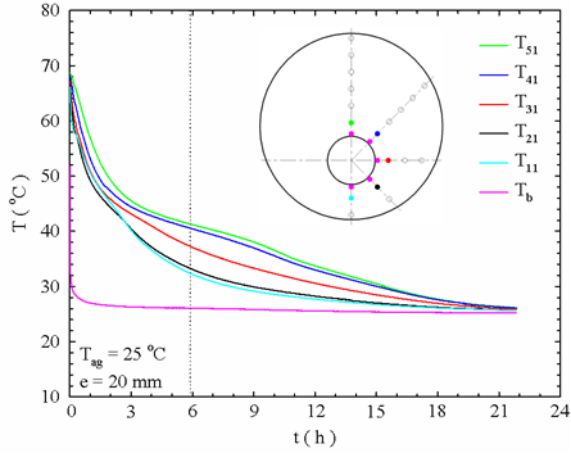


Şekil 39.  $e=10\text{ mm}$  konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj)

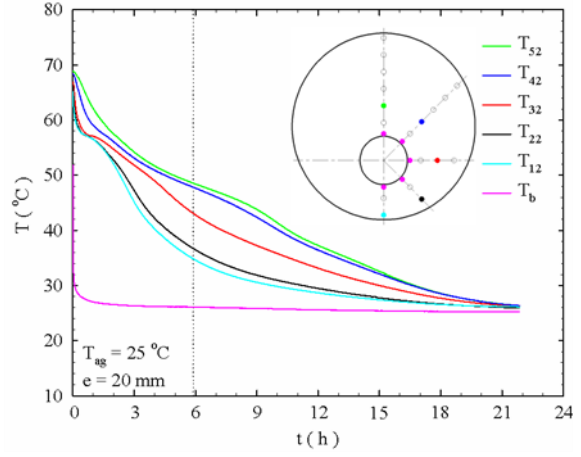


Şekil 40.  $e=20\text{ mm}$  konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj)

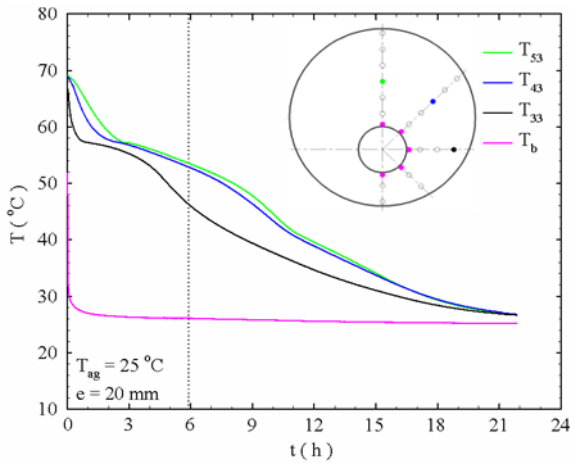




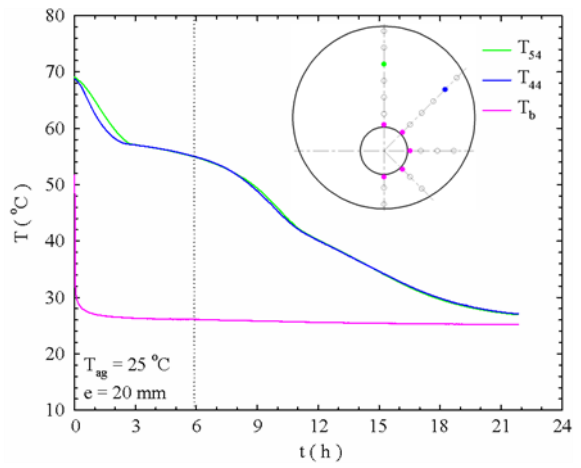
(a)



(b)

