

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BUZLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TERMAL
VE EKONOMİK ANALİZLERİ**

**Hazırlayan
Doğan ERDEMİR**

**Danışman
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP**

Doktora Tezi

**Ağustos 2017
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BUZLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TERMAL
VE EKONOMİK ANALİZLERİ**

**Hazırlayan
Doğın ERDEMİR**

**Danışman
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP**

Doktora Tezi

**Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FDK-2016-6316 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2017
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Doğan ERDEMİR

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Buzlu Enerji Depolama Sistemlerinin Termal ve Ekonomik Analizleri”
adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma
Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Doğan ERDEMİR

Danışman
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Makina Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP danışmanlığında **Doğan ERDEMİR** tarafından hazırlanan “**Buzlu Enerji Depolama Sistemlerinin Termal ve Ekonomik Analizleri**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

.... / /

JÜRİ :

Başkan : Prof. Dr. Yunus Ali Çengel

Üye : Prof. Dr. İbrahim Dinçer

Üye : Prof. Dr. Necdet Altuntop

Üye : Prof. Dr. Sebahattin Ünalın

Üye : Prof. Dr. Veysel Özceyhan

ONAY :

Bu tezin kabülü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.... / /

Enstitü Müdürü
Prof.Dr. Mehmet AKKURT

TEŞEKKÜR

"Bir Buz Depolama Sisteminin Termoekonomik İncelenmesi ve Optimizasyonu" başlıklı tez çalışmamda verdiği maddi ve manevi tüm destekler için danışmanım Sayın Prof.Dr. Necdet ALTUNTOP'a teşekkür ederim. Tez konusunun belirlenmesinde ve yürütülmesinde sağladıkları tüm katkılar için saygıdeğer hocalarım Prof.Dr. Yunus Ali ÇENGEL ve Prof.Dr. İbrahim DİNÇER'e teşekkürlerimi arz ederim. Alışveriş merkezindeki BED sisteminin kurucu firması Temas Mühendislik'in genel müdürü Sayın Şerif DUMAN Bey'e ve tüm çalışanlarına yardımları ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen araştırma görevlisi arkadaşlarım Orhan KEKLİKÇİOĞLU, Toygun DAĞDEVİR, Umut ÇALIŞKAN, Kemal ARSLAN, Mevlüt HAKAN ve Erdem ARSLAN'a teşekkür ederim.

Bilimsel düşünce üzerine sağlamış olduğu büyük katkılardan dolayı Sayın Prof.Dr. A.M.Celal ŞENGÖR Hocam'a müteşekkirim.

Her şeyden öte vefatı ile beni derin üzüntüye boğan, ancak hayatta olduğu her zaman yanımda olmaya çalışan ve bundan sonrada manevi olarak yanımda olacağına inandığım canım annem Ayşe ERDEMİR'e Allah'tan rahmet diliyorum. Kendisine beni bu günlere getirdiği ve her zaman, her koşulda yanımda olduğu için minnettarım.

Tez çalışmam süresince, destek vermek için çocuk doğurmak dahil olmak üzere her türlü fedakârlığı yapan eşim Gamze'ye teşekkür ederim. Ayrıca sürekli kucakta gezmek isteyip, beni çalıştırmayan dünya tatlısı oğlum Demir'e de sevgilerimi sunarım. İyi ki varsınız. Ablam Gül ELDEM'e maddi-manevi, her zaman ve her koşulda yanımda olduğu için minnettarım. Son olarak verdikleri maddi ve manevi desteklerden dolayı annem Filiz ESEN ve babam Ahmet ESEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamı "2211-C Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı" kapsamında destekleyen "TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığına" teşekkürlerimi sunarım.

BUZLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TERMAL VE EKONOMİK ANALİZLERİ

Doğan ERDEMİR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Ağustos 2017

Tez Danışman : Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

ÖZET

Soğutma sistemleri günümüzde önemli bir ihtiyaç kaynağıdır. Bu yüzden soğutma sistemleri kullanıldığı mekânlarda ciddi maliyet oluşturmaktadır. Buzda enerji depolama (BED) sistemi soğutma maliyetlerini düşürmek için kullanılabilecek en elverişli yöntemlerden biridir. Bu tez çalışmasında Ankara’da bulunan GİMSA alışveriş merkezinin soğutma maliyetlerini düşürmek için kullanılan BED sistemi incelenmiştir. Tez çalışması; BED sisteminin termodinamik ve ısı geçişi açısından incelendiği makro seviye çalışmalar, BED sistemindeki kapsüllerin davranışının incelendiği mikro seviye çalışmalar ve sistemin ekonomik faydalarının incelendiği ekonomik analiz çalışmaları olmak üzere üç temel başlıkta yürütülmüştür. Ayrıca GİMSA için optimum BED kullanım stratejisini belirlemek için 8 farklı BED kullanım stratejisinin 10 yıl içerisinde sağlayacağı kâr miktarı ve geri ödeme süresi belirlenmiştir.

Makro seviyede çalışmalardan; enerji analizinin sistem performansını belirlemede tek başına yeterli olmadığı, enerji analizinin yanında ekserji analizinin de mutlaka yapılması gerektiği belirlenmiştir. Sistemdeki ek büyük ekserji yok oluşları enerji boşaltma periyodunda gerçekleşmektedir. Mikro seviye çalışmaların sonucunda GİMSA’da kullanılan ticari buz kapsülü modeli, normal bir küre kapsüle göre daha yüksek ısıl performans göstermiştir. Ekonomik çalışmaların sonucunda ise GİMSA’daki BED sistemi ile 10 yılın sonunda 1,764,825 TL kâr elde edilebileceği ve sistemin geri ödeme süresinin 2.7 yıl olduğu hesaplanmıştır. Tam depolama stratejisi 10 yılın sonunda en yüksek kârı sağlarken, pik saatler için depolama stratejisi en kısa geri ödeme süresini sağlamıştır. Kısmi depolama stratejilerinden en yüksek kar pik saatler için depolama stratejisinde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Buzda enerji depolama, BED, Soğuk ısıl enerji depolama, Buz kapsülü, Buz bankası

THERMAL AND ECONOMIC ANALYSES OF ICE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS

Doğan ERDEMİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph.D. Thesis, August 2017

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

ABSTRACT

Air conditioning systems have become an important need nowadays. Therefore, air conditioning systems cause high costs in the building where they are used. Ice thermal energy storage (ITES) systems are one of the most convenient methods that can be used to reduce cooling costs. In the present study, ITES system which is used to reduce cooling cost of the GİMSA shopping center in Ankara has been investigated. The thesis consists three main study areas, which are micro level studies, micro level studies and economic analyses. In macro level studies, ITES system has been investigated in the terms thermodynamic and heat transfer. In micro level studies, the capsule behavior has been examined numerically. In economic analyses, economic benefit of the ITES system which is used in GİMSA has been determined. In addition, in order to determine the optimum ITES utilization strategy for GİMSA, the amount of profits within 10 years and pay back periods of 8 different ITES utilization strategies have been determined.

It has been determined from macro level studies that the energy analysis isn't enough to determine the system performance and that the exergy analysis must be performed in addition to energy analysis. From the micro level studies, it has been determined that the commercial ice capsule used in GİMSA showed higher thermal performance than a normal sphere capsule. From the economic analyses, it is estimated that ITES system of GİMSA can obtain 1,764,825 TL profit within 10 years and the payback period of the system is 2.7 years. Full storage strategy provides the highest profit at the end of 10 years, while peak hour storage strategy ensures the shortest payback period. The among the partial storage strategies, peak hour storage strategy made the highest profit.

Keywords: Ice thermal energy storage, ITES, Cold thermal energy storage, Ice capsule, Ice bank.

İÇİNDEKİLER

BUZLU ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN TERMAL VE EKONOMİK ANALİZLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER	xi
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM GENEL BİLGİLER

1.1. Enerji Depolama	7
1.2. Isıl Enerji Depolama	9
1.2.1. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Prensibi . . .	11
1.2.2. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Faydaları ve Tasarım Kriterleri	12
1.2.3. Isıl Enerji Depolamanın Çeşitleri	13
1.2.3.1. Duyulur Isı Enerjisi Depolama	14
1.2.3.2. Gizli Isıl Enerji Depolama	16
1.2.3.3. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)	17

1.3. Soğuk Isıl Enerji Depolama	19
1.4. Buzda Soğuk Isıl Enerji Depolama	21
1.4.1. Statik BED Sistemleri	22
1.4.1.1. Boru Üzerinde Buzlanma (ice-on-coil) Yapılan BED Sistemleri	22
1.4.1.2. Kapsüllü (encapsulated) BED Sistemleri	24
1.4.2. Dinamik BED Sistemleri	26
1.4.2.1. Buz Hasatı (ice harvester) BED Sistemleri	26
1.4.2.2. Buz Çamuru (ice slurry) BED Sistemleri	26
1.5. Bölüm Sonu Değerlendirmesi	28
2. BÖLÜM LİTERATÜR TARAMASI	
2.1. Literatür Taraması	30
2.2. Dünya Geneline Yapılmış Olan Ticari Uygulamalar	42
2.3. Bölüm Sonu Değerlendirmesi	46
3. BÖLÜM BUZ DEPOLAMA SİSTEMİNİN VE MAHÂLİN TANITIMI	
3.1. Alışveriş Merkezinin ve Mahâlin Tanıtımı	49
3.2. Çalışma Kullanılan Mahalin Elektrik Tarife Bilgisi	51
3.3. Alışveriş Merkezinde Kullanılan BED Sisteminin Detayları	53
4. BÖLÜM MODELLEME VE ANALİZ	
4.1. Makro Seviyede Çalışmalar	58
4.1.1. Isıl Enerji Depolama Sistemlerindeki Temel Termodinamik Kavramlar	58
4.1.2. Makro Seviyede Termodinamik Analizler	61
4.1.2.1. Buz Depolama Tankının Termodinamik Analizi	61
4.1.2.2. Kütle Dengesi	62
4.1.2.3. Enerji Dengesi	63
4.1.2.4. Entropi Dengesi	64
4.1.2.5. Ekserji Dengesi	66

4.1.3. Buz Depolama Tankının Isı Kazancının Hesaplanması . .	67
4.1.4. Isı Değiştiricisinin Termodinamik Analizi	69
4.1.5. Soğutma Ünitesinin Termodinamik Analizi	70
4.1.6. Makro Seviyede BED Tankı İçerindeki Isı Geçişi Analizi	72
4.2. Mikro Seviyede Çalışmalar	76
4.2.1. Sayısal Model	76
4.2.2. Sayısal Prosedür	79
4.3. BED Sisteminin Ekonomik Açından Değerlendirilmesi	80
4.3.1. GİMSA'da Kullanılan BED Sisteminin Ekonomik Açından Değerlendirilmesi	81
4.3.2. Buz Depolama Sisteminin Farklı BED Kullanım Şartlarında Ekonomik Analizi	82
4.3.3. Alışveriş Merkezi İçin Düşünülen BED Kullanım Stratejileri	83
4.3.4. BED Kullanım Stratejileri Göre İlk Yatırım Maliyetleri .	85
4.4. Bölüm Sonu Değerlendirmesi	87

5. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Makro Seviye Çalışmaların Sonuçları	89
5.1.1. Makro Seviye Termodinamik Analiz Sonuçları	89
5.1.1.1. BED Tankının Termodinamik Açından Değerlendirilmesi	89
5.1.1.2. Isı Değiştiricisinin Termodinamik Açından Değerlendirilmesi	92
5.1.1.3. Soğutma Sisteminin Termodinamik Açından Değerlendirilmesi	93
5.1.1.4. Alışveriş Merkezinde Kullanılan BED sisteminin Termodinamik Açından Değerlendirilmesi	94
5.1.2. Makro Seviyede Isı Geçişi Analizi Sonuçları	100
5.2. Mikro Seviye Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar	106
5.2.1. Sayısal Modelin ve Çözüm Prosedürünün Doğrulanması .	106
5.2.2. Sayısal Çözümlerlerden Elde Edilen Sonuçlar	108

5.3. BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi	118
5.3.1. GİMSA’da Kullanılan BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi	118
5.3.2. Sistemin Farklı BED Kullanım Stratejilerinde Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi	121

6. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	147



KISALTMALAR VE SİMGELER

KISALTMALAR

<i>BED</i>	: Buzda enerji depolama
<i>FDM</i>	: Faz değıştiren malzeme
<i>GED</i>	: Gizli enerji depolama
<i>ITA</i>	: Isı transferi akışkanı
<i>KH</i>	: Kontrol hacmi
<i>TD1K</i>	: Termodinamiğin birinci kanunu
<i>TD2K</i>	: Termodinamiğin ikinci kanunu
<i>HTF</i>	: Isı transferi akışkanı

SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
ρ	Yoğunluk	kg/m^3
$\dot{m}$	Kütleli debi	kg/s
m, m_{KH}	Kütle	kg
$\dot{V}$	Hacimsel debi	m^3/s
V	Hacim	m^3
W_{pompa}	Pompa gücü	kW
e	Birim kütle için enerji miktarı	kW/kg
E	Enerji miktarı	kW
ex	Birim kütle için ekserji miktarı	kW/kg
Ex	Ekserji miktarı	kW
S	Entropi	kW
s	Özgöl entropi	kW/kg
T	Sıcaklık	$^{\circ}C, K$
T_o, T_{∞}	Çevre sıcaklığı	$^{\circ}C, K$
c, c_p	Özgöl ısı	$J/kg K$
t	Zaman	sn
$Q_{kayıp}$	Isı kazancı, kaydı	kW
F	Sıvı hacmin katı hacme oranı	
u	İç enerji	J/kg
R_T	Isıl direnç	$W/m^2 K$
A	Isı geçiş yüzey alanı	m^2
S	Entropi	kW
s	Özgöl entropi	kW/kg
I	Ekserji yok oluşu	kW
h, h_{ic}, h_{dis}	Isı taşıma katsayıları	$W/m^2 K$
r	Yarıçap	m
D	Çap	m
k	Isı iletim katsayısı	$W/m K$
ν	Viskozite	m^2/s

ν	Viskozite	m^2/s
ϵ	Gözeneklilik	
COP	Performans katsayısı	
$\dot{q}_d$	Tank cidarından olan ısı akısı	kW/m^2
T_c	Tank merkezindeki sıcaklık	$^{\circ}C, K$
T_{FDM}	Faz değıştirme sıcaklığı	$^{\circ}C, K$
z	Tank tabanından olan mesafe	m

Alt İndisler

yukleme, ch	Enerji yükleme periyodu
boşaltma	Enerji boşaltma periyodu
giris	Kontrol hacmine giriş
çıkış	Kontrol hacminden çıkış
a,b,c,d,e,f,g,h	Kontrol hacminlerin giriş ve çıkışlarındaki hatlar
i	Her hangi bir hattı
o, ∞	çevre
k	katı hal
s	sıvı hal
iç	BED tankının iç kısmı
dış	BED tankının dış kısmı
p,water	su pompası
p,ITA	ITA pompası
komp	Kompresör
FDM	Faz değıştirme

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Duyulur ve gizli ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılabilir materyaller [6]	14
Tablo 1.2.	Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan bazı materyaller ve 20 °C'deki özellikleri	15
Tablo 3.1.	Ankara iline ait 1950-2014 yılları arasındaki meteorolojik veriler [5]	51
Tablo 3.2.	Alışveriş merkezinde kullanılan üçlü tarife elektrik birim fiyatları .	52
Tablo 4.1.	Su, buz, hava ve ITA'nın sayısal analizlerde kullanılan fiziksel özellikleri	80
Tablo 4.2.	GİMSA'da soğutma sistemi için fatura edilen elektrik miktarları .	82
Tablo 4.3.	BED kullanım stratejileri ve depolanan enerji miktarları	83
Tablo 4.4.	BED sisteminde kullanılan makine, teçhizat, ekipmanlar ve bunların ilk yatırım miktarları	86
Tablo 5.1.	BED sistemindeki her bir hat için sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değerleri	91
Tablo 5.2.	Buz depolama tankı için enerji yükleme, boşaltma ve bekleme periyotlarında enerji ve ekserji verimleri	91
Tablo 5.3.	Plakalı ısı değiştiricisinin giriş ve çıkışlarındaki sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değerleri	93
Tablo 5.4.	Haziran ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri	96
Tablo 5.5.	Temmuz ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri	97
Tablo 5.6.	Ağustos ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri	98
Tablo 5.7.	$T_{giris} = 263 \text{ K}$ (-10°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri .	112
Tablo 5.8.	$T_{giris} = 265 \text{ K}$ (-8°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri .	113

Tablo 5.9. $T_{giris} = 267\ K$ ($-6\ ^\circ\text{C}$) olduğu durumda enerji yükleme süreleri .	113
Tablo 5.10. $T_{giris} = 269\ K$ ($-4\ ^\circ\text{C}$) olduğu durumda enerji yükleme süreleri .	114
Tablo 5.11. $T_{giris} = 271\ K$ ($-2\ ^\circ\text{C}$) olduğu durumda enerji yükleme süreleri .	114
Tablo 5.12. EnerjiSA tarafından GİMSA'nın soğutma sistemine fatura edilmiş elektrik tüketim bedelleri	122
Tablo 5.13. Normal soğutma sisteminin tekli tarifiedeki elektrik tüketim maliyetleri	123
Tablo 5.14. Normal soğutma sisteminin üçlü tarifiedeki elektrik tüketim maliyetleri	124
Tablo 5.15. Normal soğutma ve 8 farklı BED kullanım stratejisinin saatlik çiller kullanımı	125
Tablo 5.16. Normal soğutma ve 8 farklı BED kullanım stratejisinin saatlik elektrik tüketim maliyeti	126
Tablo 5.17. İncelenen BED kullanım stratejileri için ilk yatırım maliyeti ve pik soğutma yüküne göre yıllık elektrik tüketim maliyetleri	129

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1.	Dünyadaki elektrik tüketiminin yıllara göre değişimi [3]	2
Şekil 1.1.	Enerji depolama metotlarının sınıflandırılması	9
Şekil 1.2.	Isıl enerji depolama sistemleri için temel üç prosesin şematik olarak gösterimi	12
Şekil 1.3.	Suyun ısı değişimi miktarları (a) duyulur ısı değişimi, (b) gizli ısı değişimi	16
Şekil 1.4.	Boru üzerinde buzlanmanın yapıldığı BED sisteminin şematik gösterimi [8]	23
Şekil 1.5.	Boru üzerinde buzlamalı BED sistemlerinde kullanılan boru demetlerinin görünümü [8]	23
Şekil 1.6.	Kapsüllü BED sisteminin şematik gösterimi	24
Şekil 1.7.	Yayın olarak kullanılan kapsül şekillerinin şematik olarak gösterimi [9]	25
Şekil 1.8.	Ticari uygulamalarda kullanılan bazı buz kapsüllerinin görünümleri [10]	25
Şekil 1.9.	Buz hasatı BED sisteminin şematik olarak gösterimi	27
Şekil 1.10.	Buz çamuru BED sisteminin şematik olarak gösterimi [11]	28
Şekil 2.1.	Chicago’da yer alan bir otel projesi [61]	43
Şekil 2.2.	Baltimore’da yer alan bir stadyum, ofis binası ve turizm merkezi projesi [61]	43
Şekil 2.3.	Osaka’da yer alan bir fuar ve ticaret merkezi için BED projesi [61]	44
Şekil 2.4.	Taipei’da yer alan bir kampüs için BED projesi [61]	44
Şekil 2.5.	BED uygulamasında yer altına yerleştirilmiş buz depolama tankı ve içerisine yerleştirilen ice-on-coil modülü [61]	45
Şekil 2.6.	Uygulamalar sırasında alınmış bazı depo görüntüleri	45

Şekil 3.1.	Alışveriş merkezinin görünüşü	50
Şekil 3.2.	Alışveriş merkezinin pik soğutma yükünün zamanla değişimi . . .	52
Şekil 3.3.	Alışveriş merkezinde kullanılan elektriğin birim fiyatının grafiksel gösterimi a) Tekli tarife b) Üçlü tarife	53
Şekil 3.4.	Soğutma sisteminin buz yapma modundaki şematik gösterimi . .	55
Şekil 3.5.	Soğutma sisteminin buz eritme modundaki şematik gösterimi . . .	56
Şekil 3.6.	Soğutma sisteminin normal soğutma modundaki şematik gösterimi	57
Şekil 4.1.	BED tankının ve BED sisteminin şematik olarak gösterimi	62
Şekil 4.2.	Plakalı ısı değıştircisinin ve bağlantılarının şematik olarak gösterimi	69
Şekil 4.3.	Alışveriş merkezinde kullanılan soğutma ünitesinin ve soğutma sisteminin şematik olarak gösterimi	71
Şekil 4.4.	Buz kapsüllerinin tutulduğu yalıtımlı BED tankının şematik olarak gösterimi	73
Şekil 4.5.	Tank içerisinde radyal yöndeki sıcaklık değışiminin lineer ve parabolik değışiminin gösterimi	75
Şekil 4.6.	Sayısal modelin şematik olarak gösterimi	78
Şekil 4.7.	Sayısal modellemesi yapılan a) düz küre kapsül ve b) CRYOGEL kapsülün görüntüleri	78
Şekil 4.8.	Düz küre kapsül için ağ yapısı	79
Şekil 4.9.	Çalışmada kullanılan BED kullanım stratejilerinin saatlik soğutma grubu kullanımı	84
Şekil 5.1.	BED tankının enerji veriminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değışimi	99
Şekil 5.2.	BED tankının ekserji veriminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değışimi	99
Şekil 5.3.	BED tankı içerisinde sıvı hacminin katı hacmine oranının Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değışimi	100