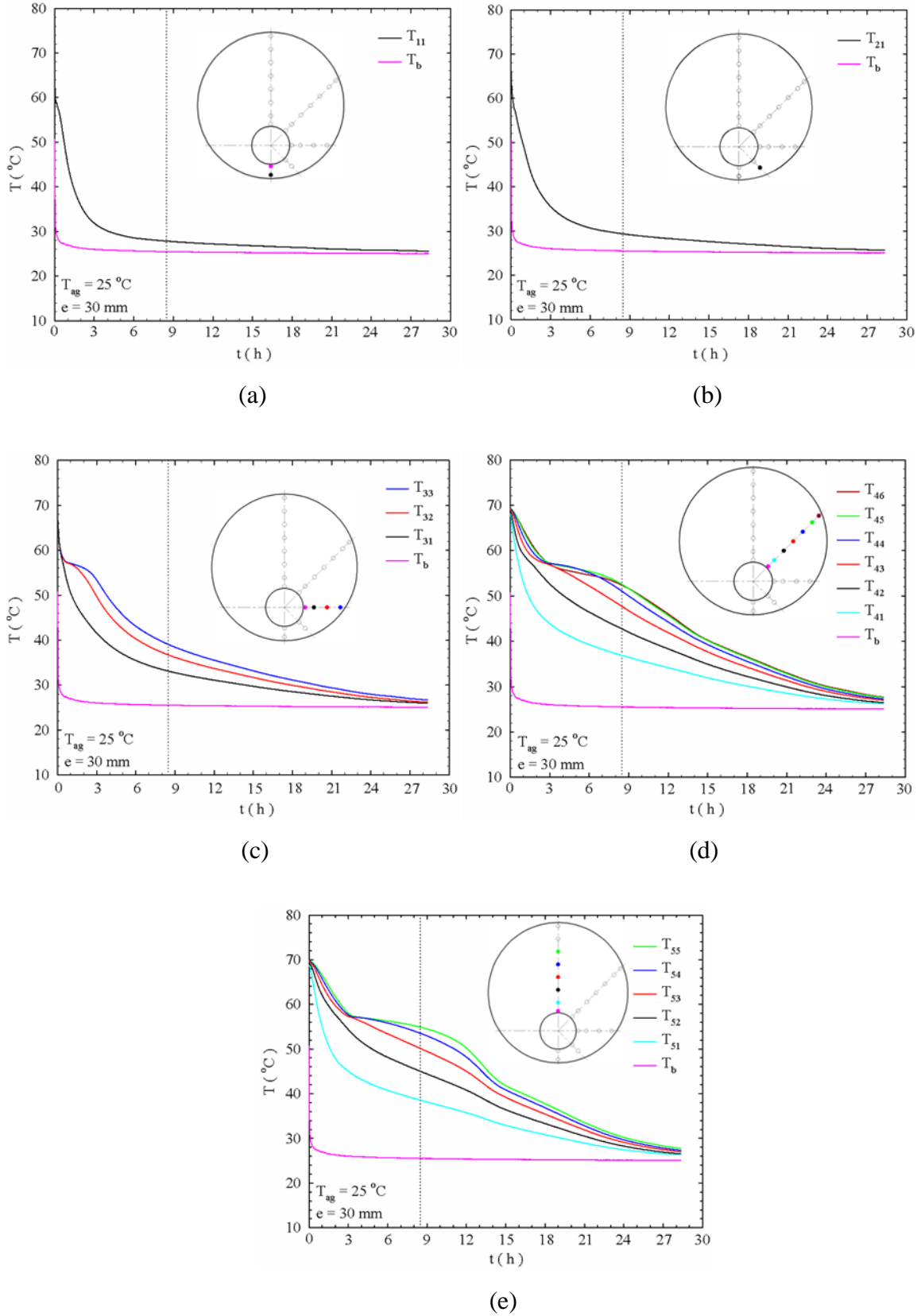


(c)

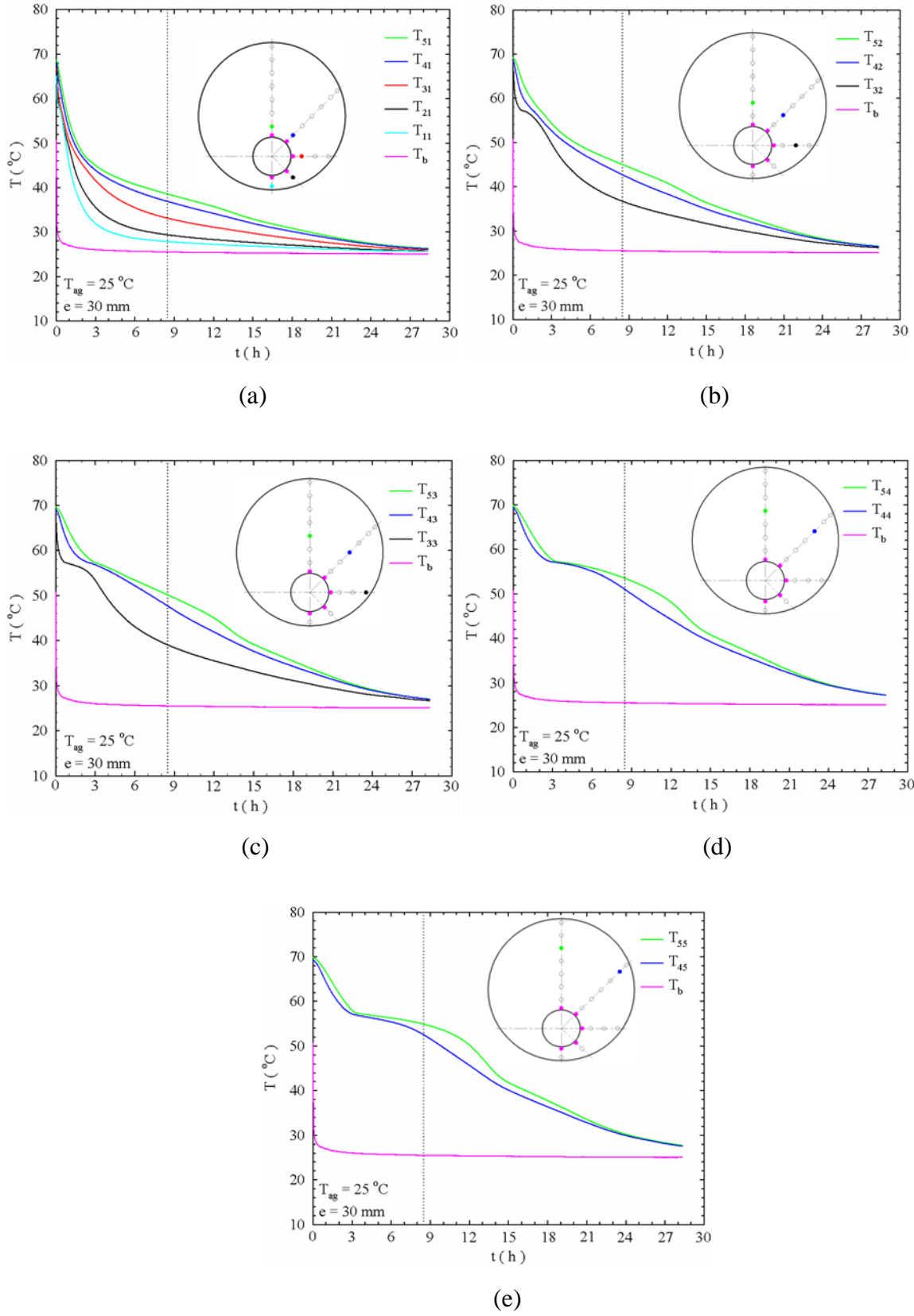


(d)

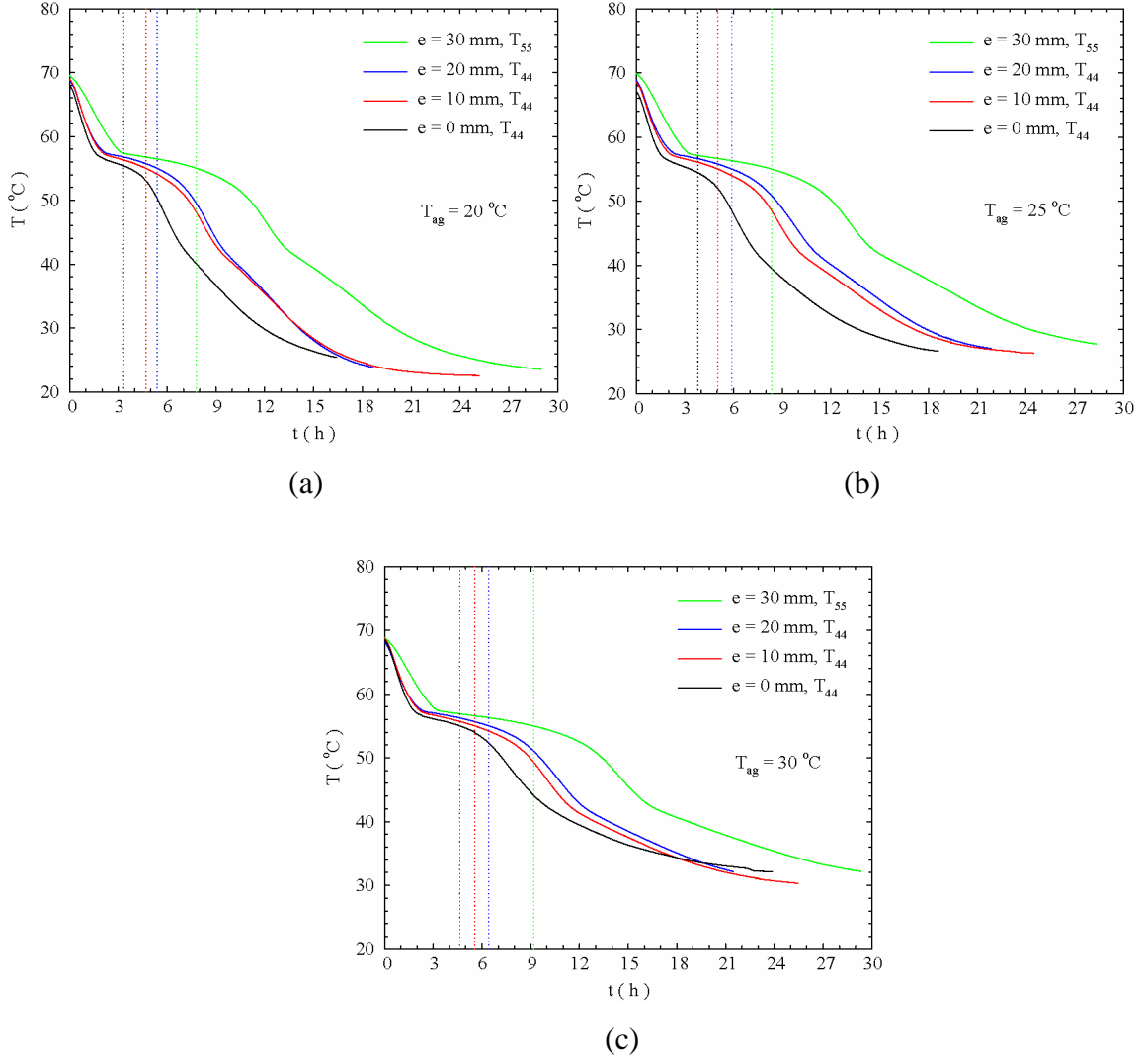
Şekil 41.  $e = 20$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj)