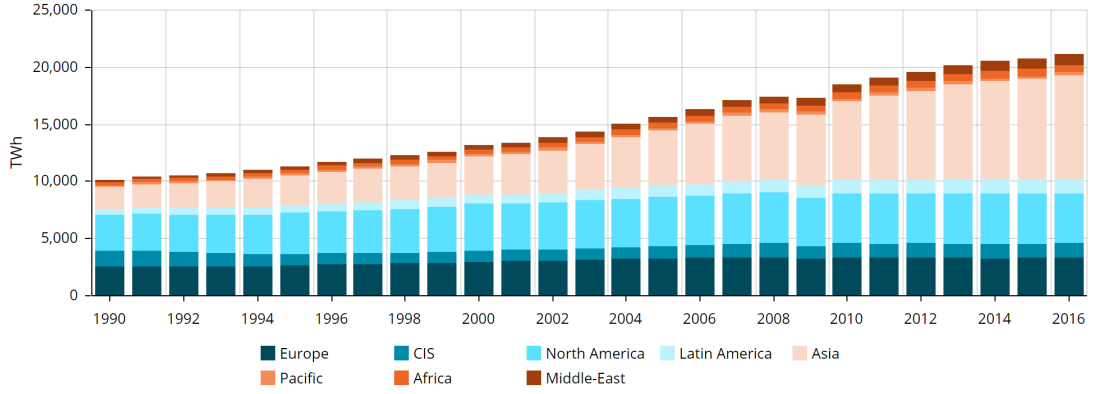
Şekil 5.4.	Tank merkezindeki sıcaklığın tank tabanından tankın üst kısımlarına doğru değişimi	103
Şekil 5.5.	Tank içerisindeki gözenekliliğin tankın merkezindeki sıcaklık dağılıma etkisi	104
Şekil 5.6.	Kapsül çapının tankın merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi . . .	104
Şekil 5.7.	ITA giriş sıcaklığının tank merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi	105
Şekil 5.8.	ITA giriş hızının tank merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi . . .	105
Şekil 5.9.	Grid bağımsızlığının gösterilmesi	107
Şekil 5.10.	Grid bağımsızlığının gösterilmesi	107
Şekil 5.11.	Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların, ElGhnam ve arkadaşlarının [32] çalışması ile karşılaştırılması	109
Şekil 5.12.	ITA giriş hızının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi	110
Şekil 5.13.	ITA giriş sıcaklığının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi . . .	110
Şekil 5.14.	Normal küre ve CRYOGEL kapsül için F' 'in zamanla değişimi . .	115
Şekil 5.15.	Kapsül içerisindeki suyun tamamının katılaştığı zaman kontrol hacmi içerisindeki ITA'nın akım çizgileri, $T_g=263\ K$	116
Şekil 5.16.	Kapsül içerisindeki suyun tamamının katılaştığı zaman kontrol hacmi içerisindeki ITA'nın akım çizgileri, $T_g=263\ K$	117
Şekil 5.17.	GİMSA'nın yıllara göre aylık bazda günlük ortalama elektrik tüketimi	120
Şekil 5.18.	GİMSA'da bulunan BED sistemi için yapılan yatırımın geri ödeme süresi ve 10 yıl süresince elde edilebilecek olan kâr miktarı	120
Şekil 5.19.	Elektrik tüketim maliyeti ve birim soğutma maliyetinin depolama miktarı ile değişimi	128
Şekil 5.20.	İncelenen BED kullanım stratejilerinin amortisman ve kar miktarının 10 yıllık sürede gösterimi	130

GİRİŞ

Çalışmanın Kapsamı, Önemi ve Gerekliliği:

Binalardaki enerji tüketimi dünyadaki toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlasını kapsamaktadır [1]. Amerika ve Avrupa'daki bulunan binaların enerji tüketim miktarı, bu bölgelerdeki toplam enerji tüketiminin %40'ından fazlasını oluşturmaktadır [2]. Ayrıca binalardaki enerji tüketimi son 10 yılda ciddi miktarda artış göstermiştir. Dünyadaki elektrik enerjisi tüketiminin 1990 ile 2016 yılları arasındaki değişimi Şekil G.1'de görülmektedir. Şekil G.1'den görüldüğü üzere, elektrik tüketimi yıllar içerisinde ciddi miktarda artış göstermektedir. Ayrıca yine G.1'e bakılacak olursa, Avrupa ve Amerika için elektrik tüketimi 2010 yılından sonra ciddi oranda değişmezken, Asya, Orta Doğu ve Afrika için ciddi bir artışın olduğu görülmektedir. Enerji tüketimindeki bu artışa; nüfus artışı, bina içerisinde geçirilen sürelerin artması, binalarda bulunan ve ihtiyaç haline gelen ek özellikler, iç ortam hava kalitesinin artırılması amacıyla kullanılan ekipmanlar, küresel iklim değişikliği ve küresel ısınma neden olmaktadır. Enerji kullanım miktarındaki artış, aynı zamanda enerjinin birim kullanım fiyatının artmasına da neden olmaktadır. Enerji tüketim miktarındaki ve fiyatlarındaki ciddi artış; elektrik üreticilerini ve tüketicilerini tüketimi azaltmak, daha verimli kullanmak ve/veya daha az maliyetle kullanmak için yöntemler araştırmaya zorlamıştır. Binalar iyi bir şekilde tasarlanır, inşa edilir ve işletilirse, bu binalardaki enerji tüketim miktarı ve enerji tüketim maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir.

Enerji kaynaklarından daha verimli ve daha az maliyetle yararlanmak için araştırmacılar ve şirketlerin ARGE birimleri ciddi çalışmalar sürdürmektedir. Bu konular ile alakalı çok sayıda yol ve yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin içerisinde, ısı enerjisi depolama en eski ve en gelişmiş olanlardan biridir. Isı enerjisi depolama, enerji dönüşümleri için temel teknolojilerden biridir. Bu yüzden



Şekil G.1. Dünyadaki elektrik tüketiminin yıllara göre değişimi [3]

mühendislik uygulamalarında çok büyük önem arz etmektedir. Isıl enerji depolama en çok ısıtma ve soğutma uygulamalarında tercih edilmektedir. Isıl enerji depolamanın tarihi, insanlık tarihi kadar eskidir. Bilinen eski tarihten beri, insanlar buzları daha sonra kullanmak için toplayıp, depoluyorlardı. Günümüzde ise ısıl enerji depolamanın; güneş enerjili ısıtma sistemlerinden, binaların iklimlendirme sistemlerine kadar çok sayıda uygulaması bulunmaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri, modern teknolojide önemli etkisi olan bir noktaya kadar gelişmiş durumdadır ve hala geliştirilmeye de devam etmektedir.

Isıl enerji depolama, enerjinin arz ve talep zamanları arasındaki uyumsuzluğu çözmek için uygulanabilecek en önemli ve etkili yöntemlerden biridir. Ayrıca enerji kullanımının yoğun ve aynı zamanda pahalı olduğu "pik yük" zamanlarında, pik yükü azaltmaya yönelik de uygulanabilecek en önemli metotlardan biridir. Isıl enerji depolama sistemleri, enerji ihtiyacını karşılamayı daha verimli ve çevreci yapmak için önemli katkılarda bulunabilir ve çoğu gelişmiş ısıl sistemin önemli bir parçası olabilir. Ayrıca iyi bir ısıl enerji depolama sistemi; depolanan enerjiyi mümkün olan en az tersinirlik ile kullanılmasına olanak sağlarken, ısı kayıplarının minimum ve enerji tasarruf miktarının ise maksimum olmasını sağlayabilir. Mühendislik uygulamalarında, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin çoğu enerjinin verimli olarak kullanılmasını, enerji tasarrufunu ve enerji dönüşümlerini içermektedir. Bu bağlamda ısıl enerji depolama önemli bir ısıl uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır.

Isıl enerji depolama bir maddenin ısıtılması, soğutulması, eritilmesi, katılaştırılması ya da buharlaştırılması ile gerçekleştirilir. Yapılan depolama işleminin tersi gerçekleştirildiği zaman depolanan enerjiyi kullanmak mümkün olmaktadır. Isıl

enerji depolama sistemleri en gelen anlamda üçe ayrılmaktadır. Bunlar; duyulur ısı enerji depolama, gizli ısı enerji depolama ve kimyasal ısı enerji depolama sistemleridir. Isıl enerji depolama sistemlerinden hangisinin tercih edileceği; depolamanın yapılacağı periyota, ekonomik şartlara, çalışma şartlarına, depolanacak ortamın sıcaklığına, depolanacak ortamın türüne, kaynak sıcaklığına, kaynak enerji türüne vb. parametrelere bağlıdır. Isıl enerji depolama türlerinden gizli ısı enerji depolama sağladığı ciddi hacim avantajından dolayı çoğu uygulamada tercih edilmektedir. Gizli ısı enerji depolama malzemelerin faz değişimi esasına dayanmaktadır. Suyun sıvı fazdan katı faza dönüştürülmesiyle, enerji soğuk bir ortam içerisinde depolanmış olur. Buz içerisinde depolanan soğuk kapasite, soğutmanın ihtiyaç olduğu yerlerde soğutma işlemlerinde kullanılabilir. Buz depolama içeren soğutma sistemleri, gizli enerji depolamanın sağladığı yüksek miktarda enerji depolama özelliğinden dolayı, soğutulmuş sulu sistemlere göre çok büyük boyut avantajına sahiptir.

Günümüzde soğutma sistemleri insanlar için ciddi bir ihtiyaçtır. Küresel ısınmanın etkisi ile soğutmaya olan ihtiyaç gün geçtikçe artmakta ve hali hazırda çalışan sistemler için ise kapasitelerini arttırma ihtiyacına neden olmaktadır. Bugün Amerika'daki binaların yaklaşık %87'sinde soğutma sistemleri bulunmaktadır. Ayrıca Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tahminlere göre binalardaki soğutma sistemlerinin yıllık tüketimleri 2050'de 4,000 TWh ve 2100'de ise 10,000 TWh olacaktır. Özellikle yaz aylarında soğutma sistemleri tam kapasite kullanıldığından ciddi miktarda elektrik tüketimine neden olmaktadır. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) [4] verilerine göre ülkemizde 10 Ağustos 2016 tarihinde, 905 milyon 645 bin *kWh*'lik elektrik tüketimi ile tüm zamanların en yüksek günlük elektrik tüketimi gerçekleşmiştir. Bu tüketimin yaz aylarının en sıcak günlerine denk gelmesi şaşırtıcı değildir. Çünkü bu günlerde klima sistemlerinin kullanımı artmaktadır. 10 Ağustos 2016 günü için ülkemizdeki bazı iller için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden [5] alınan sıcaklık değerleri şöyledir: Kayseri 34 °C, İstanbul 33 °C, Ankara 36 °C, İzmir 35 °C, Diyarbakır 42 °C, Adana 35 °C ve Antalya 36 °C. Bu verilerden görüldüğü üzere şehirlerdeki hava sıcaklığı oldukça yüksektir. Yüksek hava sıcaklığı insanları termal konfor sağlaması açısından klima sistemlerini

kullanmaya zorlamaktadır. Artan klima kullanımı ile elektrik tüketim miktarı ve maliyetleri artmaktadır. Soğutma ihtiyaçları için harcanan bu elektrik tüketimini ve/veya tüketim maliyetlerini azaltmak için, soğutma pik yüklerini pik olmayan saatlere kaydırmak gerekmektedir.

Elektrik tüketiminin gün içerisinde saatlik olarak dağılımı incelendiği zaman, elektrik tüketiminin saatlik olarak dengeli bir dağılım göstermediğini görürüz. Soğuk enerji depolama sistemleri sayesinde elektrik tüketiminin soğutma sistemlerinde bağlı olan kısmını elektrik kullanımının yoğun olmadığı zamanlara kaydırmak mümkündür. Bu sayede elektrik tüketimi gün içerisinde saatlik olarak daha dengeli bir dağılım gösterir. Böylece elektrik üretim tesislerinden daha dengeli ve verimli bir şekilde yararlanılabilir. Çünkü elektrik kullanımının en yoğun olduğu zamanlarda elektrik üretimi, talebi karşılayamaz. Bu yüksek talebi karşılamak için elektrik üretim tesisleri daha verimsiz işletilir ya da ithal edilen elektrik miktarı artar. Verimi düşük, eski teknoloji olan tesislerin kullanımı da artar. Bu artışlar hem ekonomik hem de çevresel yönden olumsuz etkilere neden olur. Daha verimsiz ve düşük teknoloji kullanılan elektrik üretim tesisleri karbon salınımını ve küresel ısınmayı arttırırken, ithal edilen elektrik de ekonomik açıdan cari açığın artmasına neden olur. Bu olumsuz durumlara engel olmak ya da etkilerini azaltmak için soğutma sistemlerinden kaynaklı elektrik tüketimi, elektrik kullanımının yoğun olmadığı saatlere, soğuk enerji depolama sistemleri sayesinde kaydırılabilir.

Alışveriş merkezleri, havaalanları, iş merkezleri, hipermarketler gibi kapalı mekanlarda hem soğutma yükünün fazla olması hem de soğutma sistemlerine daha uzun süre ihtiyaç duyulmasından dolayı, soğutma maliyetleri oldukça yüksektir. Yani bu mekanlarda soğutma ciddi bir işletme gideridir. Bu gibi yaşam alanlarında, insanların soğutma ihtiyacını karşılarken işletme maliyetlerini azaltmak için soğuk enerji depolama sistemleri kullanılabilir. Soğuk enerji depolama; elektrik birim fiyatının düşük olduğu zamanlarda soğutma sistemleri aracılığı ile bir maddeyi soğutarak ya da hal değişimi yaptırılarak, daha sonra bu maddenin tersi bir sıcaklık değişimine ya da katılaştırarak tabi tutularak, bir ortamın soğutmasının depolanan enerji ile gerçekleştirilmesidir. Bu sayede hem soğutma ihtiyacı düşük maliyetle karşılanırken, hem de pik yük azaltılmış olur. Buzda enerji depolama (BED), gizli ve

soğuk enerji depolamanın en yaygın türüdür. BED sisteminde, geceleri elektrik birim fiyatı düşük iken buz üretilir ve depolama ünitesinde saklanır. Depolanan buzlar, elektrik birim fiyatının yüksek olduğu zamanlarda eritilerek, ortamların soğutulması sağlanmaktadır.

Çalışmanın Amacı:

Bu tez çalışmasında; yukarıda açıklanan kapsam, önem ve gereklilikler göz önünde bulundurularak, bir alışveriş merkezinin soğutma sistemine BED sisteminin entegre edilmesinin etkileri araştırılmıştır. Ankara’da yer alan GİMSA alışveriş merkezi Türkiye’de kurulan ilk büyük ölçekli ticari BED uygulamasıdır. Bu tez kapsamında sistemin termodinamik, ısı geçişi ve ekonomik yönden irdelemesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek faaliyetler üç ana başlık üzerinde toplanmıştır. Bunlar;

1. Makro seviye çalışmalar
2. Mikro seviye çalışmalar
3. Ekonomik çalışmalar

Makro seviyede yapılan çalışmalarda alışveriş merkezinin BED’li soğutma sistemi termodinamik ve ısı geçişi açısından incelenmiştir. Termodinamik analizler kapsamında dört temel denge (kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri) ifadeleri kullanılmıştır. İlk olarak BED sisteminin temel elemanlarının (buz tankı, soğuma grubu, plakalı ısı değiştiricisi) için termodinamik analizleri yapılmıştır. Daha sonra buz tankı içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için buz tankının içi gözenekli bir ortam gibi modellenerek analitik olarak çözümlenmiştir. Analitik çözümler sırasında kapsül çapının, ısı transferi akışkanı (ITA) giriş hızının ve sıcaklığının etkileri araştırılmıştır.

Mikro seviyede çalışmalar kapsamında kapsüllü BED sisteminde kullanılan kapsüllerin ısı ve akışkan akımı davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Mikro seviye çalışmalar kapsamında kapsüller sayısal olarak modellenmiştir. Alışveriş merkezinde kullanılan kapsülün, normal bir küre kapsüle göre ısı performans açısından

karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal model ve prosedür literatürde yer alan bir çalışma ile doğrulanmıştır.

Ekonomik açıdan sistemin değerlendirilmesi çalışmaları kapsamında BED'in olduğu ve olmadığı durumlar için elektrik tüketim maliyetlerinin karşılaştırılması, sistemin geri ödeme süresi ve yıllar içerisinde sağlayacağı ekonomik kâr miktarı belirlenmiştir. Ayrıca farklı BED kullanım stratejilerinin, sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkisi de pik soğutma yükü üzerinden hesaplanmıştır. Yine her bir strateji için elektrik tüketim maliyetlerinin karşılaştırılması, sistemin geri ödeme süresi ve yıllar içerisinde sağlayacağı ekonomik kâr miktarı belirlenmiştir.

Yukarıda açıklanan çalışmalar ile ülkemizin ilk ticari ve büyük ölçekli BED uygulaması, sistem geneli bazında, sistem elemanları ve sistemin en küçük parçası olan buz kapsülü bazında termodinamik, ısı geçişi ve akışkan akımı yönünden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca BED sisteminden elde edilecek olan ekonomik fayda da hem deneysel hem de 8 farklı BED kullanım stratejisi için teorik olarak belirlenmiştir. Böylece bir alışveriş merkezinde BED kullanımının ekonomik etkisi kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, enerji depolama ve ısı enerji depolama sistemleri ile alakalı genel bilgiler verilmiştir. İlk olarak enerji depolamanın tanımı yapılarak, çeşitleri sıralanmıştır. Daha sonra ısı enerji depolama hakkında genel bilgiler ve ısı enerji depolamanın türleri verilmiştir. Soğuk ısı enerji depolamanın türleri ve çalışma prensipleri açıklanmıştır. Bu bölümde, İbrahim Dinçer ve Marc A. Rosen tarafından yazılmış "Thermal Energy Storage Systems and Applications" kitabından [6] yararlanılmıştır.

1.1. Enerji Depolama

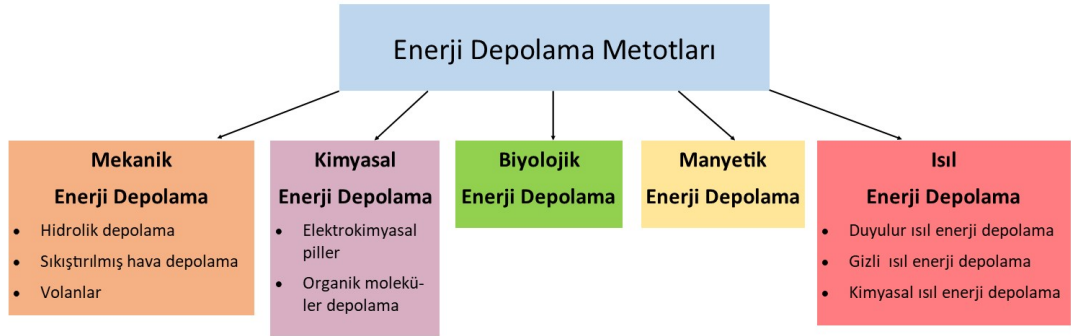
Enerji depolama en genel anlamda; enerjinin, enerji kaynağının aktif ya da ucuz olduğu zaman, bir depolama ortamı içerisinde, enerji kaynağını aktif olmadığı ya da pahalı olduğu zaman kullanmak üzere geçici süreliğine depolanması olarak tanımlanabilir. Enerjinin birçok türü olduğu gibi çok sayıda türde de depolanabilir. Enerji depolama, enerjinin ihtiyaç olduğu zamanla, enerji kaynağının aktif olduğu zaman arasındaki, zaman eşleşmesi problemini aşmak için kullanılacak en önemli araçlardan biridir. Örneğin; güneş enerjisinin ısı etkisinden geceleri ya da kışları yararlanmak için güneş enerjisini depolamak gerekmektedir. Bir başka örnek ise elektrik enerjisinin ucuz olduğu pik olmayan saatlerde bir depolama ortamı içerisinde ısı enerji depolanıp, daha sonra elektrik fiyatlarının pahalı olduğu zaman bu depolanan enerji kullanılmasıdır. Enerji depolama sistemleri sağladığı avantajlardan dolayı günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Enerji depolamanın sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [6]:

- o Enerji tüketimini azaltır
- o Enerji maliyetlerini düşürür
- o Pik yükleri pik olmayan saatlere kaydırır
- o Başlangıç ve bakım maliyetlerini azaltır
- o İç ortam hava kalitesini arttırır
- o İşletme şartlarının esnekliğini arttırır
- o Sistem elemanlarının kapasitelerini düşürür
- o Sistem ekipmanlarını daha verimli ve efektif kullanmayı sağlar
- o Fosil yakıtların daha az kullanılmasını sağlar
- o Karbon emisyonun azaltılmasına yardımcı olur

Enerji depolama sistemleri, entegre edildiği sistemlerin ilk yatırım maliyetlerini genellikle arttırmaktadır. Ancak bu ilk yatırım maliyetini kısa sürede geri ödediği için enerji dönüşüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri ve geri ödeme süreleri dikkate alındığı zaman; enerji depolama sisteminin tasarımı ve işletme şartları önem arz etmektedir. Bu yüzden, 1970’li yıllarda meydana gelen enerji ve petrol krizinden sonra çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir. Günümüzde de artan bir ilgiyle araştırılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Enerji depolamanın çok sayıda yöntemi bulunmaktadır. Enerji depolamanın yöntemleri Şekil 1.1’de görülmektedir. Sıralanan bu enerji depolama türlerinin de kendi içerisinde çok sayıda farklı yöntemi vardır. Her bir sistemin kendine ait avantaj ve dezavantajları olmakla beraber, bu sistemlerin seçimi ve işletilmesi için hassas tasarım ve maliyet hesapları gerektirmektedir.