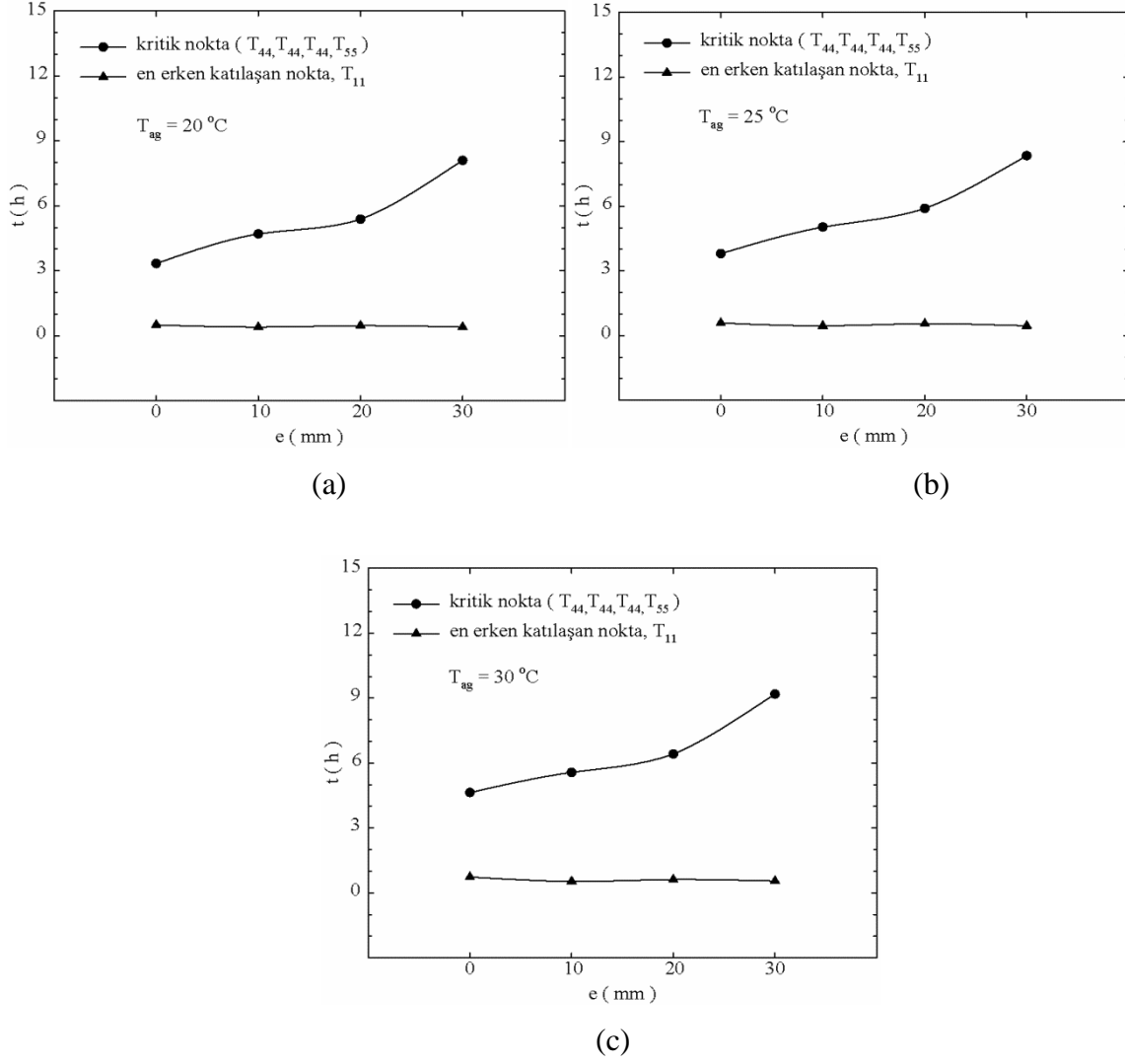
Şekil 42.  $e=30$  mm konumuna ait radyal doğrultudaki sıcaklık değişimi (deşarj)