Enerji depolama çeşitlerinden *mekanik enerji depolama*; enerjinin lineer veya dönen cisim hareketiyle kinetik enerji olarak, cisimlerin ya da sıvıların yüksekliğinin değiştirilmesi ile potansiyel enerji olarak, elastik malzemelerin şekil değiştirmesiyle şekil değiştirme enerjisi olarak, gazların veya yayların sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilen enerji depolama türüdür. *Kimyasal enerji depolama*, bir kimyasal tepkime sonucunda bünyesinde enerji toplayarak ve daha sonra bu enerji yine bir kimyasal tepkime ile dışarı atarak gerçekleştirilir. Elektro-kimyasal piller



Şekil 1.1. Enerji depolama metotlarının sınıflandırılması

ve organik moleküler depolama yaygın olarak kullanılan kimyasal enerji depolama çeşitleridir. *Biyolojik enerji depolama*, biyolojik proseslerden kaynaklı enerjinin kimyasal olarak depolanmasıdır. *Manyetik enerji depolama*, ise enerjinin manyetik elemanlarla (büyük mıknatıslar gibi) depolanmasıdır. *Isıl enerji depolama*, enerjinin maddelerin sıcaklıklarını değiştirerek ya da faz değişimleri sırasındaki gizli enerjiden yararlanılarak gerçekleştirilen enerji depolama türüdür. Ayrıca bir enerji kaynağının ısı enerjisini kullanılarak endotermik kimyasal reaksiyon gerçekleştirilip, daha sonra bu kimyasal tepkimenin tersi ekzotermik bir reaksiyon gerçekleştirilerek enerjiden yararlanılabilir. Bu tez çalışmasının genel konusu ısı enerji depolama olduğundan, ısı enerji depolama sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

1.2. Isıl Enerji Depolama

Ticari, endüstriyel ve kamu sektörlerinin enerji ihtiyacı günlük, haftalık ve mevsimlik olarak değişiklikler göstermektedir. Enerjinin ihtiyaç olduğu zamanla enerji kaynağının aktif olduğu zaman arasındaki eşleşme sorunu, ısı enerji depolama sistemlerinin kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Isıl enerji depolama sistemleri ile alakalı; ısıtma, soğutma, iklimlendirme, klima gibi ısı uygulamaları kapsayan çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Son yarım asırda sanayileşmiş ülkelerde, çok sayıda ısı enerji depolama sistemi geliştirilmiştir. Isıl enerji depolama sistemlerindeki bu gelişmede en büyük etmen; ısı enerji depolama sistemlerinin ısı sistemlerde kullanılan ekipmanları daha verimli, daha düşük kapasite ile ve/veya daha az işletme maliyeti ile kullanılmasına olanak sağlamasıdır. Sağladığı bu faydalardan dolayı ısı enerji depolama sistemleri ekonomik ve çevresel açıdan ciddi bir potansiyele sahiptir.

Enerji dönüşüm sistemlerinin ısı performanslarında, ısı enerji depolama sistemleri önemli rol oynamaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri sayesinde atık ısıdan yararlanmak mümkün olduğu gibi elektrik enerjisi kullanımında pik yükleri kaydırmak da mümkün olmaktadır. Bu sayede önemli miktarda ekonomik tasarruflar elde edilebilmektedir. Bölüm 1.1’de çok sayıda enerji türü ve enerji depolama çeşidi olduğu açıklanmıştı. Ancak bu duruma karşın, çoğu ülkede enerji, ısı olarak üretilmekte ve aktarılmaktadır. Bu sebepten dolayı enerji dönüşümü açısından ısı enerji depolama sistemleri önem arz etmektedir. Bu duruma ek olarak kojenerasyon ve hibrit sistemlerin yaygınlaşması da ısı enerji depolama sistemlerinin önemini arttırmıştır. Isıl enerji depolama, geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve iyileştirilmeye çalışılmıştır. Günümüzde ısı enerji depolama sistemleri, enerji depolama sistemleri arasında en gelişmiş ve alt yapısı en çok bilinen yöntemdir. Gelişmiş bir teknoloji olarak ısı enerji depolama sistemleri; hacim ısıtma-soğutma, su ısıtma-soğutma, iklimlendirme gibi ısı sistem uygulamalarında artan bir ilgiye sahiptir. Isıl enerji depolama sistemleri; sistem elemanlarını daha verimli kullanmak, sistem elemanlarının kapasiteleri düşürmek ve enerji tüketim periyotunu kaydırmak adına büyük bir potansiyele sahiptir. Yani enerjinin ihtiyaç olduğu ve üretildiği zaman arasındaki, zaman eşleşmesi problemini çözebilecek en önemli yöntemlerden biridir. Bunun yanında, elektrik birim fiyatındaki tarife farkından yararlanarak, enerji sistemlerinden daha az maliyetli bir şekilde yararlanmayı da sağlar.

Yukarıdaki açıklamalar göz önünde bulundurularak, ısı enerji depolama en genel anlamda, enerjinin geçici olarak depolanması olarak tanımlanabilir. Isıl enerji depolamada temel amaç, enerji kaynağı aktif değilken ya da pahalıyken enerjinin daha sonra kullanmak için bir depolama ortamında ısı olarak depolanmasıdır. Isıl enerji depolama sistemlerine, güneş enerjili ısıtma sistemleri ve soğuk enerji depolama sistemleri örnek gösterilebilir. Güneş enerjili ısıtma sistemlerinin depolama ünitesinde, güneş enerjisi ısı enerjisi olarak akşam kullanımı ya da kış kullanımı için depolanır. Soğuk enerji depolama sistemlerinde, kışın elde edilen buzlar yazları soğutma için kullanılabilir. Ayrıca soğuk enerji depolama uygulamasına; pik olmayan saatlerde, bir depolama biriminde soğuk materyal elde edip, pik saatlerde ise bu depolanan soğuk materyal kullanılarak yeniden soğutma sağlayan sistemler de örnek verilebilir.

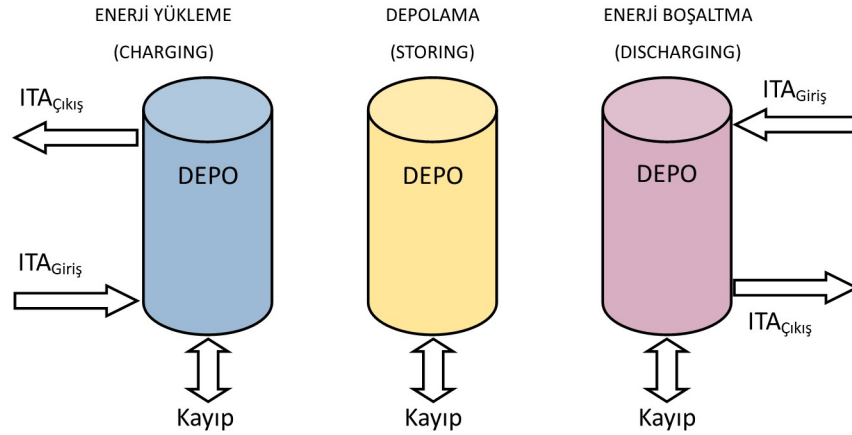
Artan nüfus, yükselen sosyal yaşam kalitesi, azalan fosil yakıtlar ve çevresel olumsuz etmenlerden dolayı, insanların yenilebilir enerji kaynaklarına ve enerjiyi verimli kullanmaya olan ilgileri artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğası gereği sürekli olarak enerji üretemezler. Bu yüzden bu kaynakların etkin ve verimli kullanılması, enerji depolama sistemleri ile sağlanabilir.

Isıl enerji depolama, enerjinin; bir maddenin ısıtılması-soğutulması, erimesi-katılaşması, gazlaşması-sıvılaşması ya da bir kimyasal reaksiyon ile depolanmasıdır. Sıcaklık değişimiyle gerçekleşen ısı enerji depolama duyulur ısı enerji depolama, faz değişiminden yararlanılarak gerçekleştirilen ısı enerji depolama gizli ısı enerji depolama ve kimyasal reaksiyonlar ile gerçekleştirilen ısı enerji depolama ise kimyasal ısı enerji depolama olarak adlandırılmaktadır.

1.2.1. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Prensibi

Isıl enerji depolama, herhangi bir enerji türünün ısı enerjisi olarak bir depolama ortamı içerisinde geçici olarak, daha sonra kullanmak üzere depolanmasıdır. Isıl enerji depolama türlerinin tamamında temel çalışma prensibi aynıdır. İlk olarak her hangi bir enerji türü ısı enerjisine çevrilip bir depolama ünitesinde depolanır, duruma göre beklemesi gerekir ise depolama ünitesinde mümkün olan en az kayıp ile tutulur ve son olarak kullanılacağı zaman depolama ünitesinden depolanan enerji alınarak kullanılır. Bu üç proses sırası ile enerji yükleme (charging), depolama (storing) ve enerji boşaltma (discharging) olarak adlandırılır. Bu proseslerin süresi kullanılan ısı enerji depolama sisteminin türüne değişim göstermektedir. Proseslerin şematik olarak gösterimi Şekil 1.2’de görülmektedir. Yükleme sırasında enerji kaynağı kullanılarak, depolama ünitesine enerji yüklenir. Daha sonra depolanan enerji kullanılacağı zamana kadar depolama ünitesinde bekletilir. Bu aşamada depolama ünitesinden çevreye olan kaybın minimum olması istenir. Son olarak ise depolanan enerji depolama ünitesinden boşaltılır.

Şekil 1.2’de görülen ve yukarıda açıklanan üç çalışma prosesi sırası ile çevrim halinde sürekli olarak çalışır. Çevrimin süresi depolamanın türüne ve kapasitesi göre değişmektedir. Güneş enerjisi sistemleri için gündüz güneşli saatlere enerji yüklenirken, güneşin etkisini yitirdiği saatten depolanan enerjinin kullanılacağı saate bekletilir. Daha sonra ise kullanılır. Soğuk enerji depolama sistemlerinde ise pik



Şekil 1.2. Isıl enerji depolama sistemleri için temel üç prosesin şematik olarak gösterimi

olmayan saatlerde (4-8 saat) enerji yüklemesi yapılır. Gündüz tarifi boyunca (8-12 saat) bekletilir. Son olarak elektriğin pahalı olduğu pik saatlerde (4-8 saat) ise depolanan enerji kullanılır.

1.2.2. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Faydaları ve Tasarım Kriterleri

Isıl enerji depolama sistemleri daha önce Bölüm 1.1’de sıralanan enerji depolama sistemlerinin sahip olduğu tüm avantajların tamamına sahiptir. Ancak bu avantajlara ek olarak aşağıdaki avantajlarda sıralanabilir [6]:

- o Üretim kapasitesini artırır
- o Kojenerasyon sistemlerinin daha verimli işletilmesini sağlar
- o Enerji kullanım zamanını düşük fiyatlı zamana taşır
- o Sistem güvenilirliğini artırır
- o Farklı sistemler ile birleştirilmesine olanak sağlar

Isıl enerji depolama sistemlerinin sahip olduğu avantajlardan maksimum seviyede yararlanmak için sistemlerin tasarım, kurma ve işletme faaliyetleri sırasında bazı dikkat edilmesi gereken kriterler vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [6]:

- o Depolama kapasitesi
- o Sistem kullanım ömrü
- o Sistemin boyutları
- o Maliyet

- o Kullanılan enerji kaynağı
- o Verimlilik
- o Ticari olarak uygulanabilirliği
- o Güvenlik şartları
- o Sistemi kurma işlemleri
- o Çevresel şartlar

Tüm bu parametreler göz önünde bulundurularak, bir ısı enerji depolama sistemi sorunsuz bir şekilde tasarlanıp, en düşük maliyet ile kurulup, optimum şekilde işletilebilir. Isıl enerji depolama sistemleri, enerjinin üretilmesi ve kullanılması arasında zaman bakımından eşleşme sorununun olduğu her zaman ısı enerjinin sağlanması ve verimli kullanılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca enerji tüketim fiyatlarındaki gün içindeki değişiminden yararlanarak enerji ihtiyaçlarının daha düşük maliyetlerle karşılanmasına olanak tanır.

1.2.3. Isıl Enerji Depolamanın Çeşitleri

Isıtma, soğutma, endüstriyel uygulamalar ve uzay güç sistemleri için çeşitli ısı enerji depolama uygulama türleri geliştirilmiştir. Bu ısı enerji depolama türlerindeki en önemli etmen depolamanın miktarı ve süresidir. Günlük enerji depolama sistemleri düşük maliyetleri ve enerji kayıplarından dolayı avantajlıdır. Ayrıca düşük depolama hacmi ve kolay kurulma gibi avantajları da bulunmaktadır. Uzun süreli depolama sistemleri (yıllık, mevsimlik vb.) günlük depolama sistemlerinde göre daha kritik tasarım yapılmasını gerektirmektedir. Çünkü bu sistemler büyük kapasiteli ve yüksek maliyetlidir. Uzun süreli depolama sistemleri, ekonomik olarak avantaj sağlayabileceği büyük endüstriyel park tasarımları, pahalı enerji dağıtım fiyatlarının olduğu yerler ve yeni kampüs yerleşkeleri için uygun olabilir. Daha öncede belirtildiği üzere ısı enerji depolama sistemlerin çok fazla uygulama yöntemi olmakla beraber temel olarak üç türü bulunmaktadır. Bunlar;

1. Duyulur ısı enerji depolama
2. Gizli ısı enerji depolama
3. Kimyasal ısı enerji depolama

Yukarıda ısı enerji depolama türlerinden kimyasal ısı enerji depolama uygulamalarda fazla kullanılmayan bir türdür. Temel çalışma prensibi: bir kaynaktan alınan ısı enerji, enerji yükleme periyotunda bir endotermik reaksiyonun aktivasyon enerjisi olarak kullanılır. Bu kimyasal tepkime sonrasında ortaya çıkan tepkime soru ürünler depolama periyotu boyunca depolanır. Son olarak enerji boşaltma periyotunda, ilk tepkimenin tersi bir ekzotermik reaksiyon gerçekleştirilerek depolanan enerji kullanılır. Bu tez çalışması kapsamında duyulur ve gizli ısı enerji depolama sistemleri ile alakalı bilgiler verilmiştir.

Tablo 1.1’de uzun ve kısa süreli depolamalar için duyulur ve gizli ısı enerji depolama sistemleri de kullanılabilecek depolama materyalleri görülmektedir.

Tablo 1.1. Duyulur ve gizli ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılabilecek materyaller [6]

Kısa Periyod Duyulur Isı Enerji Depolama	Uzun Periyod Duyulur Isı Enerji Depolama	Kısa Periyod Gizli Isı Enerji Depolama
Kaya yatakları	Kaya yatakları	İnorganik materyaller
Toprak yatakları	Toprak yatakları	Organik materyaller
Su tankları	Büyük su tankları	Yağlı asitler
	Yeraltı su kaynakları	Aromatikler
	Güneş havuzları	

1.2.3.1. Duyulur Isı Enerjisi Depolama

Duyulur ısı enerji depolama sistemlerinde enerji; su, hava, kaya yatağı, tuğla, kum toprak vb. depolama ortamının sıcaklığı değiştirilerek depolanır. Temelde malzemelerin sıcaklıklarının değişimi esasına dayanır. Enerji yükleneceği zaman depolama materyalinin sıcaklığı değiştirilir (artar ya da azaltılır); boşaltma periyotunda da sıcaklığı yükleme periyotunda gerçekleşen değişimin aksine değiştirilir (yükleme periyotunda arttı ise azalır, azaldı ise artar). Duyulur ısı enerji depolama sistemlerinde yüklenen ve boşaltılan enerji aşağıdaki temel ifadeyle kolaylıkla hesaplanır.

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

Yukarıdaki ifadeden görüldüğü üzere, duyulur ısı enerji depolamada en önemli

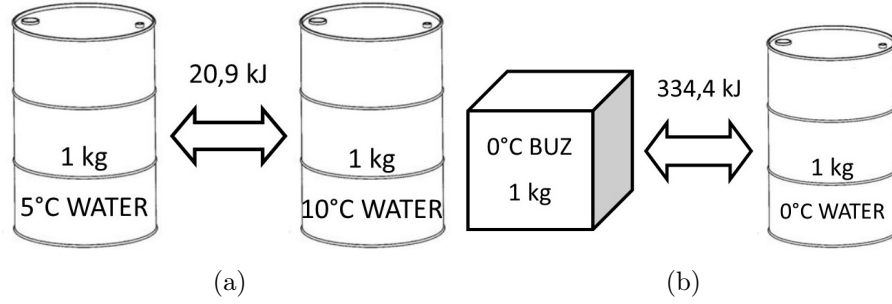
parametre depolama ortamının yoğunluğu ve özgül ısıdır. Mümkün olan en küçük hacimde daha çok enerji depolamak için ısı kapasitesi ve yoğunluğu yüksek olan maddeler depolama maddesi olarak tercih edilmelidir. Tablo 1.2’de duyulur ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılan bazı materyaller ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan bazı materyaller ve 20 °C’deki özellikleri

Malzeme	Yoğunluk kg/m^3	Özgül ısı J/kgK	Hacimsel ısı kapasite $\times 10^6 J/m^3K$
Su	988	4182	4.17
Çelik	7840	465	3.68
Demir	7900	452	3.57
Alüminyum	2710	896	2.43
Cam	2710	837	2.27
Beton	2000	880	1.76
Ahşap	700	2390	1.67
Tuğla	1800	837	1.51
Çakıllı toprak	2050	1840	3.77
Manyetit	5177	752	3.89
Kum taşı	2200	712	1.57
Kil	1458	879	1.28

Tipik bir duyulur ısı enerji depolama sisteminde depolama materyali, depo, giriş ve çıkış cihazı bulunmaktadır. Sistemdeki deponun mümkün olduğu kadar az kayıpla çalışması için yalıtımlı olması istenir. Ayrıca depolama içerisinde sıcaklık tabakalaşmasının olması da sistemin verimini olumlu yönde etkilemektedir.

Duyulur ısı enerji depolama sistemleri depolama ortamının sıcaklığına göre yüksek sıcaklıklı ısı enerji depolama sistemleri ve düşük sıcaklıklı ısı enerji depolama sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Ayrıca depolama süresi açısından da hem mevsimsel hem de kısa süreli depolamaya olanak tanımaktadır. Çalışma prensibi, daha önce belirtildiği üzere enerji yükleme, depolama ve enerji boşaltma periyotlarından oluşmaktadır. Yükleme periyotunda su, kum, kaya yatağı, toprak vb. depolama ortamının sıcaklığı değiştirilerek enerji depolanır. Daha sonra kullanılacağı zamana kadar depolama ortamı içerisinde tutulur. En son olarak ise boşaltma periyotunda depolanan enerji kullanılır. Bu aşamada sıcaklık yine değişir. Örneğin; bir güneş enerjili sıcak su ısıtma sisteminde gündüzleri güneş enerjisinden yararlanılarak bir su tankı içerisindeki su ısıtılır. Daha sonra sıcak su



Şekil 1.3. Suyun ısı değişimi miktarları (a) duyulur ısı değişimi, (b) gizli ısı değişimi kullanılacağı zamana kadar bekletilir ve son olarak sıcak su kullanılır. Duyulur ısı enerji depolamanın en yaygın türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Isıl tabakalaşmış tanklar içerisine depolama
2. Beton yapı içerisine depolama
3. Kaya yatağına depolama
4. Sulu kaya yatağına depolama
5. Yeraltı sularına depolama
6. Güneş havuzlarına depolama

Yukarıda sıralanan duyulur ısı enerji depolama türleri depolamanın zamanına, miktarına ve işletme ortamına göre tercih edilmektedir.