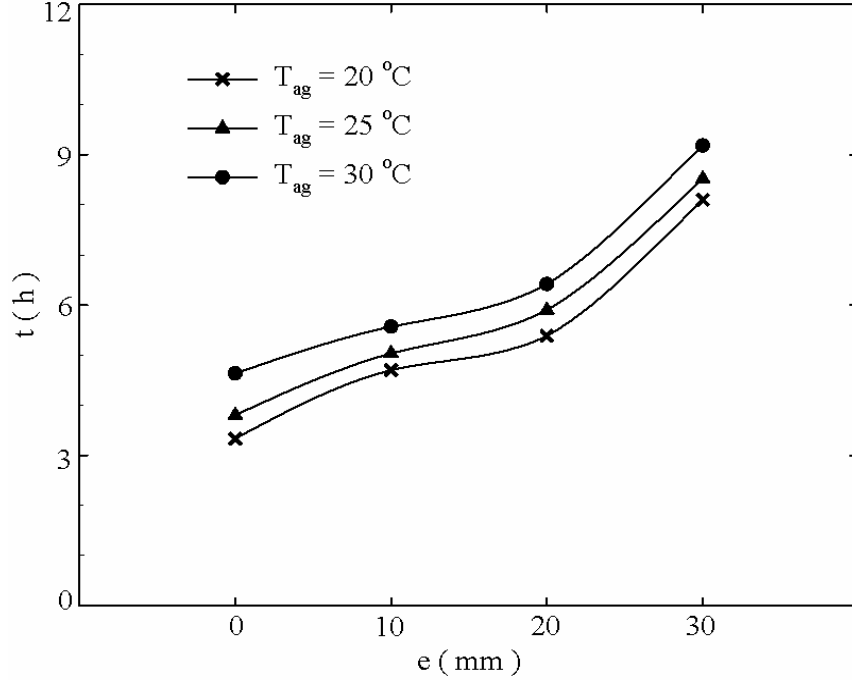
Şekil 43.  $e=30$  mm konumuna ait çevresel sıcaklık değişimi (deşarj)



Şekil 44. Kritik yerel istasyon sıcaklıklarının (farklı akışkan giriş sıcaklıklarında) eksen konumlarına bağlı sıcaklık değişimi (deşarj):  $T_{ag}=20$ °C (a),  $T_{ag}=25$ °C (b),  $T_{ag}=30$ °C (c)



Şekil 45. Eksen kaçıklığının farklı akışkan giriş sıcaklığında depolama süresine etkisi (deşarj):  $T_{ag}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (a),  $T_{ag}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b),  $T_{ag}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)



Şekil 46. Farklı akışkan giriş sıcaklıklarında eksen konumuna bağlı olarak erime sürelerinin karşılaştırması (deşarj)

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, FDM'nin erime ve katılaşma süreçlerine ait ısı depolama/geri kazanım karakteristikleri dört farklı eksen konumuna sahip halka aralık bir geometride ve üç farklı akışkan giriş sıcaklığında deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın eksen kaçıklığı etkisini konu alan ilk deneysel çalışma olduğu vurgulanmalıdır. Bu bağlamda, üretilen sonuçların konu ile ilgili yürütülecek sayısal/deneysel çalışmalara bir referans teşkil edeceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmektedir:

1. Depolama sürecinde, eksen kaçıklığının artışına bağlı olarak erime süreleri azalmıştır. Bu davranış, depo üst yarı bölgesinde meydana gelen doğal taşınımın daha geniş bir etki alanı bulması ile açıklanmaktadır. Erime sürelerindeki kısalma, akışkan giriş sıcaklığından bağımsız olarak (eşmerkez konuma kıyasla)  $e=10, 20$  ve  $30$  mm için sırasıyla %34, %53 ve %67 düzeyindedir.
2. Geri kazanım sürecinde, artan eksen kaçıklığı ile katılaşma süreleri uzamıştır. Bu durum, ısı deposunun alt bölgelerinde doğal taşınım mekanizmasının etkinliğinin artışı ile ilişkilendirilmiştir.  $T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$  için bu artış düzeyleri (eşmerkez konuma kıyasla)  $e=10, 20, 30$  mm için sırasıyla %32, %55 ve %124 düzeyindedir.
3. Depolama sürecinde, akışkan giriş sıcaklığındaki artış erime süresini kısaltmış, deşarj sürecinde ise akışkan giriş sıcaklığındaki azalma katılaşma süresini azaltmıştır.
4. Depolama sürecindeki kritik yerel nokta, bütün eksen konumları için haznenin en alt bölgesinde yer alan en dış yerel istasyondur. Geri kazanım sürecinde ise eksen kaçıklığına bağlı olarak haznenin üst bölgesindeki 4 veya 5 nolu hat üzerinde yer alan FDM içerisindeki en dış yerel istasyondur.
5. Katı-sıvı (şarj) faz dönüşümünü esas alan yatay olarak konumlandırılmış silindirik halka geometriye sahip ısı enerji depolama sistemlerinde ısı kaynağına uygulanacak eksen kaçıklığı aşağı yönlü olmalıdır.
6. Sıvı-katı (deşarj) faz dönüşümünü esas alan yatay olarak konumlandırılmış silindirik halka geometriye sahip ısı enerji depolama sistemlerinde ise ısı kaynağına uygulanacak eksen kaçıklığı yukarı yönlü olmalıdır.

## 5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, FDM ile ısı depolamada (sabit yüzey alanı) geometrik düzenlemelere gidilerek (pasif yöntem) doğal taşınımın iyileştirilmesine yönelik detaylı bir deneysel çalışma ortaya konmuştur. Bundan sonraki çalışmalara yön vermesi açısından aşağıda verilen önerilerin dikkate alınması faydalı olacaktır.