1.2.3.2. Gizli Isıl Enerji Depolama

Maddelerin faz değiştirmesi için gerekli olan ısı geçişine "*gizli enerji*" adı verilir. Gizli ısı değişimi duyulur ısı değişimine göre aynı hacimdeki, aynı madde için genellikle çok daha fazladır. Örnek olarak su ele alınacak olursa, Şekil ??'den görüldüğü gibi suyun sıcaklığını 5°C değişmek için gerekli olan ısı enerjisi miktarı ile, buz halinden su haline geçtiği zamanki ısı enerjisi miktarı arasında yaklaşık 16 kat fark bulunmaktadır. Hacim açısından sağladığı büyük avantajdan dolayı büyük kapasiteli sistemlerde genellikle gizli ısı enerji depolama (GED) tercih edilmektedir. Ayrıca depolama hacminin küçük olması, depolama ortamının yüzey alanını düşüreceğinden, depolama ortamından çevreye olan ısı kaybı miktarını da azalacaktır.

GED sistemlerinde kullanılan depolama maddesine faz değiştiren malzeme (FDM) adı verilmektedir. Yaygın olarak kullanılan FDM'lere su/buz, tuz çözeltileri ve bazı

polimerler örnek verilebilir. Bunların yanında ötektik tuzlar da FDM olarak yayın olarak kullanılmaktadır. Parafin ve zeolit de uygulamada kullanılan FDM'lerdendir. GED sistemleri kullanılan FDM'lerin faz değıştirme sıcaklıklarına göre düşük sıcaklıklı ve yüksek sıcaklık GED sistemleri olarak ikiye ayrılır. Ayrıca soğutma ve klima sistemleri için enerjiyi soğuk olarak depolayan sistemlere ise "soğuk ısı enerji depolama" sistemleri adı verilmektedir.

1.2.3.3. Faz Değıştiren Malzemeler (FDM)

Bir malzeme ya da madde eridiğı ya da buharlaştığı zaman enerji absorbe eder. Bu durumun aksine katılaştığı (kristalleştığı) ya da sıvılaştığı (yoğuştuğı) zaman ise enerji açığa çıkarır. Faz değışimi sırasındaki bu enerji yutma ve yayma durumu FDM'ler içerisinde ısı enerji depolamanın temelini oluşturmaktadır. Faz değışimi sırasındaki açığa çıkan ya da gerekli olan enerji miktarı, duyulur ısı değışimindeki gerekli olan ya da açığa çıkan enerji miktarından çok yüksek olduğı için, depolama ortamı hacmi açısından gizli ısı enerji depolama sistemleri çoğı sistemde tercih edilmektedir.

Eski zamanlardan beri su-buz ve ötektik tuzlar FDM olarak kullanılmaktadır. Isı enerji depolama sistemlerinde FDM'nin bilinen en eski kullanımı 1800'lerin sonununda İngiliz demiryolu araçlarında koltuk ısıtma olarak kullanılmasıdır. Soğuk kış günlerinde sodyum tiyosülfat penta hidrit (44.4°C erime ve katılma noktasıdır) metal ve plastik taşıyıcılara doldurularak kullanılmıştır. Günümüzde ise ötektik plakalar demir yolu taşıtlarında ve kamyonlarda kullanılmaktadır. Ayrıca günümüzde uzay teknolojilerinde gizli ısı enerji depolama sistemlerinin önemli bir yeri vardır. Uzay araçlarının elektrik ekipmanlarının ısı kontrolünü sağlamak için FDM geliştirilmesi ile alakalı NASA'nın çok sayıda projeleri vardır.

FDM'lerin gereksinimleri: Sıcaklığı 0 ile 120°C arasında değışen FDM'ler düşük sıcaklık FDM'leri olarak adlandırılır. Genellikle yüksek sıcaklık gerektirmeyen kapalı mekan ısıtma, sıcak su üretme, ısı pompası destekli mekan ısıtma, sera ısıtma, güneş enerjili soğutma gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Faz değışme sıcaklığı 120°C 'den yüksek olan FDM'li ısı enerji depolama sistemleri ise nükleer tesisler ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gizli ısı enerji depolama sistemlerini en uygun şekilde tasarlamak için FDM'nin gizli ısı ve uygulama için

gerekli olan ısı değiştiricisini hakkında iyi bilgiye sahip olmak gerekmektedir.

FDM'lerin erime ve katılaşma karakteristiği ısı enerji depolama sistemi açısından kısa ya da uzun sureli depolama, ısı çevrim ve sistem elemanlarının belirlenmesi ve tasarımı açısından oldukça onemlidir. Gizli ısınn belirlenmesi için iki farklı ölçüm tekniği mevcuttur. Bunlar kalorimetrik analiz ve ısı analiz yöntemleridir.

FDM'lerin karakterizasyonu: FDM'lerin karakterize edilmesi için çok sayıda özellik bulunmaktadır. Hiç bir malzeme tüm istenen özellikleri barındırmayacağından, FDM'nin kullanılacağı depolama sistemin özelliği ve türüne göre en uygun seçimi yapmak gerekir. Bu zellikler içerisinde en onemlileri; malzemenin türü (karışım ya da saf madde olması), nasıl bir ortamda tutulacağı, faz değiştirme sırasında ısı kapasitesinin değişim miktarı ve faz değişimi sırasındaki hacim değişimi miktarıdır.

FDM'lerin zorlukları: FDM'lerin ve ısı enerji depolama sistemlerinin sağladığı büyük avantajlarının yanında, bazı önemli sorunları da bulunmaktadır.

- o Depolama sıcaklığına uygun sıcaklıkta depolama yapacak depolama materyali bulmak
- o Uzun sureli depolamada ısı davranışlardaki belirsizlik
- o çevreye olan ısı kaybı
- o Depolama hacminin miktarı

FDM'lerin uygulamaları: Isıtma ve soğutma uygulamalarına göre FDM'lerin kullanıldığı çok sayıda depolama türü bulunmaktadır.

- o 0°C'nin altındaki sıcaklıklardan 5°C'ye kadar erime ve katılaşma noktası olan FDM'ler soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır.
- o 5-15°C sıcaklıkları arasında erime noktası olan FDM soğuk depolama için kullanılabilir.
- o Oda sıcaklığına yakın erime noktası olan FDM'ler, kapalı hacimlerin sıcaklığını gnlk olarak sabit tutmak için kullanılabilir.
- o 20-35°C sıcaklıkları arasında erime noktası olan FDM'ler ısı pompası sistemleri ile birlikte ısıtma uygulamalarında kullanılır.

- o 20-35 °C sıcaklıkları arasındaki erime noktası olan FDM'ler, güneş enerjili ısıtma sistemlerinde depolama materyali olarak kullanılabilir.
- o 40-60 °C sıcaklıkları arasındaki erime noktası olan FDM'ler güneş enerjili ısıtma sistemleri için gündüz ve gece kullanımı için depolama materyali olarak kullanılabilir.
- o Sıcak su sistemleri için 60-95 °C arasında erime noktası olan FDM'ler kapsül içerisinde kullanılabilir.
- o Pik olmayan saatlerde 25 °C'den daha yüksek erime noktasına sahip FDM'ler ısıtma sistemlerinde kullanılabilir.
- o Erime noktası 100-175 °C sıcaklıkları arasında olan FDM'ler yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde depolama materyali olarak kullanılabilir.

FDM'lerin değerlendirilmesi: FDM'lerin değerlendirilmesi için aşağıda sıralanan kriterler kullanılmaktadır. Sıralanan bu maddelere göre FDM'lerin bir sisteme uygunluğu belirlenmektedir.

- o Donma ya da katılaşma
- o Aşırı soğutma (supercooling)
- o Çekirdeklenme (Nukleation)
- o Isıl çevrim (Thermal cycling)
- o Kapsülleştirme (Encapsulation)
- o Uygunluk

1.3. Soğuk Isıl Enerji Depolama

Mahâllerin soğutulması için yapılan ısı depolama; aynı zamanda soğuk depolama, soğu depolama, soğuk ısı enerjisi depolama olarak da bilinen; gelişmiş ve halen üzerinde çalışmalar yapılan bir teknolojidir. Mahâllerin soğutma yükü, soğuk ısı enerjisi depolama sistemleri kullanılarak depolanabilir. Soğuk enerji depolama sistemlerinin kullanılmasıyla iki önemli avantaj sağlanır. Bunlardan ilki soğutma için gerekli olan elektrik enerjisi maliyetlerini düşürmesi, ikinci ise mahâllerin soğutma pik yükünü azaltarak soğutma sistemi kapasitelerini düşürmesidir. Soğutma

için kullanılan elektrik maliyetini düşürme, elektrik tarifesinin gün içerisindeki değişiminden yararlanarak gerçekleştirilir. Mahâl için gerekli olan soğutma kapasitesi bir depolama ortamına elektrik kullanımının pik olmadığı (gece) tarifesinde yüklenir. Depolanan bu enerji daha sonra elektrik kullanımının daha pahalı olduğu pik ve gündüz tarifelerinde mahâl soğutma için kullanılır. Böylece mahâlin soğutma ihtiyacı, soğuk ısı enerji depolama sistemleri sayesinde normal soğutma sistemleri göre çok daha düşük maliyet ile sağlanır. Mahâllerin pik soğutma yükleri genellikle gün içerisinde çok kısa bir zamana denk gelmektedir. Bu kısa süreli ancak ihtiyaç olan yükü karşılamak için yüksek kapasiteli soğutma sistemleri kullanılır. Soğutma sistemlerinin kapasiteleri arttıkça maliyetleri de ciddi bir oranda artmaktadır. Soğuk enerji depolama sistemleriyle pik yükünün bir kısmının depolanması ile mahâl için gerekli olan soğutma sistemi kapasitesini düşürülebilir. Böylece soğutma sistemlerinin hem boyutu, hem kapasitesi hem de maliyeti düşürülmüş olur. Daha önce belirtildiği üzere, soğuk enerji depolama sistemlerinin ekonomik anlamda çok önemli avantajları vardır. Bu avantajlardan dolayı gittikçe yaygınlaşan bir ilgiye ve uygulama alanına sahiptir. İyi bir şekilde tasarlanmış soğuk ısı enerji depolama sistemleriyle mahâl için gerekli olan soğutma sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım masrafları da azaltabilmektedir. Amerika'nın "Federal Energy Management Program" adlı biriminde, 2000 yılı için hazırladığı raporda soğuk ısı enerji depolama sistemleri ile yıllık 50 milyon dolar tasarruf edilebileceği duyurulmuştur [7]. Aşağıda sıralanan durumlardan bir ya da birkaçı bir mahâl için geçerliyse, o mahâl için soğuk ısı enerji depolama sistemini kullanmak cazip olarak kabul edilebilir [6].

1. Elektrik enerjisi fiyatları gün içerisinde ciddi bir şekilde değişiyorsa
2. Elektrik kullanım fiyatlarının pahalı olması
3. Ortalama soğutma yükünün, pik soğutma yükünden ciddi miktarda az olması durumunda
4. Soğuk depolama sistemlerini kurmak için teşviklerin olması
5. Kapasite artışı gereken bir soğutma sisteminin var olması
6. Yeni bir mahâlin yapılıyor olması
7. Eski soğutma sisteminin yerine yeni soğutma sisteminin kurulacak olması

Soğuk ısı enerji depolama sisteminin çalışma prensibi, daha önce açıklanan enerji depolama sistemlerinin ve ısı enerji depolama sistemlerinin çalışma prensibi ile aynıdır (Şekil 1.2). Yani enerjinin yüklendiği, depolandığı ve boşaltıldığı üç çalışma periyodundan oluşmaktadır. Bu periyotların uygulanma şekli ve sistemleri soğuk enerji depolamanın türüne ve enerjinin depolanacağı maddenin çeşidine göre değişmektedir. Soğuk ısı depolama sistemlerinde depolama maddesi olarak soğutulmuş su, su-buz (GED) ve ötektik tuzlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Suyun kolay bulunabilirliği, zararsızlığı, termodinamik özellikleri ve sistem elemanlarının kolay bulunabilirliği gibi önemli özelliklerinden dolayı soğuk ısı enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Soğuk olarak ısı enerjisi depolanırken, depolama işleminin duyulur olarak mı; yoksa gizli olarak mı yapılacağı hakkındaki karar aşağıda sıralanan parametrelere göre verilebilir. Bu parametrelerin tamamı göz önünde bulundurularak bir mahâl için en uygun soğuk ısı enerji depolama sistemi tasarlanabilir.

- o Depolama kapasitesi
- o Depolama süresi (kısa süreli, uzun süreli)
- o Depolama ortamı ya da malzemesi
- o Enerji kaynağı (güneş, rüzgar, hidrolik, elektrik vb.)
- o Çevrenin fiziksel şartları (alanı, hacmi vb.)
- o İşletme şartları

1.4. Buzda Soğuk Isı Enerji Depolama

Buzda soğuk ısı enerji depolama ya da kısa adıyla buzda (buzlu) enerji depolama (BED) sistemleriyle soğutma yükü, su-buz faz değişimi sırasında gerekli olan ya da açığa çıkan gizli enerjiden yararlanılarak daha sonra kullanmak için depolanabilir. Su-buz karışımı, soğutulmuş suya göre ciddi miktarda hacim avantajına sahip olduğu için yüksek soğutma yüküne sahip mahâllerde genellikle tercih edilmektedir (Şekil ??). BED sistemlerinin çalışma prensibi; enerji depolama ve ısı enerji depolama sistemlerinin çalışma prensipleri ile aynıdır (Şekil 1.2). BED sistemlerinde, enerji yükleme periyodunda buz elde edilir. Daha sonra bu buzlar bir depolama tankı içerisinde kullanılıncaya kadar bekletilir (depolama periyodu). Son olarak

depolanan buzlar; enerji boşaltma periyotunda, soğutma yapmak için eritilir. BED sistemlerinde enerji yükleme elektrik kullanımının gece tarifesinde yapılır. Elektrik kullanımının pahalı olduğu gündüz ve pik saatlerde ise enerji boşaltma işlemi yapılır. Böylece BED sistemleriyle bir mahâli soğutma için gerekli olan elektrik tüketim maliyetleri düşürülebilir. Bu sayede hem soğutma daha ucuz bir şekilde sağlanmış olur hem de elektrik kullanımının pik yükünü azaltmaya katkı sağlamış olur. BED sistemleri, buzun depolama tankına nasıl geldiğine göre statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

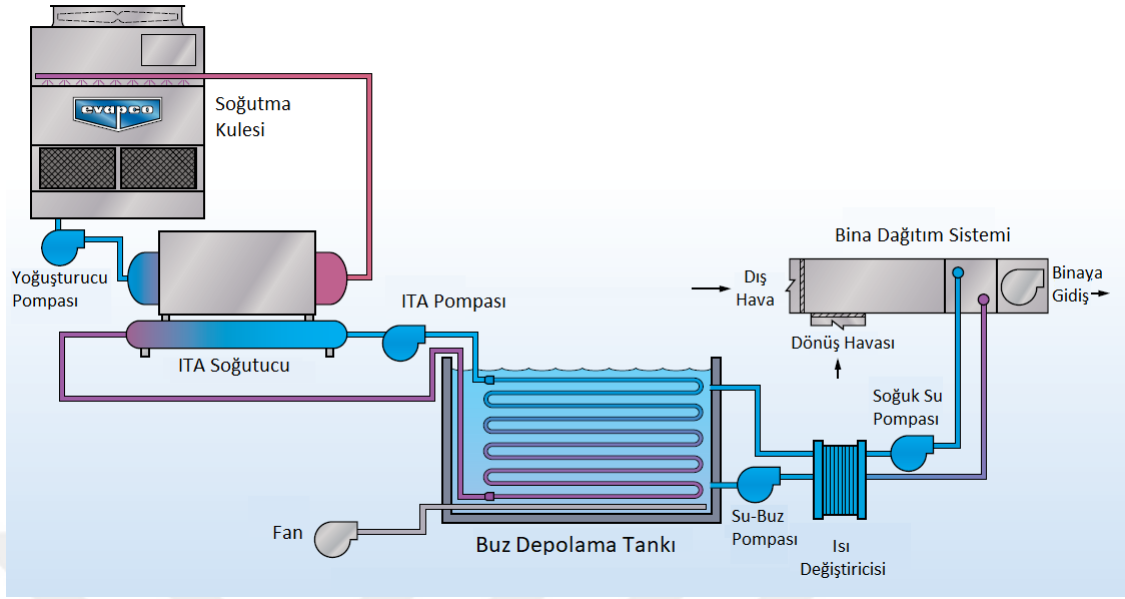
1.4.1. Statik BED Sistemleri

Statik BED sistemleri, literatürdeki BED sistemleri arasındaki en eski yöntemdir. Statik sistemlerde buz, ITA aracılığıyla bir depolama tankı içerisinde elde edilir. Bu sistemlerde ITA ile su-buz birbirine karışmamaktadır. Buz; tank, boru, boru demeti, serpantin, kapsül gibi içerisinde su bulunan kapalı hacimler içerisinde elde edilir. Buzun eritilmesi yani kullanılması aşamasında da yine ITA kullanılır. Enerji yükleme periyotunda elde edilen buzlar, enerji boşaltma periyotunda tank içerisinde eritilmekte ve ITA soğutulmaktadır.

1.4.1.1. Boru Üzerinde Buzlanma (ice-on-coil) Yapılan BED Sistemleri

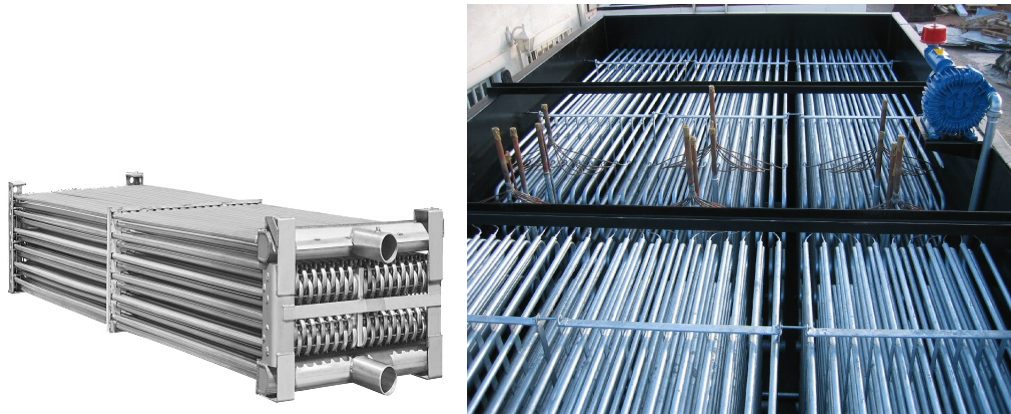
Bu statik BED türünde suyun katılaşması boru üzerinde gerçekleşir. Şekil 1.4'de boru üzerinde katılaşmanın olduğu BED sisteminin şematik görünümü verilmiştir. Bu sistemde, buz depolama tankı içerisinde boru demetleri bulunmaktadır. Bu boruların içinden ise ITA akmaktadır. Tankın içerisinde su bulunmaktadır. Enerji yükleme periyotunda, boru demetleri içinden sıcaklığı suyun donma sıcaklığından daha düşük olan ITA geçer. Soğuk ısı transferi akışkanı boru demetleri üzerindeki suyun donmasını sağlar. Enerji boşaltma periyotunda ise boru içerisinden sıcaklığı buzun sıvılaşma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta ITA akar. Bu akışkan enerjisini boru üzerindeki buza aktararak soğur. Soğumuş ITA bina dağıtım birimlerine giden ısı değiştiricisine gider. Burada bina dağıtım merkezinden gelen sıcak suyu ya da sıcak havayı soğutmada kullanılır.