1. Daha geniş bir aralıkta eksen kaçıklıkları çalışmaya dahil edilerek şarj ve deşarj sürecine ait ampirik bağıntılar geliştirilebilir.
2. Çap oranı değiştirilerek ( $d/D$ ) erime ve katılaşma davranışları incelenebilir.
3. Farklı erime/katılaşma sıcaklıklarına sahip FDM'ler kullanılabilir.
4. Mevcut düzenleme için FDM içerisine nanopartikül ilavesi yapılarak şarj/deşarj davranışları incelenebilir.
5. Isı transfer borusu üzerine FDM'nin doğal taşınım etkisini bozmayacak şekilde kanatçık ilavesi yapılabilir.
6. Farklı kaçık eksenli depo geometrileri (dikdörtgen kesit vb.) için erime ve katılaşma süreçleri incelenebilir.
7. Yapılan deneysel çalışmalar, sayısal çalışmalar ile desteklenebilir. Böylece, eksen kaçıklığı, çap oranı ve akışkan giriş sıcaklığını kapsayacak ampirik bağıntılar geliştirilebilir.



## 6. KAYNAKLAR

- Abhat, A., 1983. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, Solar Energy, 30, 313–331.
- Akçay, M.,2006. Isıl Enerji Depolama Amaçlı Bazı Polimer Yağ Asidi Karışımlarının Hazırlanması ve Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Akgün, M., Aydın, O. ve Kaygusuz, K., 2007. Experimental study on melting/solidification characteristics of a parafin, Energy Conversion and Management, 48,669-678.
- Akgün, M., Aydın, O. ve Kaygusuz, K., 2007. Thermal energy storage behavior of aparaffin during melting and solidification, Energy sources, 28,405-413.
- Akgün, M., Aydın, O. ve Kaygusuz, K., 2008. Thermal energy storage performance of parafin in a novel tube-in-shell system, Applied Thermal Engineering, 28,405-413.
- Akgün, M.,2006. Parafinle Gizli Isı Depo Geometrisi Optimizasyonu Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Andersson, O., 1994. Aquifer Thermal Energy Storages İn Sweden - Experiences So Far And Market Potential. Proc. Of CALORSTOCK'94, 6th International Conference On Thermal Energy Storage, August, Espoo, Finland, Bildiriler Kitabı: 831-843.
- Andersson, O., 1997. ATES Utilization in Sweden An Overview, Proc. Of MEGASTOCK'97 7th International Conference On Thermal Energy Storage, June, Sapporo, Japan, Bildiriler Kitabı 2: 925-930.
- Andersson, O., Hellstrom, G. ve Nordell, B., 2000. Recent UTES Development İn Sweden. Terrastock 2000 8th International Conference On Thermal Energy Storage, August Stuttgart, Germany, Bildiriler Kitabı 1: 75-80.
- Andersson, O., Hellström, G. ve Nordell, B., 2003b. Heating And Cooling With UTES İn Sweden-Current Situation And Potential Market Development, Futurestock 2003 9th International Conference On Thermal Energy Storage, Warsaw, Poland, Bildiriler Kitabı: 209-215.
- Ataer, E.,O., 2006. Storage Of Thermal Energy, in Energy Storage Systems, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Aydın, O., Akgün, M. ve Kaygusuz, K., 2007. An experimental optimization study on a tube-in-shell latent heat storage, Int. J. Energy Res., 31, 274-287.
- Cao, Y., Faghri, A.ve Juhasz, A., 1991. A PCM/Forced Convection Conjugate Transient Analysis of Energy Storage Systems with Annular and Countercurrent Flows, Journal of Heat Transfer, 113, 37-42.

- Chen, C., Wang, L. ve Huang, Y., 2008, A Novel Shape-Stabilized PCM: Electrospun Ultrafine Fibers Based On Lauric Acid/Polyethylene Terephthalate Composite, Material Letters, 62, 3515-3517.
- Chen, S., Chen, C., Tin, C., Lee, T. ve Ke, M., 2000. An Experimental Investigation of Cold Storage in an Encapsulated Thermal Storage Tank, Experimental Thermal and Fluid Science, 23, 133-144.
- Choi, J.C. ve Kim, S.D., 1992. Heat Transfer Characteristics of a Latent Heat Storage System Using  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , Energy, 17, 1153-1164.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımı ile Termodinamik, Literatür Yayıncılık Ltd. Şti, İstanbul.
- Darzi, A.R., Farhadi, M., Sedighi, K., 2011, Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus, Applied Mathematical Modelling (baskıda)
- Demircioğlu, E., 2003. Türkiye İçin Sürdürülebilir Enerji Çevre Politikaları, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Dietz, D., 1984. Thermal Performance of a Heat Storage Module Using Calcium Chloride Hexahydrate, Journal of Solar Energy Engineering, 106, 106-111.
- Dinçer, İ. ve Rosen, M.A., 2002. Thermal Energy Storage Systems And Applications, John Wiley And Sons Ltd., İngiltere.
- Dinçer, İ., 2002. Thermal Energy Storage And Phase-Change Materials, Course On Porous Media, Haziran, Evora, Portugal, Bildiriler Kitabı: 17-21.
- Dinçer, İ., Dost, S., 1996. A perspective on Thermal Energy Storage Systems for Solar Energy Applications, International Journal of Energy Research, 20, 6, 547-557.
- Domanski, R., Wisniewski, T. ve Rebow, M., 1997, Experimental study of natural convection in melting of PCM in horizontal cylindrical annuli, Q/RT 96 - Eurotherm Series 50 - Edizioni ETS, Pisa.
- Dutta, R., Atta, A. ve Dutta, K.T., 2008. Experimental and numerical study of heat transfer in horizontal concentric annulus containing phase change material, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 86, 700-710.
- Erek, A., İlken, Z. ve Acar, M.A., 2005. Experimental and Numerical Investigation of Thermal Energy Storage with a Finned Tube, Int.J.Energy Research, 29, 283-301.
- Esen, M. ve Ayhan, T., 1996. 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, 1775-1785.

- Esen, M., Durmuş, A. ve Durmuş, A., 1998. Geometric Design of Solar- Aided Latent Heat Storage Depending on Various Parameters and Phase Change Materials, Solar Energy, 62, 1, 19-28.
- Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack S.A.K. ve Al-Hallaj S., 2004. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, Energy Conversion and Management, 45,1597-1615.
- Garg, H.P., Mullick, S., C. ve Bhargava, A., K., 1985. Solar Thermal Energy Storage, D.Reidel Publishing Company, New Delhi, India.
- Hadjieva, M., Kanev, S. ve Argirov, J., 1992. Thermophysical Properties of Some Paraffins Applicable to Thermal Energy Storage, Solar Energy Materials and Solar Cells,27, 181–187.
- Hale, D.V., Hoover, M.J. ve O'Neill, M.J., 1971. Phase Change Materials Hand Book, NASA, Marshal Space Flight Center, Alabama.
- Hasan,A., 1994. Thermal Energy Storage System with Stearic Acid as Phase Change Material, Energy Convers. Mgmt., 30, 10, 843-856.
- Hasnain, M.S., 1998a., Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials on Techniques, Energy Convers. Mgmt., 39, 11, 1127-1138.
- Hasnain, M.S., 1998b., Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part II : Cool Thermal Storage, Energy Convers. Mgmt., 39, 11, 1139-1153.
- Hiran, S., Suwondo, A. ve Mansoori, G., 1994. Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes fo Application as Phase Change Energy Storage Medium, Energy Sources 16, 117-128.
- International Energy Agency, 2002. World Energy Outlook. Chapter 2, 59 s.
- Ismail, K.A.R. ve Henriquez, J. R., 2000. Solidification of PCM Inside a Spherical Capsule, Energy Conversion and Management, 41, 173-187.
- Ismail, K.A.R., Alves C.L.F. ve Modesto, M.S., 2001. Numerical and Experimental Study on the Solidification of PCM Around a Vertical Axially Finned Isothermal Cylinder, Applied Thermal Engineering, 21, 53-57.
- Karaipekli,A.,2006. Faz Değişimli Enerji Depolama Maddelerinde Isıl İletkenliğin Zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Kaygusuz, K.,1992. Karadeniz Bölgesindeki Konutların Güneş Destekli Isı Pompaları Yardımıyla Isıtılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Keleş, S., 2003. Laurik-Miristik Asit Ötektik Karışımlarının Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Khillarkar, D.B., Gong, Z.X. ve Mujumdar, A.S., 2000. Melting of a Phase Change Material in Concentric Horizontal Annuli of Arbitrary Cross-Section, Applied Thermal Engineering, 20, 893-912.
- Kılıkış B. ve Kakaç, S., 1989. Energy Storage Systems, NATO ASI Series Kluwer Academic Publishers, London, İngiltere.
- Kimura, H. ve Kai J., 1988. Mixtures of Calcium Chloride Hexahydrate with Some Salt Hydrates or Anhydrous Salts as Latent Heat
- Lamberg, P., Lehtiniemi, R., ve Henell, A.M., 2004, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, International Journal of Thermal Sciences, 43, 277-287.
- Lane, G.A., 1983. Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. I. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Li, W., Zhang, D., Zhang, T., T., Ruan, D., Xing, D. ve Li, H., 1999. Study of Solid-Solid Phase Change of  $(n-C_nH_{2n+1}NH_2)_2MCl_4$  for Thermal Energy Storage, Thermochimica Acta, 326, 183-186.
- Lipnicki, Z. ve Weigand, B., 2012. An experimental and theoretical study of solidification in a free-convection flow inside a vertical annular enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 655-664.
- Liu, Z., Sun, X. ve Ma, C., 2005b. Experimental Study of The Characteristics of Solidification of Stearic Acid in an Annulus and Its Thermal Conductivity Enhancement, Energy Conversion and Management, 46, 971-984.
- Mattila, H.R., 2006, Intelligent Textiles and Clothing, Woodhead Publishing Limited, 506 s., Cambridge.
- Mazman, M., 2000. Güneş Enerjisinin Faz Değiştiren Organik Kimyasallarda Gizli Isı Şeklinde Depolanması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ng, K., W., Gong, Z., X. ve Mujumdar, A., S., 1998. Heat Transfer in Free Convection Dominated Melting of a Phase Change Material in a Horizontal Annulus, Int. Comm. Heat. Mas Transfer, 25, 5, 631-640.
- Özonur, Y., 2004. Düşük Sıcaklıkta Termal Enerji Depolanmasına Uygun Faz Değiştiren Maddelerin Mikrokapsüllenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Öztürk, H., 2008. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Paksoy, H., Ö., 1992. Thermal Analysis Of Heat Storage Materials And İntegrated Heat Pump and Theral Energy Storage, Doktora Tezi. Ç.Ü.Fen Bil. Ens.,Adana
- Paksoy, H.Ö. ve Evliya H., 2000. Termal Enerji Depolamanın Hava Kalitesi Yönetimine Katkısı. Türkiye 8. Enerji Kongresi, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı 2: 235-246.
- Pal, D. ve Joshi, Y.K., 2001. Melting in a Side Heated Tall Enclosure by a Uniformly Dissipating Heat Source, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 375-388.
- Sarı, A., 2005. Eutectic Mixtures Of Some Fatty Acids For Low Temperature Solar Heating Applications: Thermal Properties and Thermal Reliability. Applied Thermal Engineering, 25, 2100–2107.
- Sarı, A., Bazı Yağ Asitleri ve Ötektik Karışımlarının Enerji Depolayıcı Madde Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gaziosman Paşa Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2000
- Sharma, S.D. ve Sagara, K., 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, International Journal of Breen Energy, 2, 1-56.
- Son, C.,H. ve Morehouse, J., H., 1991. An Experimental Investigation of Solid-State Phase-Change Materials for Solar Thermal Storage, Journal of Solar Energy Engineering, 113, 244-249.
- Stritih, U., 2004. An Experimental Study Of Enhanced Heat Transfer In Rectangular PCM Thermal Storage, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 2841-2847.
- Tan, F.L., Hosseinizadeh, S., F., Khodadadi, J., M.ve Fan, L., 2009. Experimental and Computational Study of Constrained Melting of Phase Change Material (PCM) Inside A Spherical Capsule, 52,3464-3472.
- Telkes, M., 1974.Solar Energy Storage, Ashrae Journal, September, 38-44.
- 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, 648-660.
- Tutuş, A., 2012. Türkiye Enerji Sistemi İçin Bir Zorunluluk Enerji Depolama Sistemleri, Enerji Enstitüsü
- TÜBİTAK., 2003. Vizyon 2023 Teknoloji Öngörü Projesi Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli Raporu, Ankara.
- URL-1, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Parafin>, 11 Aralık 2012.
- Ünalın, S., 2005. Alternatif Enerji Kaynakları Ders Notları, Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü (Basılmamış)