Boru üzerinde katılaşmanın olduğu BED sistemlerindeki boru demetlerinin



Şekil 1.4. Boru üzerinde buzlanmanın yapıldığı BED sisteminin şematik gösterimi [8]

görünümü Şekil 1.5’de görülmektedir. Bu sistemlerde sistem performansı üzerindeki en büyük etkiye boru demetlerinin yapısı sahiptir. Boru demetlerinin birbiri arasındaki mesafe buzlanmanın kontrolü açısından önemlidir. Depolanacak enerji miktarına göre boruların çapı, aralarındaki mesafe, dizilim şekilleri (sıralı ya da kaydırılmış), boruların uzunluğu iyi bir şekilde tasarlanmalıdır. Boru üzerinde buzlanma sistemleri büyük kapasiteli sistemlerde kullanıldığı kadar küçük kapasiteli sistemlerde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sistemler aynı zamanda buz bankası BED sistemleri olarak da adlandırılmaktadır.

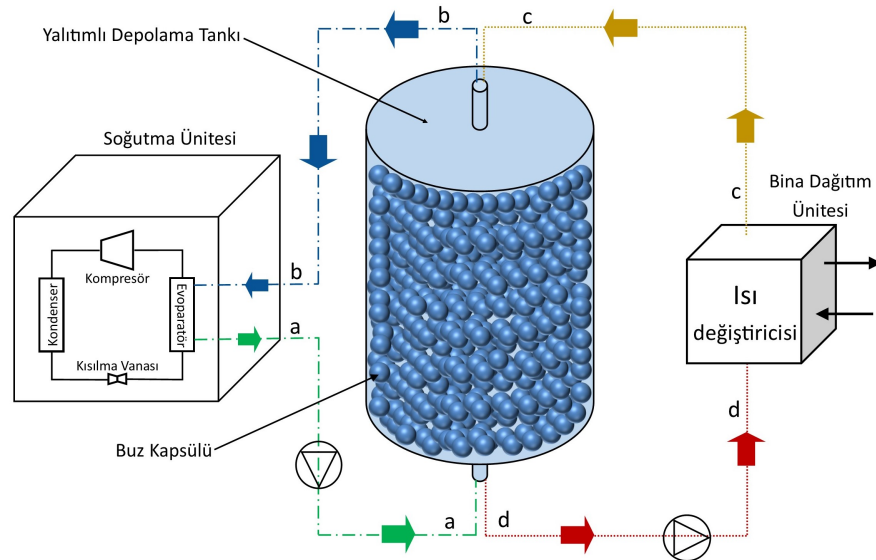


Şekil 1.5. Boru üzerinde buzlamalı BED sistemlerinde kullanılan boru demetlerinin görünümü [8]

1.4.1.2. Kapsüllü (encapsulated) BED Sistemleri

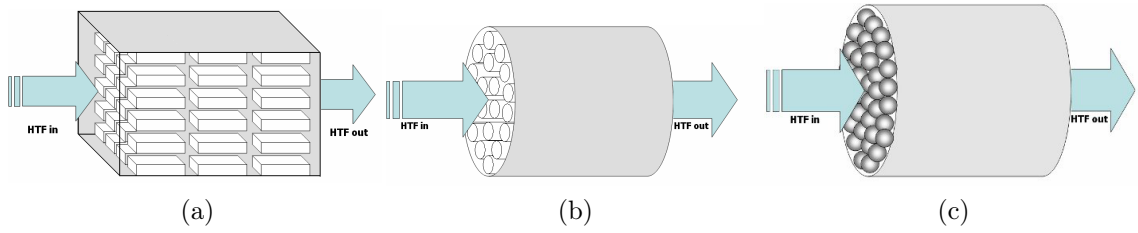
Kapsüllü BED sistemleri, statik BED sistemi olup; buz depolama tankı içerisinde

çok sayıda kapsül adı verilen elemanlar bulunmaktadır. Kapsüller, hacmi buz depolama tankına göre çok küçük olan içerisinde su bulunan elemanlardır. Kapsüllü BED sistemlerinin şematik görüntüsü Şekil 1.6'de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere kapsüllü BED sistemleri; depolama tankı, soğutma ünitesi, buz kapsülleri, ısı değiştiricisi ve pompadan oluşmaktadır. Depolama tankı içerisinde, depolanacak enerjinin miktarına göre çok sayıda buz kapsülü bulunur. Kapsüllü BED sistemlerinde enerji yükleme periyotunda buz tankı içerisine sıcaklığı 0°C 'nin altında ısı transferi akışkanı gönderilir. Böylece kapsüllerin içindeki suyun katılaşması sağlanır. Enerji boşaltma periyotunda ise tanka sıcaklığı 0°C 'nin üstünde sıcaklıkta ısı transferi akışkanı yollar. Böylece ısı transferi akışkanının sıcaklığı, buz kapsüllerine ısı enerjisi aktardığından düşer. Sıcaklığı düşen ısı transferi akışkanı ise ısı değiştiricisine gönderilir. Burada bina dağıtım birimlerinden gelen sıcak suyun ya da havanın soğutulmasını sağlar.



Şekil 1.6. Kapsüllü BED sisteminin şematik gösterimi

Kapsüllü BED sistemlerinde kullanılan kapsüllerin çok sayıda farklı şekli vardır. Bu şekiller en genel anlamda prizmatik, silindirik ve küreseldir. Uygulamalarda kullanılan kapsüllerden bazıları Şekil 1.7'de görülmektedir. Bu şekillerin hacminin yüzey alanına oranı dikkate alındığı zaman küresel kapsüller prizmatik kapsüllere göre ısı geçişi açısından daha iyi performansa sahiptir. Ayrıca kapsüller etrafındaki dış akış dikkate alındığı zaman, basınç düşümü açısından yine küresel kapsüller daha iyi performans göstermektedir. Kapsüllü BED sistemlerinde depolama tankı içerisinde tank boyutuna göre çok küçük boyutta ve çok sayıda kapsüller



Şekil 1.7. Yayın olarak kullanılan kapsül şekillerinin şematik olarak gösterimi [9] bulunmaktadır. Bu yüzden, içerisinde buz kapsülü bulunan tank gözenekli ortam olarak modellenmektedir. Küresel kapsüller tank içerisinde gözeneklilik açısından da diğer kapsül tiplerine göre daha iyi performans göstermektedir. Yukarıda sıralanan nedenlerden küresel kapsüller uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Bazı ticari firmalar küre kapsül şekilleri üzerinde değişiklikler yaparak kapsüllerin ısı performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Ticari uygulamalarda kullanılan kapsüllerden bazılarının görüntüsü Şekil 1.8’de görülmektedir. Bu kapsüller BED sistemlerinin uygulaması yapan şirketler tarafından geliştirilmiştir ve çoğu patentli üründür.



Şekil 1.8. Ticari uygulamalarda kullanılan bazı buz kapsüllerinin görüntüleri [10]

Buz kapsüllerinin (buz topu (ice ball), buz küresi (ice sphere) olarak da adlandırılmaktadır) içerisinde saf su bulunmaktadır. Ayrıca su-buz faz değişimi sırasındaki hacim değişimini tolere etmesi açısından buz kapsüllerinin içerisinde bir miktar hava boşluğu bırakılmaktadır. Ayrıca su içerisine, donma sıcaklığı altında katılaşma (supercooling ya da undercooling) etkisini azaltmak için az miktarda mineral tuzda eklenebilmektedir. Bu tuz donma esnasında katılaşma olmadan suyun 0°C altına düşmesini engellemektedir. Donma sıcaklığı altında katılaşma etkisi buzlanma için gerekli olan enerji miktarını ve katılaşma süresini arttırmaktadır.

Bu yüzden bu olumsuz etkiden kaçınılmak istenmektedir.

1.4.2. Dinamik BED Sistemleri

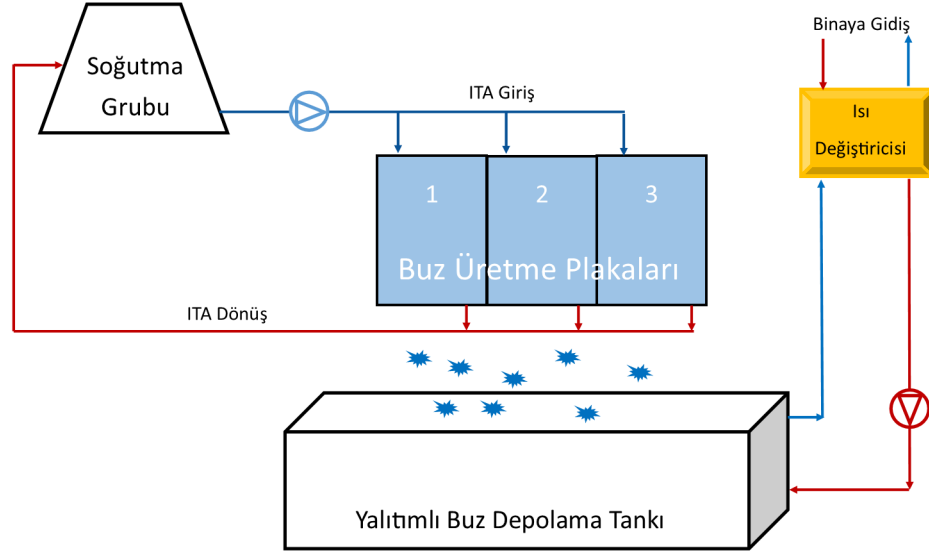
Dinamik BED sistemlerinde buz, depolama tankının dışında buz yapma yüzeyinde periyodik olarak elde edilir ve depolama tankına gönderilir. Dinamik BED sistemlerinde ITA ve su-buz birbirine karışmaktadır. Statik BED sistemleri ısı performans açısından dinamik BED sistemlerine göre daha düşük durumda olmasına rağmen, statik BED sistemleri uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu duruma neden olan en önemli etken dinamik BED sistemlerinin, statik BED sistemlerine göre daha karmaşık yapıda sisteme sahip olmasıdır. Bu karmaşıklık sistemin hem ilk yatırım maliyetlerini hem de bakım ve servis masraflarını da arttırmaktadır.

1.4.2.1. Buz Hasatı (ice harvester) BED Sistemleri

Buz hasatı BED sistemlerinde buz, düşey pozisyonda duran soğutma sisteminin buharlaştırıcısında elde edilmektedir. Su, depolama tankı ile buharlaştırıcısının yüzeyi arasında periyodik olarak sirküle ettirilir. Suyun sirkülasyonu sırasında buharlaştırıcı yüzeyinde buz elde edilir. Yüzey üzerinde elde edilen buzları hasat etmek için buharlaştırıcı plakaların iç yüzeyine 5 °C sıcaklıkta gaz yolları. Böylece buharlaştırıcının yüzeyinden buz hasat edilmiş olur. Elde edilen buzlar buharlaştırıcının altında bulunan buz depolama tankına iletilir. Su ve sıcak gaz periyodik olarak çevrim halinde çalışır. Tipik bir buz hasat sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.9’de görülmektedir. Buz hasatı BED sisteminin düşey plaka üzerinde buz elde etmenin yanında boru üzerinde de buz elde etmenin olduğu sistemlerde vardır.

1.4.2.2. Buz Çamuru (ice slurry) BED Sistemleri

Buz çamuru çok yönlü bir soğutma ortamıdır. Buz çamurunun soğutma kapasitelerinin yanında, taşınma özellikleride (akıcılık) buz konsantrasyonunun ayarlanmasıyla istenilen özellikte ayarlanabilir. % 20-25 buz konsantrasyonunda, buz çamuru geleneksel soğutulmuş su gibi akar ve beş kat soğutma kapasitesi

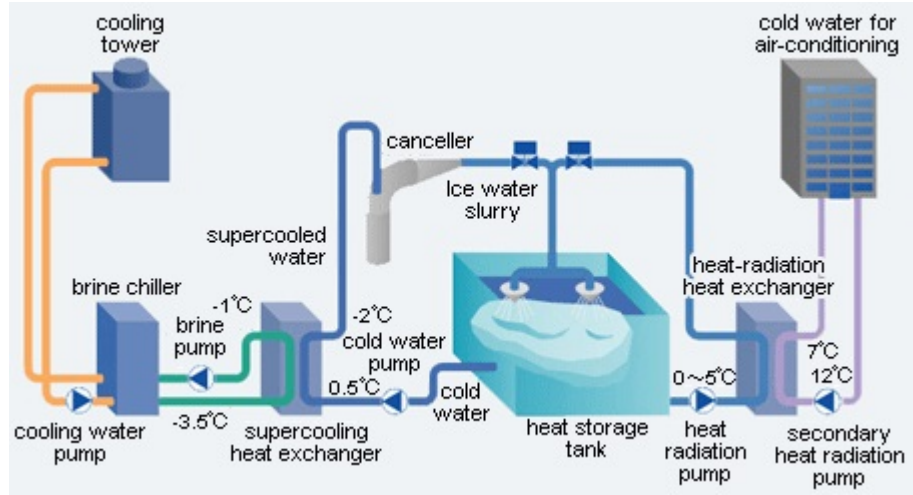


Şekil 1.9. Buz hasatı BED sisteminin şematik olarak gösterimi

sağlar. %40-50 buz konsantrasyonunda, bir buz çamuru akışı, yoğun kıvamlı çamur özellikleri gösterir. %65-75 konsantrasyonda, buz çamurunda yumuşak dondurma kıvamı vardır. Buz çamuru kuru formda (%100 buz) üretildiğinde, çeşitli ürün ve süreçlerde doğrudan kullanılabilen, yapışmayan dökülen buz kristalleri formunu alır. Buz çamuru, pompalanabilen kristalize su bazlı bir buz çözeltisidir ve pompalamak için yeterli miktarda sıvı kalırken, soğuk termal enerji depolaması için ikincil bir soğutma ortamı sunar. Geleneksel soğutulmuş su gibi akarken, beş ila altı kat daha fazla soğutma kapasitesi sağlar. Yani buz çamuru sistemi, diğer dinamik sistem türlerine göre pompalanabilir bir karakteristik avantajı sunan dinamik bir BED sistemi türüdür. Şekil 1.10'de buz çamuru BED sisteminin şematik görünümü verilmiştir. Buz çamuru BED sisteminde, buz hasatı BED sisteminde olduğu gibi suyun katılaşması buz depolama tankının dışında gerçekleşir. Sistemde elde edilen buzlar, buz tankına pompa aracılığı ile gönderilir. Enerji boşaltma durumunda da tank içerisindeki buz çamuru bir ısı değiştiricisi içerisinde bina dağıtım sistemlerine giden suyun soğutulmasını sağlar.

Buz çamuru sistemlerinin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [6]:

- o Yüksek enerji verimliliği
- o Maliyet açısından daha efektif tank tasarımı



Şekil 1.10. Buz çamuru BED sisteminin şematik olarak gösterimi [11]

- Kompakt ekipman
- Daha düşük sıcaklık sağlama
- Esnek tank tasarımı
- Daha az bakım gerektiren tank tasarımı
- Kolay modifikasyon
- Yüksek kapasitelere daha kısa sürede cevap verebilmesi

Yukarıda sıralanan olumlu özelliklerine rağmen buz çamuru BED sistemleri statik sistemler kadar yaygın değildir. Çünkü ilk yatırım maliyetleri statik sistemlere göre oldukça yüksektir. Sistemin kendisi ve ekipmanları daha kompleks bir yapıya sahiptir. Bu yüzden genellikle depolama kapasitesinin yüksek olduğu yerlerde tercih edilmektedir.

1.5. Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Enerjinin çok sayıda çeşidi olduğu gibi, çok sayıda da depolama yöntemi vardır. Bu depolama yöntemlerinden ısı enerjisi depolama gelişmiş ve yaygın olarak kullanılanıdır. Isıl enerji depolama, genellikle ısıtma ve soğutma uygulamalarında enerji kaynağının aktif olduğu ve ihtiyaç olduğu zamanlar arasındaki eşleşme problemini çözmek için kullanılmaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri duvarlı, gizli ve kimyasal ısı enerjisi depolama olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Ayrıca depolama ortamının sıcaklığına göre soğuk, düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta ısı enerjisi depolama sistemleri olarak da sınıflandırılabilir.

Soğuk enerji depolama, kapalı hacimlerin soğutma kapasitelerini depolamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Soğuk enerji depolamada temel amaç; soğutma elektrik tüketim maliyetlerini düşürmek ve/veya soğutma için gerekli olan soğutma gruplarının kapasitelerini düşürmektedir. Soğuk enerji depolama sistemlerinden BED sistemleri; sağladığı büyük hacim avantajından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. BED sistemlerinde enerji yükleme (buz elde etme) elektriğin ucuz olduğu pik olmayan saatlerde yapılır. Daha sonra elde edilen buzlar depolama periyotu süresince bir tank içerisinde tutulur. Daha sonra enerji boşaltma periyotunda, depolanan buzlar eritilerek bina soğutması gerçekleştirilir. BED sistemleri ile soğutma yükü pik olmayan saatlere kaydırılır ve soğutma işlemi çok uygun maliyetlerle gerçekleştirilebilir. BED sistemleri sağladığı önemli ekonomik avantajlardan dolayı ciddi bir potansiyele sahiptir.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, BED sistemleri ile alakalı daha önce yapılmış olan çalışmalar kapsamlı bir şekilde irdelenmiştir. Literatürde var olan çalışmaların ışığında tez çalışmasının odaklandığı konular, materyal ve metotlar belirlenmiştir. Tez çalışmasının özgün yönleri ortaya konmuştur. Ayrıca dünya genelinde gerçekleştirilmiş BED sistemi uygulamalarından bazı örnekler sunulmuştur.

2.1. Literatür Taraması

Bir önceki bölümde, BED sistemlerinin ekonomik açıdan ciddi bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştı. Sağlamış olduğu ekonomik fayda ve ciddi potansiyelden dolayı; BED sistemleri zaman içerisinde çok sayıda araştırmacı tarafından araştırılmış ve iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Ismail ve Henriquez [12] içerisinde FDM olan küre kapsüllerin bulunduğu ve içerisinde ısı transferi akışkanı (ITA) akan BED sistemi tankını irdelemek için bir sayısal model ortaya koymuşlardır. Bir boyutlu ve zamana bağlı model geliştirilmiştir. Sayısal model için sonlu fark yöntemi kullanılmıştır. Sistemin geometrik özelliklerinin ve işletme şartlarının sistem performansı üzerindeki etkisini buz yapma ve buz eritme durumları için irdelemişlerdir. ITA'nın giriş sıcaklığı, giriş debisi, kapsül malzemesinin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar buz yapma ve eritme süreleri üzerinden değerlendirilmiştir. ITA giriş sıcaklığının düşük, hızının ise yüksek olması buzlanma süresini azaltmıştır. Buna ek olarak, kapsül malzemesi olarak bakır ve PVC denenmiştir. İkisinin arasında ciddi bir fark olmadığı bu yüzden maliyet ve üretim kolaylığı göz önüne alındığı zaman PVC kullanmanın daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Sehar ve arkadaşları [13] farklı iklim bölgelerinde yer alan, orta ve büyük ölçekli ofis binalarında BED kullanımının elektrik tüketimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında "Demand Response Quick Assessment Tool" adlı bir yazılım kullanarak sistemin analizini yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda BED sisteminin, enerji tüketim maliyeti açısından ciddi bir tasarruf potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. BED sisteminin bulunduğu konumun, iklim özelliklerinin ve depolamanın tamamen ya da kısmen yapılmasının sistemin ekonomik performansı üzerinde çok önemli olduğu vurgulanmıştır.

Rismanchi ve arkadaşları [14] ofis binaları için BED sistemi kullanmanın enerji, ekonomik ve çevresel yönden faydalarını araştırmışlardır. Malezya'daki ofislerin elektrik tüketiminin %57'si klima kullanımından dolayı olduğu için elektrik maliyetlerini düşürmek için BED kullanımı irdelenmiştir. Çalışmada ele alınan ofisin soğutma yükü 352 *kW* ile 7034 *kW* arasında değişmektedir. Ice-on-coil BED sistemi kullanılarak tamamen ve kısmi depolama kapasiteleri için hesaplamalar yapılmıştır. Ekonomik olarak yıllık 230,000\$ ile 700,000\$ arasında tamamen depolamada, 65,000\$ ile 190,000\$ arasında ise kısmi depolamada tasarruf yapılabileceği vurgulanmıştır. Bu hesaplamalarda sistemin düzenli servis ve bakım işlemleri de göz önüne bulundurulmuştur.

Rismanchi ve arkadaşları [15] beş farklı BED sisteminin, Malezya'daki ofis binasında kullanılmasını teorik enerjetik ve ekserjetik açıdan irdemişlerdir. Sistemin enerji verimi buz yapma durumunda en düşük %93 ile ice-harvesting BED, %98 ile kapsüllü BED'de görülmüştür. Ekserji veriminde ise durum tamamen farklıdır. En yüksek ekserji verimi %18 ile ice-on-coil sisteminde görülmüştür.

Güngör [16] iklimlendirme sistemlerinde kullanılan BED sistemlerinin uygulama potansiyeli ve enerji verimliliği açısından derleme ve değerlendirme çalışması yapmıştır. Çalışmanın sonucunda BED sistemlerinin elektriği daha ucuz kullanmak ve sistem ekipmanlarının kapasitelerini düşürmek için elverişli bir yöntem olduğunu ve yüksek bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır.

Yan ve arkadaşları [1] BED ve soğutulmuş su ile enerji depolama sistemlerini içeren bir birleşik soğuk enerji depolama sistemini uzun süreli (seasonal) depolama durumunda incelemişlerdir. Sistemde depolama tankı olarak iç içe geçmiş bir tank

kullanılmıştır. Tankın iç kısmında buz, dış halkasal kısımda ise soğutulmuş su bulunmaktadır. Buz yapma (enerji yükleme) kışın soğuk aylarda yapılmaktadır. Yazın ise buzlar soğuk su elde etmek için kullanılmaktadır. Elde edilen soğuk su ise bina soğutmasında kullanılmaktadır. Çalışma, Beijing’de bir binaya uygulanmıştır. Çalışmada buz üzerinde buzlanma (ice-on-coil) BED sistemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda binanın soğutma maliyetinin %40’a kadar azaltılabileceği belirtilmiştir.

Biyanto ve arkadaşları [17] soğutulmuş sulu soğuk enerji depolama sisteminin Endonezya’daki bir alışveriş merkezine uygulaması ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada soğutma gruplarının kapasitesi, soğutma yükü ve ısı kaybı simplex lineer programlama ile minimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda elektrik tüketiminin %20’ye ilk yatırım maliyetini ise %11’e kadar azaltılabileceği belirlenmiştir.

Rosen ve arkadaşları [18] BED sistemlerini termodinamik açıdan değerlendirmiştir. Çalışmada bir ofis binasının saatlik soğutma yükü üzerinden hesaplamalar yapmışlardır. Çalışmasının sonucunda BED sistemlerinin performansını belirlemede enerji analizinin tek başına yeterli olmayacağı, enerji analizinin yanında ekserji analizinin mutlaka yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Çünkü enerji verimi değeri tüm saatlerde % 99.7 ve üzerindeyken, ekserji verimi değeri %50.9 ile %99.5 arasında değişmektedir. Bu değerlerden görüldüğü üzere enerji analizi sonuçlarına göre sistem her koşulda mükemmel yakın bir değerde çalışmaktadır. Ancak ekserji analizleri dikkate alındığı zaman, sistemin iyileştirilmesi için ciddi bir potansiyel olduğu görülmektedir.

MacPhee ve Dinçer [19], uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bazı buz kapsüllerinin enerji boşaltma durumundaki performanslarını sayısal olarak termodinamik açıdan değerlendirmiştir. Çalışmada katılma ve erime süreleri de performans değerlendirmesi açısından kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, enerji verimliliği açısından en iyi performansı dikdörtgenler prizması şeklindeki kapsül gösterirken, ekserji verimliliği açısından en iyi performansı küresel kapsüller göstermiştir. Ayrıca ITA giriş hızının ısı performans üzerindeki etkisinin, sıcaklığının etkisine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, viskoz

yayılmanın neden olduğu ekserji yok oluşunun etkisi, faz değişimi sırasındaki ısı geçişinin etkisinin yanında çok daha az olduğu vurgulanmıştır.

Acar ve Dinçer [20] bir mekanda kullanılan buz çamuru BED sistemi için enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında sisteminin termodinamik analizlerini saatlik soğutma yüküne göre yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda COP değerini 2.45, ekserji yok oluşunu 64 kW ve ekserji verimini ise %47 olarak bulmuşlardır.

MacPhee ve arkadaşları [21], kapsüllü buz depolama sistemlerindeki katılaşmayı sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada buz depolama tankının duvarından olan ısı kazancı etkisi ve ısı yayılımı ihmal edilmiştir. Ayrıca enerji ve ekserji verimleri farklı kapsül şekilleri, farklı ITA giriş sıcaklığı ve akış oranları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda enerji verimi tüm durumlar için yaklaşık olarak %99.96'nın üzerinde bulunmuştur. Ancak ekserji verimi ise tüm durumlar için %72 ile %92 arasında değişim göstermektedir. Bu sonuçlarla sistemin performansını değerlendirmek için enerji veriminin çok anlamlı sonuçlar vermediği, ekserji verimini kullanmanın daha avantajlı olacağı görülmüştür. Ayrıca küresel kapsülün daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır. Son olarak, daha kısa sürede buzlanmayı sağlamak için ITA giriş hızının daha hızlı ve sıcaklığının ise daha düşük olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca entropi artışını azaltmak için ITA sıcaklığının mümkün olduğu FDM sıcaklığına yakın olması gerektiği vurgulanmıştır.

MacPhee ve Dinçer [22] kapsüllü buz depolama sistemleri için gözenekli ortamlarda ısı geçişi temel ifadelerini kullanarak, sistemin ısı geçişi ve termodinamik açıdan irdelenmişlerdir. Çalışmalarında bir boyutlu ve iki boyutlu ısı geçişi analizi yapmışlardır. Isı geçişi analizi ile buz depolama tankının merkezindeki sıcaklığın tank tabanından olan mesafe ile değişimi belirlemişlerdir. Daha sonra tank içerisindeki sıcaklık dağılımı kullanılarak sistemin termodinamik açıdan değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda bir boyutlu ve iki boyutlu ısı geçişi analizinin arasındaki çok ciddi bir fark olmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca daha önce benzer çalışmalarda vurgulandığı gibi enerji analizinin tek başına sistemi değerlendirmede yeterli olmadığı, bunun yanında ekserji analizinde yapılması gerektiğinin altı çizilmiştir.

Karthikeyan ve Velraj [23] içerisinde parafin bulunan küre kapsüllerin tutulduğu silindirik bir tank için üç farklı matematiksel model ortaya koymuşlardır. Faz değişimini modellemek için entalpi formülasyon metodu kullanılmıştır. Çalışmalarında geliştirdikleri matematiksel modelleri deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır. ITA olarak su ve hava kullanılmıştır. Küre için farklı çapların etkisi de araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda modellerin tamamının yeterli oranda sistemi incelemek için yeterli olduğunu belirlemişlerdir. Üç modelden biri hava için daha iyi sonuç verirken, biri ise su için daha iyi sonuç sergilemiştir.

Amin ve arkadaşları [24] tek bir küre üzerindeki ITA akımını sayısal olarak modellemiştir. Çalışmada yoğunluğun sıcaklıkla değişiminden kaynaklı kaldırma kuvvetlerinin etkisi ihmal edilmiştir. Küre içerisinde FDM olarak su kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, efektif termal iletim durumu için bir ampirik bağıntı verilmiştir. Bu model $\epsilon - NTU$ modeline uygulanarak erime işleminin daha kolay analiz edilebileceği vurgulanmıştır.

Erek ve Dinçer [25] ice-on-coil BED sistemini entropi ve ekserji yönünden irdelemişlerdir. Çalışmada enerji yükleme durumu dikkate alınmıştır. Çalışma sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve sayısal çalışmanın sonucu deneysel çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucunda artan Re sayısı ve daha düşük ITA giriş sıcaklığı ile ısı geçişi miktarının arttığı belirlenmiştir. Ancak Reynold sayısının ısı geçişi üzerinde daha dominant bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Boru çapının artması entropi artışı artırırken, boru boyunun entropi artışı üzerinde önemli bir etkisi bulunmadığı bulunmuştur.

Regin ve arkadaşları [26] içerisinde parafin bulunan küre kapsüllerin tutulduğu bir gizli IED sisteminin davranışını incelemişlerdir. IED sistemi güneş enerjili su ısıtma sistemine entegre edilmiştir. Sayısal modelleme sırasında entalpi metodu kullanılmıştır. Model hem enerji yükleme, hem de enerji boşaltma periyotları için uygulanmıştır. Sayısal modelden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Ryu ve arkadaşları [27], içerisinde %2 sodyum sülfat dekahidrit bulunan kürelerin kullanıldığı soğuk enerji depolama sisteminin incelemesini yapmışlardır. Çalışmalarında yatay ve dikey durumdaki depolama tankının ısı performansı; ısı

geçişi oranı, COP ve FDM'nin donma noktası altı sıcaklıkta katılaşma açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, tankın düşey durumda kalması daha iyi ısı performans gösterdiği belirlenmiştir. Depolanan enerji miktarını hesaplamak için Fourier, Stefan ve Reynolds sayılarını içeren bir korelasyon denklemi sunulmuştur. Ayrıca donma noktası altı sıcaklıkta katılaşma etkisinin genelde tankın girişinde ve çıkışında görüldüğünü belirtmişlerdir.

Kousksou ve arkadaşları [28] içerisinde buz kapsülü bulunan bir silindirik tank için iki boyutlu, gözenekli ortam modellemesi ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında katılaşmayı geciktiren donma noktası altında katılaşma etkisi üzerinde durmuşlardır. Ayrıca tankın düşey ve yatay pozisyonu için de incelemede bulunmuşlardır. Çalışmalarının sonucunda düşey tankların daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Çünkü düşey tankta doğal taşınımından kaynaklanan hareketlerin yönü (kaldırma kuvvetleri - buoyancy forces), zorlanmış taşınımın hareketlerinin yönü ile aynıdır.

Ismail ve arkadaşları [29] içerisinde su bulunan küredeki katılaşma durumunu sonlu fark yaklaşımı metodunu kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kapsül çapı, kapsül malzemesi, dış ortam sıcaklığı ve başlangıç FDM sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Sayısal model deneysel çalışmalar ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır. Çalışmada kapsül çapının yüksek olmasının katılaşmayı hızlandırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca dış ortam sıcaklığının çok etkisi olmadığı, başlangıç FDM sıcaklığının ise mümkün olduğu kadar katılaşma sıcaklığına yakın olması gerektiği vurgulanmıştır.

Beghi ve arkadaşları [30] BED sisteminin entegre edildiği bir iklimlendirme sistemine enerji verimliliği tabanlı bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada standart kontrol stratejileri, linear olmayan kontrol sistemleri ile kıyaslanmıştır. Modelleme işlemleri için Matlab/Simulink kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda lineer olmayan kontrol stratejisinin daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Lemort [31] ısı kazancının aynı zamanda soğutma yükünün yüksek olduğu sıcak günlerin yanında, ısı kazancının nispeten daha düşük olduğu günlerde de BED sistemlerinin kullanım stratejisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu kapsamda, var olan bir sistem için üç farklı enerji yükleme ve boşaltma kontrol

stratejisi uygulanmıştır. Stratejilerin performansı, işletme maliyeti ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda buz depolama sistemlerinin enerji tüketimini arttırırken (yüksek kapasiteli soğutma grubu kullanımından dolayı), enerji tüketim maliyetleri açısından da tasarruf sağladığı belirtilmiştir.

ElGhnam ve arkadaşları [32] küre buz kapsülleri için katılaşma ve erime durumlarının irdelenmesini deneysel olarak yapmışlardır. Farklı küre kapsül çapları ve malzemeleri denenmiştir. Isı transferi akışkanı olarak %35 glikol-etilen kullanılmıştır. Küre çapı ve malzemesinin yanında ITA giriş sıcaklığının ve debisinin etkisi de irdelenmiştir. Çalışmada performans değerlendirmesi yapılırken, katılaşma ve erime süresi, katılaşma ve erime sırasındaki hacim oranları, depolanan ve geri alınan enerji miktarları ve EER değerleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda metalik kapsüllerin, artan çapta ve düşük ITA debisinde daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Navidbakhsh ve arkadaşları [33] kısmi depolama yapılan bir BED sistemi için enerji, ekserji, ekonomi ve çevre (Four E) yaklaşımı ve optimizasyon işlemi uygulamışlardır. Optimizasyon için genetik algoritma kullanılmış olup, ekserji verimi ve toplam maliyet amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Çalışmada buz depolamanın kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar kıyaslanmıştır. Elektrik tüketimi açısından hibrit buz depolama sisteminin %17.1 daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca CO_2 emisyonu açısından hibrit buz depolama sistemi %17.5 daha az salınım yaptığı belirtilmiştir. Sistemin geri ödeme süresinin 3.97 yıl olduğu hesaplanmıştır.

Han ve arkadaşları [34] Jiangsu, Çin için BED sisteminin ekonomik olarak katkısını teorik olarak araştırmışlardır. GAMS-based isimli optimizasyon programını kullanmışlardır. Çalışmalarında mevcut durumdaki elektrik tarifesinin, buz depolama sistemleri için bir bariyer teşkil ettiğini belirtmişlerdir. Ancak şuan ki durumda dahi sistemin ekonomik olarak fayda sağladığını vurgulamışlardır. Eğer tarife düzenlenirse, BED sisteminin faydasının daha fazla olacağı belirtilmiştir.

Wu ve arkadaşları [35] $5950m^2$ 'si soğutulan alana sahip ve toplam kapalı alanı $15,110m^2$ olan bir binada buz depolama sisteminin kullanımı incelenmiştir. Bina Tapei City, Tayvan'da yer almaktadır. Çalışmanın sonucunda pik yükler için kullanılan yüksek kapasiteli soğutma gruplarının yerine daha düşük kapasiteli

soğutma grupları kullanılabileceğinden soğutma sistemi kurulum maliyetini azalttığı belirtilmiştir. Bu duruma ek olarak, binanın saatlik soğutma yükünün sistemin ekonomik performansı açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Çalışmalar minimum ve maksimum soğutma yükleri için gerçekleştirilmiştir. Pik saatlerdeki yüksek elektrik birim fiyatından kaçınarak, yıllık yaklaşık 45,000 \$ tasarruf elde edilebileceği hesaplanmıştır.

Cho ve Choi [36] içerisinde parafin bulunan bir kürenin donma ve erime sırasındaki ısı karakteristiğini incelemişlerdir. Parafinin donma noktası altında katılaşma (subcooling) etkisi daha düşük olduğundan dolayı tercih edildiği belirtilmiştir. Kapsül içerisindeki faz değişiminin, depolama tankının kenarında, tankın merkezine göre daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Parafin dolu kapsüllerin faz değişimi suya göre %16-72 daha hızlı olduğu bulunmuştur.

Chaichana ve arkadaşları [37] buz depolama sisteminin olduğu klima sistemi ile konvansiyonel klima sistemlerini enerji kullanımı yönünden kıyaslamak için bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada boru üzerinde buzlanma (ice-on-coil) sistemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda tamamen depolama durumunda %55, kısmen depolamada ise %15'e kadar tasarruf sağlamaktır.

Erek ve Dinçer [38] küre kapsüllü buz depolama sisteminin enerji yükleme ve boşaltma sırasında, akış yönündeki ısı transferi karakteristiğini incelemişlerdir. ITA'nın giriş sıcaklığı ve ortalama ısı geçişi katsayısı dikkate alınmıştır. Çalışmada yeni bir ısı transfer katsayısı korelasyon bağıntısı elde edilmiştir. Bu korelasyon deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, akış boyunca ısı geçiş katsayısının çok ciddi değiştiğini bulunmuştur. ITA akış boyunca azalmıştır. Bu yüzden, sistemin ısı geçişi analizi yapılırken sabit ve ortalama bir ısı transfer katsayısı almanın doğru bir değerlendirme olmayacağı vurgulanmıştır. Ayrıca katılaşma işlemi için Stephan sayısı, kapsül çapı ve üst üste kapsül sırasının önemli olduğu belirtilmiştir.

Pu ve arkadaşları [39] kümülatif ekserji analizi modelini bir BED sisteminin entegre edildiği klima sistemi için kullanmışlardır. Çalışmada BED'in olduğu ve olmadığı durum karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda BED sisteminin, daha az ekserji yok oluşuna neden olduğu belirtilmiştir.

Lee ve arkadaşları [40] BED sisteminin entegre edildiği bir klima sisteminde, optimum işletme şartlarını belirlemek için "particle swarm algorithm" kullanarak optimizasyon yapmışlardır. Bir ofis binasında kullanılan klima sistemi dikkate alınmıştır. Optimizasyon işlemi sırasında en uygun tank hacmi de belirlenmiştir. Sonuçta, artan tank hacmi ile elektrik tüketiminin ve CO_2 salınımının azaldığı bulunmuştur. Tankın büyümesi ile artan maliyet, elektrik tüketimi ve CO_2 salınımı için optimizasyon işleminin gerekli olduğu vurgulanmıştır. Sistem tasarımının, soğutma yükünün ve elektrik tarifesinin sistem performansı açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Yaşam döngüsü maliyeti optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı zaman 1800 TR-h depolama kapasitesi en optimum değer olarak bulunmuştur.

Candanedo ve arkadaşları [41] model tabanlı tahmin kontrol algoritması (model-based predictive control algorithm) kullanarak bir soğutma sistemi için elektrik fiyatı profilini optimize etmeye çalışmışlardır. Yaptıkları optimizasyonun sonucunda, tipik bir sistem için %5-20 arasında tasarruf yapılabilirken, soğutma grubu kullanımı öncelikli stratejide %20-30 arasında tasarruf yapılabilmektedir.

Chan ve arkadaşları [42] bölgesel soğutma sistemlerinde, BED sistemi kullanımını değerlendirmişlerdir. Değerlendirmelerini Hong Kong'da bulunan bir site için yapmışlardır. Parametrik çalışmalar, DOE-2 ve TRNSYS programlarını kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, farklı kısmi depolama kapasiteleri, kontrol stratejileri, elektrik tarifeleri, kurulum maliyeti ve elektrik tüketim maliyetlerini incelemişlerdir. Çalışmada elektrik yükünün %60'ı depolandığı zaman yıllık tasarruf miktarının 1.78 milyon olacağı belirtilmiştir. Geri ödeme süresinin ise 22 yıl civarında olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma buz hasatı (ice-harvesting) sisteminin kullanıldığı, başka sistemler ile geri ödeme süresinin daha da azaltılabileceği belirtilmiştir.

Chen ve Yue [43] küre kapsüllü buz depolama sisteminin ısı performansını sayısal ve deneysel olarak belirlemeye çalışmıştır. Sayısal çözümleme için laplace dönüşümü ve lumped çözüm yöntemi kullanılmıştır. Sistemin analizi sadece enerji yükleme durumu için yapılmıştır. Önerilen sayısal yöntemin buz depolama sisteminin performansını belirlemek için yeterli olduğu belirtilmiştir. Çalışmada üç farklı

boyutsuz parametre (R_{cw} , St and Ste) sistemin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. R_{cw} , St sayılarının suyun zamana göre buzlanması üzerinde ciddi etkisi vardır. Stephan sayısı sıcaklık üzerinde önemli bir etkisi olmamakla birlikte, katılaşma hızında önemli bir etkiye sahiptir.

Chen ve Yue [44] teorik ve deneysel olarak buz depolama sisteminin performansını araştırmışlardır. Bir boyutlu gözenekli ortam modelini kullanarak depolama tankının ısı karakteristiğini belirlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmanın sonuçları bir önceki makalede [43] verilen lumped çözümlemenin sonuçları ile de kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucunda gözenekli ortam modellemesinin ısı analiz yapmada daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Calvet ve arkadaşları [45] küre kapsüllü bir soğuk enerji depolama sisteminin ısı performansını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Kapsül içerisinde suya GF ve ENG olmak üzere iki farklı grafit eklenmiştir. Grafit eklemek buzlanma ve erime süresini GF’de %35 ve ENG’de ise %58 azaltmıştır. Eklenen grafit miktarı %13’dür. Ayrıca bu çalışma COMSOL programı ile sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal model deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Ariffin ve arkadaşları [46] küre buz kapsüllerinin donma karakteristiğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında kapsül içerisindeki sıcaklık dağılımı gibi önemli parametreleri irdelemişlerdir. Sayısal model oluşturulurken ITA ve FDM dikkate alınmıştır. Çalışmada artan küre çapı ile buzlanma süresinin arttığı belirtilmiştir.

Zhao ve arkadaşları [47] iki farklı küre kapsül için inceleme yapmışlardır. Bunlardan ilki nikel kapsül ikincisi ise çinko ve paslanmaz çelik karışımı kapsüldür. Kapsüllerin içerisinde ötektik tuz bulunmaktadır. 20 ve 50mm’lik kapsüller kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda 50mm’lik kapsülün tamamen katılaşması, 20mm’lik kapsüle göre daha uzun sürmüştür. Ayrıca kapsüller arasında depolama açısından ciddi bir fark olmadığı belirlenmiştir.

Carbonell ve arkadaşları [48] BED sisteminin ısı pompası ve güneş enerjili ısıtma sistemine entegre edilmesini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda 1m³’lük buz depolama tankı kullanılmıştır. Çalışmalarında farklı çalışma stratejileri denenmiştir.

Bu çalışmaya benzer olarak Dott ve arkadaşları [49] buz depolama sisteminin entegre edildiği güneş enerjili, BED'in entegre edildiği ısı pompası sistemini irdelemişlerdir.