- Velraj, R., Seeniraj, B., Hafner, B., Faber, C. ve Schwarzer, K., 1999. Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System, Solar Energy, 65, 171–180.
- Wang, J., Ouyang, Y. ve Chen, G., 2001. Experimental Study on Charging Processes of a Cylindrical Heat Storage Capsule Employing Multiple-Phase-Change Materials, I. J. Energy Research, 25, 439-447.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W., Liu, T., Shi, Z., Tang, R. ve Wang, C., 2000a. Heat Storage Performance of The Binary Systems Neopentyl Glycol/Pentaerythritol and Neopentyl Glycol/Trihydroxy Menthylaminomethane as Solid Phase Change Materials, Energy Conservation and Management, 41, 129-134.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W. ve Wang, C., 2000b. Micromechanics of Heat Storage in a Binary system of Two Kinds of Polyalcohols as a Solid-Solid Phase Change Material, Energy Conversion and Management, 41, 135-144.
- Yang, W., J., 1989. Thermal Energy Storage Systems And Their Dynamic Behavior, Energy Storage Systems, NATO ASI Series, Kluwer Academic Pub., The Netherlands.
- Yılmaz, M., Ö., 2005. Yeraltı Termal Enerji Depolamada Kullanılan Farklı Dolgu Maddelerinin Termal Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Adana.
- Yılmaz, S., 2008. Soğutma Uygulamaları İçin Faz Değiştiren Maddelerde termal Enerji Depolama, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Zalba, B., Marín, J., M., Cabeza, L., F. ve Mehling, H., 2003. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 251-283.
- Zhang, Y., Faghri, A., 1997. Analysis of freezing in an eccentric annulus, Journal of Solar Energy Engineering, 119, 237

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yusuf YAZICI, 1986 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimi bu ilde tamamladı. 2005 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. Aynı zamanda Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Çift Anadal Programını (ÇAP) 2011 yılında başarı ile tamamladı. 2011 yılından itibaren KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evlidir.