Chen ve arkadaşları [50] enerji yükleme periyodundaki BED sisteminin ısı performansını ve basınç düşümünü deneysel olarak araştırmışlardır. Kapsül olarak silindirik kapsüller kullanılmıştır. Düşük ITA giriş sıcaklığı ve yüksek ITA debisinin depolama açısından daha yüksek performans sağlayacağını vurgulamışlardır.

Assis ve arkadaşları [51] bir küre içerisindeki erimeyi sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Kürenin içerisinde FDM olarak parafin-wax kullanılmıştır. Çalışmada küre çapını 40, 60 ve 80mm olarak alınmıştır. Ayrıca küre yüzey sıcaklığı olarak ise 2 ile 20°C arasında farklı sıcaklıklar denenmiştir. Çalışmanın sonucunda, erime süresinin kürenin çapına ve kürenin yüzey sıcaklığına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmada küre çapının ve yüzey sıcaklığının artması ile erime hızının arttığı belirtilmiştir.

Verma ve arkadaşları [52] gizli ısı enerji depolama sistemlerin matematik modelleri ile alakalı kapsamlı bir derleme-değerlendirme çalışmaları yapmışlardır. Çalışma kapsamında gizli ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılan matematiksel modelleri, bu modellerin hangi şartlar altında kullanıldığı ve nasıl doğrulandığı ile alakalı bir tablo hazırlanmıştır.

Regin ve arkadaşları [53] kapsüllü gizli ısı enerji depolama sistemlerinin ısı geçişi karakteristiği ile alakalı kapsamlı derleme-değerlendirme çalışması yapmışlardır. Çalışmada çeşitli kapsül tipleri ve kapsüllerin tutulduğu tanklar ile alakalı ısı geçişi analizi yöntemleri irdelenmiştir. Çalışmasını son kısmında ısı geçişi analiz yöntemleri ile alakalı literatürde kullanılan yöntemler bir tabloda verilmiştir.

Ismail ve Stuginsky [54] parçacık yataklı ısı enerji depolama sistemlerinin (packed-bed thermal energy storage system) ısı analizlerinde kullanılan dört farklı matematiksel modelin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada kullanılan modeller; sürekli katı faz modeli (the continuous solid phase model), Schumann modeli, tek fazlı (the single phase model) model ve ısı yayılım (the thermal diffusion model) modelidir. Bu modeller içerisinde, ısı yayılım modeli kapsül içerisindeki sıcaklık dağılımını da dikkate almaktadır. Bu modeller kullanılarak, bir ısı enerji

depolama sistemi için parçacık boyutu, depo içerisinde sıvı hacmin oranının kapsül hacmine oranı (volume fraction), parçacıkların malzemesi, ısı transfer akışkanının debisi ve giriş sıcaklığının etkisi parametrik olarak irdelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, modellemelerin kıyaslanması hesaplama süresi üzerinden yapılmıştır. Katı faz modeli en hızlı çözümü verirken, ısıl yayılım modeli en yavaş model olmuştur. Parametrik analizlerin sonucunda, aşağıdaki açıklanan bulgular elde edilmiştir. Artan parçacık çapı ile yatak içerisindeki basınç düşümü azalırken, Nusselt sayısı ve ısı geçişi miktarı artmaktadır. Artan ITA debisi ile depolanan enerji miktarı da artmaktadır. ITA özgül ısısının da yüksek olması depolanan enerji miktarını arttırmaktadır. Depolama malzemesinin ısı iletim katsayısının yüksek olması enerji yükleme süresini azaltmaktadır. Tank içerisindeki hacim oranı (gözeneklilik) azaldıkça depolanan enerji miktarı artmaktadır. Isı transferi akışkanın giriş sıcaklığının artmasıyla (depolama ortamı ile ITA'nın sıcaklık farkı) enerji yükleme süresi azalmaktadır.

Zalba ve arkadaşları [55] katı-sıvı olarak çalışan FDM'lerin kullandığı gizli ısı enerji depolama sistemleri ile alakalı 230 fazla referans kullanarak derleme-değerlendirme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında FDM'lerin ısı geçiş karakteristiğini ve uygulamaları irdemişlerdir. Çalışmada FDM olarak kullanılan ve kullanılabilecek tüm malzemelerin fiziksel özellikleri, avataj ve dezavatajları tablolar halinde verilmiştir. Toplamda 150'den fazla FDM türü listelenmiş ve irdelenmiştir. Ayrıca gizli ısı enerji depolama sistemlerinin ısı geçişi analizlerinde kullanılan metotlar özetlenmiştir.

Mongibello ve Graditi [56] İtalya'da bulunan tek ailenin yaşadığı bir ev için soğuk enerji depolamanın etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında soğuk sulu ve organik FDM'li iki soğutma sistemini işletme, modelleme, simülasyon ve ekonomik yönden değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda soğuk enerji depolama sistemlerinde en büyük etkinin elektrik tarifiesi olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca soğuk sulu sistemin, FDM'li sisteme göre tek ailenin yaşadığı bir ev için daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Ettouney ve arkadaşları [57] içerisinde parafin-wax bulunan küre kapsülün ısı geçişini buz yapma ve eritme durumları için irdemişlerdir. Çalışmada 2, 3, 4 ve 6cm çapında küre ve ısı transferi akışkanı olarak da hava kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalar $4-10m/s$ arasındaki ITA hızlarında gerçekleştirilmiştir. Erime ve katılaşma süresi sırası ile $5-15dk$ ve $2-5 dk$ arasında sürmüştür.

Lombard ve arkadaşları [58] binaların enerji tüketimleri ile alakalı bir derleme-değerlendirme çalışması yapmışlardır. Çalışmada enerji tüketim miktarının zaman içerisinde ciddi bir şekilde arttığı vurgulanarak, bu artışa binalardaki enerji tüketiminin neredeyse yarısını kapsayan ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin etkisinin olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, enerjiyi verimli olarak kullanma ve maliyetleri düşürme açısından önerilerde bulunulmuştur.

Mat Santamouris [59] binaların soğutulmasının geçmişi, şimdiki durumu ve geleceği ile alakalı inceleme yapmıştır. Diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada soğutma sistemlerinin ciddi elektrik tüketimine neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda 2050 yılına kadar konutlarda ve ticari binalarda soğutma için elektrik tüketimi sırasıyla %750 ve %275 oranında artacağı öngörülmüştür. Bu rakamlar soğuk enerji depolama sistemlerinin bu tüketimin maliyetini azaltmada ve pik yükü kaydırmada ne derece önemli olduğu ortaya koymaktadır.

Habeebullah [60] Suudi Arabistan'da bulunan bir camiye buz depolama sisteminin uygulanmasını ekonomik açıdan değerlendirmişlerdir. Cami $39,300m^3$ kapalı soğutulan alana sahiptir. Çalışmada tam depolama, düzgün dağılımlı soğutma grubu kullanımı için depolama ve kısmi depolama durumları irdelenmiştir. Çalışmada tekli tarifiede buz depolama sistemlerinin bir faydasının olmadığını belirtmişler ve üçlü tarifiede ise fiyat ve pik saatlerin sistemden elde edilecek olan ekonomik fayda üzerinde önemli etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

2.2. Dünya Geneline Yapılmış Olan Ticari Uygulamalar

BED sistemleri ülkemizde yaygın olmasa da dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde tek ticari uygulama bu tez çalışması kapsamında GİMSA alışveriş merkezinde kullanılan kapsüllü BED sistemidir. Buna karşın dünya genelinde farklı binalar için farklı BED türlerinin kullanıldığı çok sayıda sistem bulunmaktadır. Aşağıda BED sistemlerinin uygulandığı bazı binalar sıralanmıştır.

Şekil 2.1'de Chicago'da yer alan bir otel ve ofis binası için BED sistemi



Şekil 2.1. Chicago’da yer alan bir otel projesi [61]

uygulanmıştır. BED sisteminin kapasitesi $314,400 \text{ ton} - \text{saat}$ ($1,110 \text{ MWh}$) depolama yapılmıştır. BED sistemi ile 1°C su elde edilmektedir. Bu su bina tarafından gelen suyun soğutulmasında kullanılmaktadır.

Şekil 2.2’de Baltimore’da yer alan; stadyum, ofis binası ve turizm merkezi olarak kullanılan binaya $89,665 \text{ ton} - \text{saat}$ (317 MWh)’lik depolama kapasitesine sahip bir BED sistemi kurulmuştur. Bu çalışmada BED tankı ayrı ayrı tanklar olarak inşa edilmiştir.



Şekil 2.2. Baltimore’da yer alan bir stadyum, ofis binası ve turizm merkezi projesi [61]

Şekil 2.3’de Osaka, Japonya’da yer alan bir fuar ve ticaret merkezinde BED sistemi kurulmuştur. BED sisteminin kapasitesi $29,300 \text{ ton} - \text{saat}$ (103 MWh)’dir. Depolama sistemi yerin altına yerleştirilmiştir.

Şekil 2.4’de görülen bir üniversite kampüsü için BED sistemi kurulmuştur. BED sisteminin kapasitesi $22,782 \text{ ton} - \text{saat}$ (80 MWh)’dir. BED sisteminden bina dağıtım



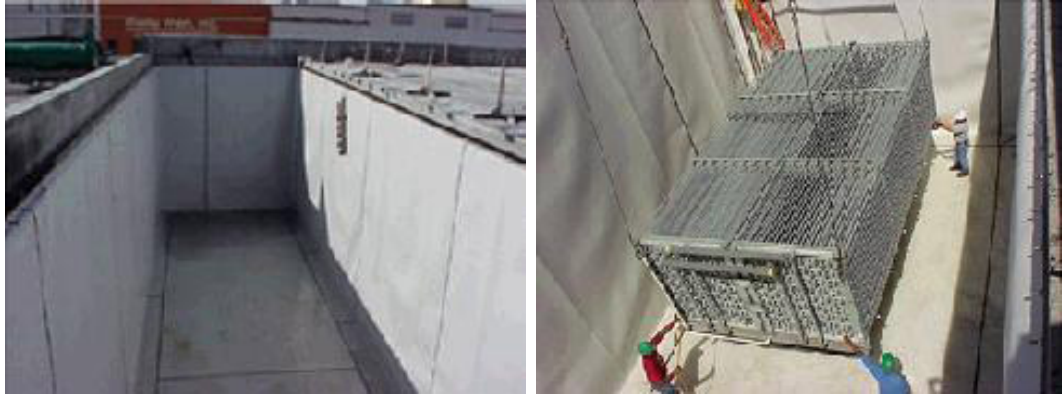
Şekil 2.3. Osaka’da yer alan bir fuar ve ticaret merkezi için BED projesi [61]
merkezlerine giden ısı değiştiricisine 2 °C sıcaklıkta soğuk su sağlamaktadır.



Şekil 2.4. Taipei’da yer alan bir kampüs için BED projesi [61]

Bu şekillerden görüldüğü üzere BED sistemi hemen her binaya uygulanabilmektedir. Yukarıda gösterilen binalar ısı kazancı ve depolama kapasitesi yüksek olanlardan seçilmiştir. Aşağıda uygulamalardan sırasında alınmış görüntüler yer almaktadır. Şekil 2.5’in sol kısmında, yer altına yapılan beton depo uygulaması görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.5’in sağ kısmında ise beton bir depo içerisine yerleştirilen ilk ice-on-coil modülü görülmektedir.

Şekil 2.6’de de metal depolama tanklarından görüntüler görülmektedir. Sol üst şekilde GİMSA’da kullanılan tankın görüntüsü görülmektedir. Sağ üst şekilde ise tankın iç kısmından alınmış bir görüntü görülmektedir. Aşağıda ise yurt dışında uygulanmış bir projenin tank görüntüsü görülmektedir. BED sistemlerinin en kolay şekilde uygulanması için binanın ilk tasarımında düşünülmesidir. Bu sayede, ciddi bir alan ve hacim gerektiren buz tankı için yer binanın mimarisinde kolaylıkla yer



Şekil 2.5. BED uygulamasında yer altına yerleştirilmiş buz depolama tankı ve içerisine yerleştirilen ice-on-coil modülü [61]

bulabilir. Var olan binalar için binanın etrafında boş arazi varsa yer altı depoları kullanılabilir. Ayrıca aynı alana yalıtılmış beton ve metal tanklarda yerleştirilebilir. Ayrıca bina içerisinde uygun bir alan varsa kat betonları kırılarak da yer açılabilir. Bu tez çalışmasında incelenen BED sistemi, binanın ilk tasarımında düşünülmediği için BED tankı için kapalı otopark kısmından yer ayrılmıştır. Daha sonra kat betonları kırılarak gerekli olan hacim oluşturulmuştur.



Şekil 2.6. Uygulamalar sırasında alınmış bazı depo görüntüleri

Bu kısımda gösterilen uygulamalar, Amerika'da yer alan Baltimore Aircoil Company [62] ve Cryogel Company [10] firmalarının yapmış olduğu uygulamalardan

derlenmiştir.

2.3. Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde, literatürde yapılmış olan çalışmalar ve dünya üzerindeki bazı ticari BED sistemi uygulamaları incelenmiştir. Yapılan bilimsel çalışmalardan ve ticari uygulamalardan görüldüğü üzere BED sistemleri uygulandığı her bina için ekonomik açıdan fayda sağlamaktadır. Ekonomik faydalar iki grup altında toplanmaktadır. Bunlardan ilki elektrik tüketim maliyetlerini azaltmaktır. İkinci ise ilk yatırım maliyetlerinde sağladığı düşüştür. BED sistemleri elektrik tüketim maliyetlerindeki düşüşü, elektrik birim fiyatının yüksek olduğu gündüz ve pik tarifiedeki soğutma yüklerini pik olmayan saatlere kaydırarak gerçekleştirmektedir. İlk yatırım maliyetlerini azaltmayı ise soğutma pik yükünü, pik olmayan saatlere kaydırarak soğutma gruplarının kapasitelerini düşürme ile gerçekleştirir. Yapılan literatür taramasında, BED sistemlerinin her türünün hemen her iklim bölgesinde, bütün bina türlerinde ve her kullanım stratejisinde ekonomik olarak fayda sağladığı görülmüştür. Ancak aynı çalışmalarda, BED sisteminden elde edilen ekonomik faydanın, BED sisteminin iyi tasarlanması ve işletme şartlarının iyi ayarlanmasıyla daha yüksek olabileceği belirtilmiştir. BED türleri arasında buz çamuru (ice slurry) sistemleri daha verimlidir. Ancak buz çamuru sistemleri daha kompleks elemanlar ve karmaşık sistem yapısı gerektirdiğinden daha yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir. Bu yüzden ticari uygulamalarda statik sistemler kadar ilgi görmemiştir.

BED sistemlerinde, sistem elemanları sistem performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu yüzden sistem elemanlarıyla alakalı çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda aşağıdaki önemli bulgulara ulaşılmıştır.

- o Kapsüllü buz depolama sistemlerinin ısı performans karakteristiğini belirlemek için gözenekli ortam modellemesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli ortam modellemelerinden elde edilen analitik sonuçlardan, sayısal çözümlemelerden ve deneysel çalışmalardan; kapsül çapının yüksek olması, tank içerisindeki gözenekliliğin artması, ITA giriş sıcaklığı ile FDM sıcaklığını arasındaki farkın yüksek olması ve ITA giriş debisinin yüksek olması sistemin

ısı performansını arttırmaktadır.

- o Farklı kapsül malzemelerinin ısı performans açısından çok önemli bir etkisi olmamakla birlikte metal içerikli malzemelerin az da olsa daha yüksek performans sağladığı görülmektedir. Ancak bir BED sisteminde çok sayıda kapsül kullanılacağından, maliyet ve üretim kolaylığı göz önünde bulundurulduğu zaman plastik esaslı kapsüllerin kullanımı daha uygun olacaktır. Kapsül şekillerinden küre kapsüller daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca ticari firmalar tarafından geliştirilmiş, ısı performansı arttıran modifiye edilmiş küre kapsüller de kullanılmaktadır.
- o FDM olarak çok sayıda malzeme olmasına rağmen su; kolay bulunabilirliği, çok sayıda cihazla uyumlu olması ve yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.
- o Sistem performansını değerlendirmek için sistemin ve sistem elemanlarının termodinamik açıdan değerlendirmek de gerekmektedir. Termodinamik analizler sırasında enerji analizlerinin yanında, ekserji analizlerinin de yapılması gerekmektedir. Çünkü BED sistemlerinin ve sistem elemanlarının enerji verimliliği %99 civarındayken, ekserji verimliliği %1 ile 99 arasında değişim göstermektedir. Ekserji analizlerine göre sistemin iyileştirilmesi için ciddi bir potansiyel olduğu görülmektedir.
- o BED sistemlerinde rastlanan en önemli problemlerden biri; suyun donma noktası altı sıcaklıkta katılaşmaya başlamasıdır. Çünkü bu durum hem katılaşma süresini arttırmakta hem de katılaşma için gerekli olan enerji miktarını yükseltmektedir. Donma noktası altı sıcaklıkta katılaşma genellikle tankın giriş ve çıkış kısımlarında görülmektedir. Donma noktası altı sıcaklıkta katılaşmayı önlemek için suyun içerisine bazı tuzlar ve mineraller eklenmektedir.
- o BED tankı sistemin ısı performansı açısından oldukça önemlidir. Tankın ısı performansını belirlemek için tank içerisindeki sıcaklık dağılımı belirlemek önemlidir. Tank içerisindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar yaygın olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, daha önce belirtilen gözenekli ortam olarak modelleme de kullanılmaktadır.

- o Buz kapsülü şekillerinin sistem performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu yüzden kapsüllerin şekli çok iyi belirlenmelidir.
- o BED sisteminin ve sistem elemanlarının performans analizleri yapılırken; enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme (depolama) periyotları için gerçekleştirilmelidir.
- o BED sisteminden elde edilecek olan ekonomik fayda üzerinde önemli olan parametreler; BED kullanım stratejisi, elektrik tarifesı ve soğutma yükünün saatlik değişimidir. BED sisteminin tasarımı, yukarıda sıralanan parametrelere göre dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.
- o Artan depolama kapasitesi ile elde edilecek elektrik tüketim maliyeti tasarrufu artmaktadır. Ancak yine artan depolama kapasitesi ile sistemin ilk yatırım maliyetleri de artmaktadır. Bu yüzden, sistemin geri ödeme süresi ve belli bir süre (10 yıl) sonra sağladığı toplam kâr miktarı belirlenmelidir.
- o BED sistemleri sağladığı ekonomik faydanın yanında çevresel açıdan da faydaları vardır. CO_2 salınımını azaltır, küresel ısınmayı ve olumsuz çevresel etkileri azaltır.

Yapılan literatür taramasından ve ticari uygulamalardan görüldüğü üzere BED sistemleri alışveriş merkezlerinin soğutma maliyetlerini düşürmek için önemli araçtır. Bu tez çalışmasında, Ankara’da yer alan bir alışveriş merkezine BED sisteminin uygulanması incelenmiştir. Tez çalışması üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; mikro seviye çalışmalar, makro seviye çalışmalar ve ekonomik açıdan değerlendirme çalışmalarıdır. Mikro seviye çalışmalarda, BED sisteminde kullanılan kapsüllerin davranışı hem enerji yükleme hem de enerji boşaltma periyotları için sayısal olarak incelenmiştir. Makro seviye çalışmalarda, BED sisteminin ve sistem elemanlarının termodinamik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca BED tankı içerisindeki sıcaklığı dağılımı teorik olarak belirlenmiştir. Ekonomik analizler sırasında, farklı BED kullanım stratejilerinin sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılacak olan bu çalışmalar ile literatüre kapsüllü BED sistemi ile alakalı kapsamlı bir çalışma kazandırılmış olacaktır.

3. BÖLÜM

BUZ DEPOLAMA SİSTEMİNİN VE MAHÂLİN TANITIMI

Bu bölümde, tez çalışmasında incelenen alışveriş merkezi ve alışveriş merkezinde kullanılan kapsüllü BED sistemi tanıtılmıştır.

3.1. Alışveriş Merkezinin ve Mahâlin Tanıtımı

Tez çalışmasının yürütüldüğü mahâl, Eryaman, Ankara'da yer alan GİMSA alışveriş merkezidir. Alışveriş merkezinin dıştan görünüşü Şekil 3.1'de verilmiştir. GİMSA toplam 15,000 m^2 kapalı alana sahiptir. Toplam kapalı alanın 10,000 m^2 klima sistemleri ile soğutulmaktadır. Geriye kalan 5,000 m^2 'lik alan alışveriş merkezinde depo olarak kullanılmaktadır. Alışveriş merkezi toplamda 3 kattan oluşmaktadır. Alışveriş yapılan alan sadece giriş kattadır. Şekil 3.1a'de alışveriş merkezinin ön cephe görüntüsü görülmektedir. Şekil 3.1b GİMSA'nın yan cephe ve yoğunlaştırucuların olduğu kısım görülmektedir. GİMSA'nın iç kısmından alınmış bir görüntü ve dış cephesindeki BED sistemi ile alakalı tabela Şekil 3.1c ve Şekil 3.1d'da sırasıyla görülmektedir.

Alışveriş merkezi gibi insan ve cihaz yoğunluğunun fazla olduğu mahâllerde, soğutma yükü genelde yüksektir. Bu durum soğutma ihtiyacını arttırdığı gibi, soğutma işlemi için gerekli olan elektrik tüketim miktarını da arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, alışveriş merkezlerinde soğutma önemli bir ihtiyaç ve büyük bir işletme gideri olarak karşımıza çıkmaktadır. Soğutma maliyetlerini düşürmek için uygulanabilecek en uygun metot soğuk enerji depolama sistemlerini kullanmaktadır. Soğuk enerji depolama sistemleri sayesinde, alışveriş merkezlerinin soğutma maliyetlerini önemli miktarda azaltılabilir.

GİMSA Türkiye'nin en büyük süpermarket zincirlerinden biridir. 1991 yılında



Şekil 3.1. Alışveriş merkezinin görünüşü

kurulmuştur. Bugün toplam 9 şubesi ile Ankara’da hizmet vermektedir. Asıl faaliyet konusu gıda perakendeciliği ve temel ev ihtiyaçlarıdır. Merkezi Ankara Sincan OSB’de yer almaktadır. Toplamda 2250’den fazla çalışanı bulunmaktadır. GİMSA alışveriş merkezine kurulan BED sistemi, Temas Mühendislik tarafından kurulmuştur. Temas Mühendislik CRYOGEL firmasının Türkiye’deki faaliyetlerini sürdürmektedir. GİMSA ve Temas Mühendisliğin iş birliği ile Türkiye’nin ilk BED sistemi kurulmuş ve işletilmektedir.

Ankara, kurak ve bozkır iklim bölgesinde yer almaktadır. Bu yüzden yazları çok sıcak ve kurak geçmektedir. Ankara’ya ait 1950 ile 2014 yılları arasındaki meteorolojik verilerin ortalama değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablo 3.1’den görüldüğü üzere, Ankara’da yer alan binaların, bir yıl içerisinde yaklaşık 5 ay boyunca soğutmaya ihtiyacı bulunmaktadır. Bu süre mahâlin soğutma yüküne ve ısı kazancına göre daha uzayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenen GİMSA alışveriş merkezi sabah saat 8:00’da

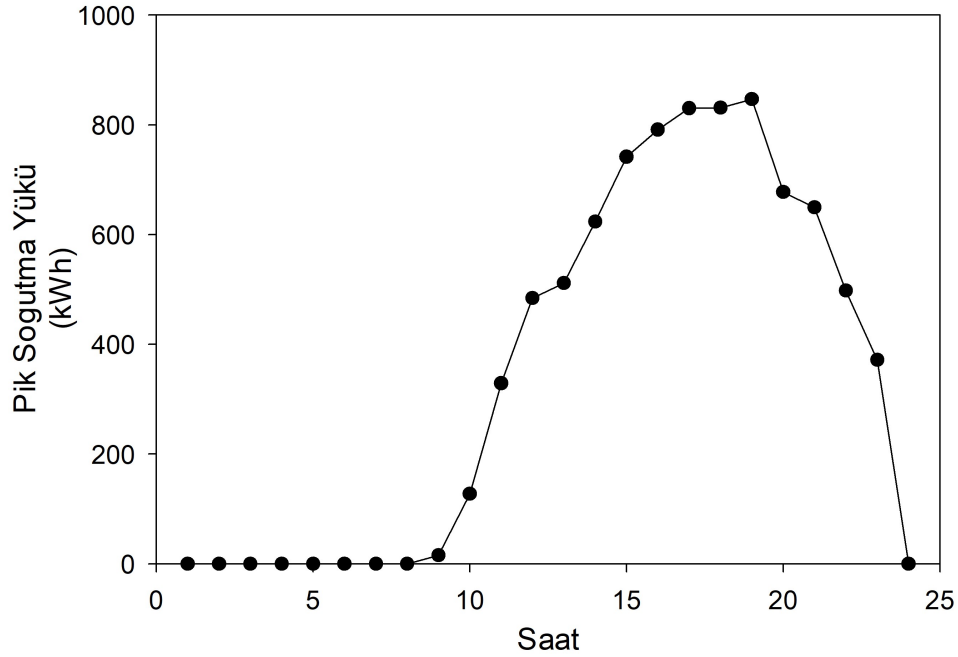
Tablo 3.1. Ankara iline ait 1950-2014 yılları arasındaki meteorolojik veriler [5]

Aylar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ort. sıcaklık	0.4	1.8	6.0	11.4	16.0	20.1	23.5	23.3	18.7	12.9	7.0	2.6
Ort. en yüksek sıcaklık	4.4	6.5	11.6	17.3	22.2	26.6	30.2	30.3	26.0	19.8	12.8	6.6
Ort. en düşük sıcaklık	-3.0	-2.2	0.9	5.6	9.6	13.0	15.9	16.0	11.8	7.2	2.4	-0.7
Ort. güneş süresi	2.5	3.5	5.2	6.4	8.4	10.2	11.3	11.6	9.2	6.5	4.4	2.3
Ort. yağışlı gün sayısı	12.3	10.9	11.0	11.7	12.6	8.8	3.8	2.7	3.9	6.9	8.5	11.6
En yüksek sıcaklık	16.6	20.4	27.8	31.1	33.0	37.0	41.0	40.4	36.0	33.3	24.4	20.4
En düşük sıcaklık	-22.4	-22.2	-19.2	-6.7	-1.6	3.8	4.5	6.3	2.5	-5.3	-13.4	-18.0

açıklamakta, akşam saat 22:00'da da kapanmaktadır. Alışveriş merkezinin saatlik pik soğutma yükü Şekil 3.2'de görülmektedir. Şekil 3.2'den görülen soğutma yükü ayrıca binaya gönderilen taze havadan kaynaklanan soğutma yükünü de içermektedir. Alışveriş merkezlerinde insan sirkülasyonu çok fazla olduğundan, hem müşterilerin hem de çalışanların iç hava kalitesini arttırmak için binaya %20 taze hava gönderilmektedir. Binanın günlük toplam pik ısı kazancı 6,589 kW 'dır. Taze havadan kaynaklı günlük pik soğutma yükü ise 1,742 kW 'dır. Böylece GİMSA'nın günlük pik soğutma yükü toplam 8,332 kW 'dır. Bu soğutma ihtiyacı klima sistemleri sayesinde karşılanmaktadır.

3.2. Çalışma Kullanılan Mahalin Elektrik Tarife Bilgisi

Soğuk enerji depolama sistemleri ve BED sistemleri elektrik tarifesinin gün içerisindeki değişiminden yararlanarak düşük maliyetli soğutma sağlamaktadır. GİMSA'da iki farklı elektrik tarifi kullanılmaktadır. Tarifelerden biri tekli tarife olup, alışveriş merkezinin aydınlatma, buz dolabı, dondurucu, yazar kasa, bilgisayar,

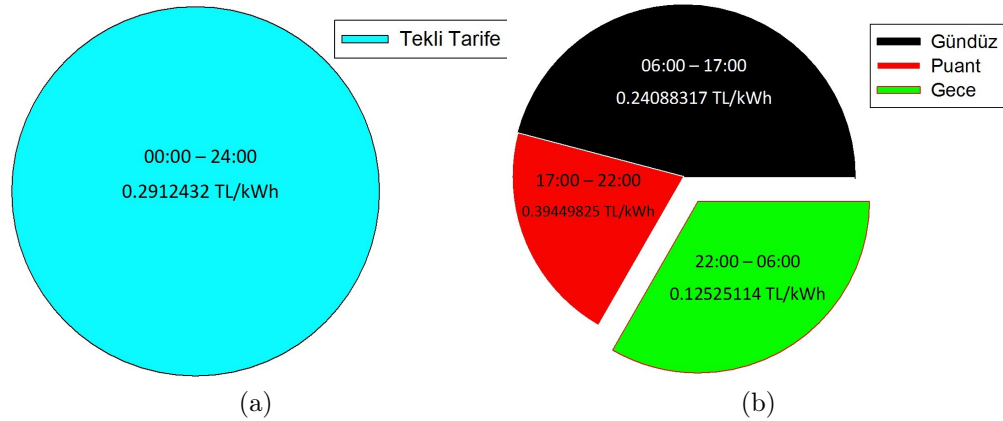


Şekil 3.2. Alışveriş merkezinin pik soğutma yükünün zamanla değişimi

Tablo 3.2. Alışveriş merkezinde kullanılan üçlü tarife elektrik birim fiyatları

Tarife	Saat aralığı	Birim Fiyatı (TL/kWh)
Gündüz	06:00 - 17:00	0.24088317
Puant	17:00 - 22:00	0.39449825
Gece	22:00 - 06:00	0.12525114

ofis ekipmanları gibi temel ihtiyaçlarında kullanılmaktadır. Diğeri ise üçlü tarife olup, soğutma sisteminde kullanılmaktadır. Böylece soğutma için üçlü tarifeden yararlanılırken, alışveriş merkezlerinin genel ihtiyaçlarında üçlü tarifenin olumsuz etkilerinden kaçınılmıştır. Alışveriş merkezinin elektrik ihtiyacı, Ankara’da elektrik dağıtım faaliyetlerini gerçekleştiren EnerjiSA firması tarafından karşılanmaktadır. EnerjiSA’dan alınan elektrik fiyatları Tablo 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir. Tablo 3.2’den görüldüğü üzere pik saatler ile pik olmayan saatler arasında 3.15 kat elektrik birim fiyat farkı bulunmaktadır. Tekli tarife elektrik birim fiyatı ise 0.2912432 TL/kWh’dir. Bu birim fiyat değerleri Temmuz 2015 dönemine ait alışveriş merkezine EnerjiSA tarafından kesilen faturalardan alınmıştır. BED sisteminin kullanılmaması durumunda, üçlü tarifede saat 17:00 ile 22:00 arasında 3.15 kat, tekli tarifede ise 2.33 kat daha fazla ödeme yapılacaktır. BED sistemleri sayesinde soğutma ihtiyacı daha düşük elektrik birim maliyetiyle karşılanmaktadır.



Şekil 3.3. Alışveriş merkezinde kullanılan elektriğin birim fiyatının grafiksel gösterimi a) Tekli tarife b) Üçlü tarife

3.3. Alışveriş Merkezinde Kullanılan BED Sisteminin Detayları

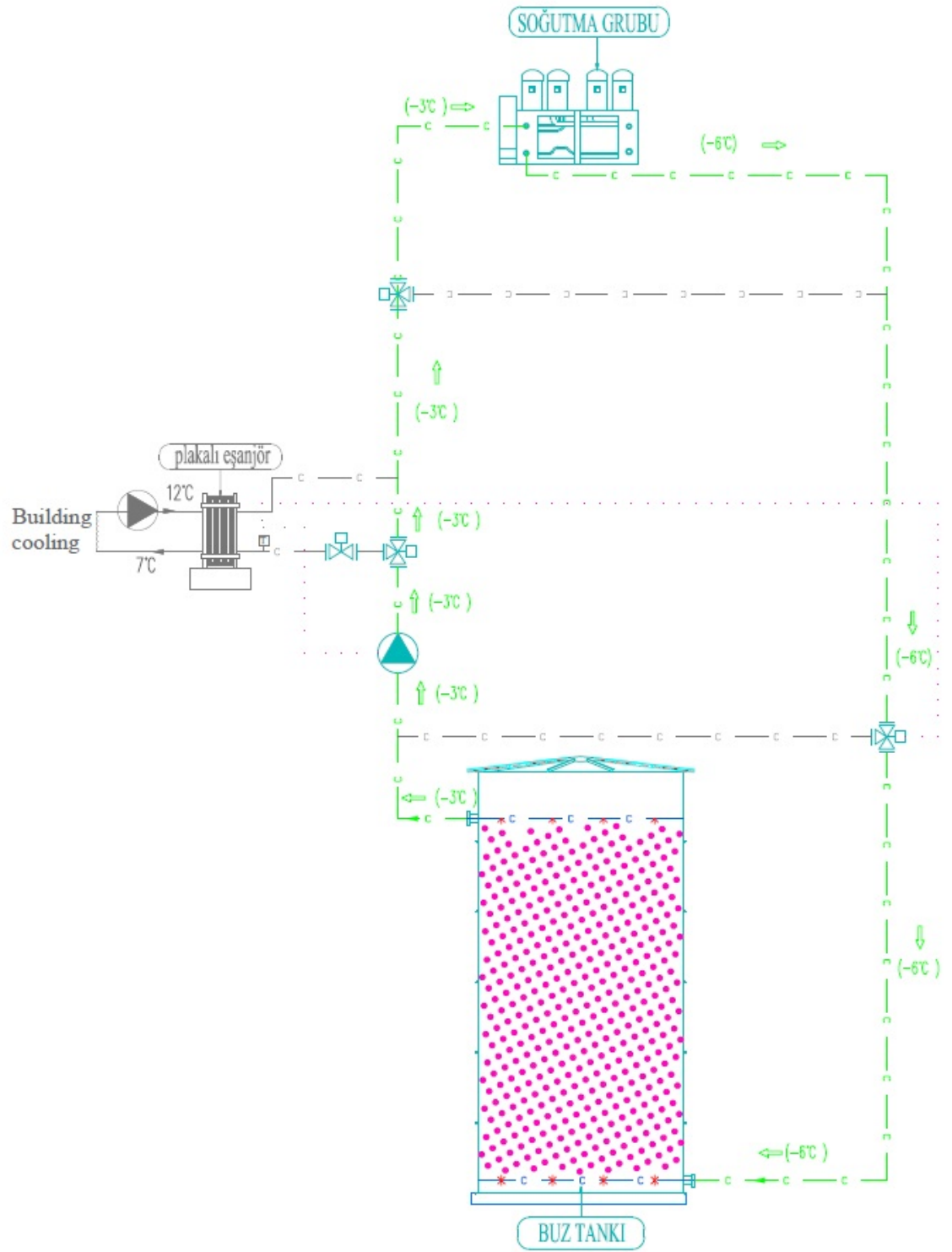
Çalışmada kullanılan BED sisteminin buz yapma (enerji yükleme, charging), buz eritme (enerji boşaltma, discharging) ve normal soğutma (bekleme, depolama, storing) periyotlarındaki tesisat şeması ve şematik görünüşü Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6'de sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 3.4 – 3.6'den görüldüğü üzere; sistem genel olarak buz tankı, soğutma grubu (çiller), plakalı ısı değiştiricisi, pompa, tesisat ve tesisat elemanlarından oluşmaktadır. BED sistemi temelde normal bir bina soğutma sistemine buz depolama tankı eklenmesi ile inşa edilmiştir. BED sisteminin bina soğutma sistemi üstüne getirdiği fazladan maliyet; ek tesisat elemanları, buz depolama tankı ve buz kapsüllerinden kaynaklanmaktadır. Bunların dışında kalan tüm elemanlar normal bir bina soğutma sisteminde de kullanılmak zorunda olan elemanlardır. Bu sebepten dolayı BED sisteminin maliyet ve geri ödeme hesabı yapılırken bu durum mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin enerji yükleme, boşaltma ve normal soğutma periyotlarında çalıştırılması sistemdeki üç yollu vanalar ile sağlanmaktadır. GİMSA kullanılan BED'in entegre edildiği soğutma sistemi üç farklı periyotta kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Buz yapma (enerji yükleme, şarj, charging)
2. Buz eritme (enerji boşaltma,deşarj, discharging)
3. Normal bina soğutma (depolama, bekleme, normal soğutma, storing)

Şekil 3.4'den görüldüğü üzere, buz yapma modunda ITA -6 ile -3°C sıcaklıkları arasında çalışmaktadır. Soğutma grubu aracılığı ile -6°C 'ye soğutulan ITA buz tankına pompalanır. Tankın alt kısmından soğuk olarak giren ısı transferi akışkanı, -3°C 'ye kadar ısınır ve soğutma grubuna gönderilir. Burada yeniden -6°C 'ye kadar soğutulur ve tanka gelir. Bu çevrim pik olmayan gece tarifesinde boyunca devam eder. ITA'nın buz yapma periyodundaki debisi $135\text{ m}^3/\text{h}$ 'dir.

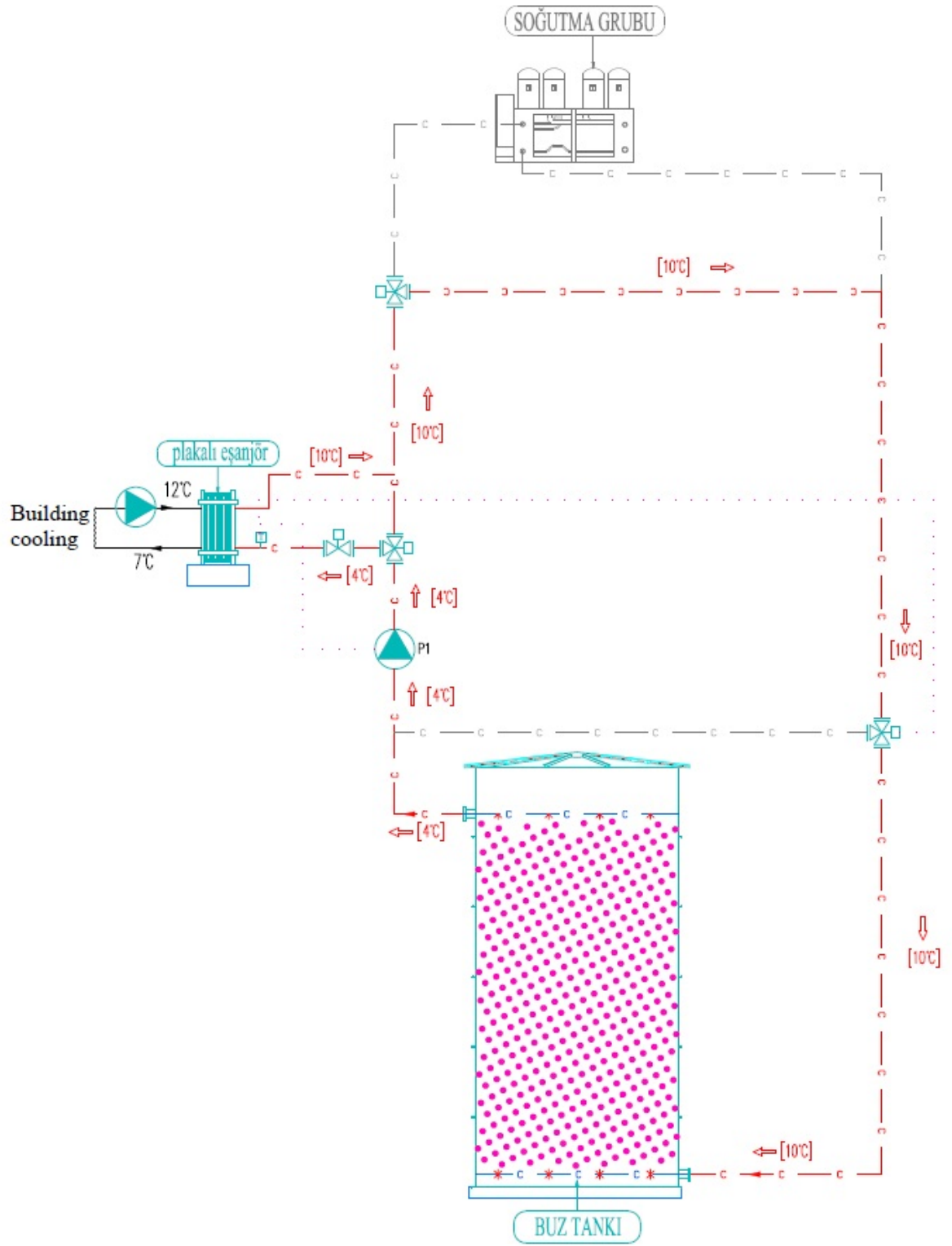
Buz eritme periyodunda (Şekil 3.5) soğutma grubu kullanılmaz ve daha önce üretilen buzlar eritilerek bina soğutması için kullanılan ısı değiştiricisine 4°C sıcakta gönderilir. Isı değiştiricisinde, bina dağıtım merkezinden gelen su soğutulur. ITA ısı değiştiricisinden 10°C sıcaklıkta çıkar ve buz depolama tankına gönderilir. Bu ısı transferi akışkanı çevrimi ile bina soğutması, depolanan buzlar sayesinde soğutma grubu kullanılmadan yapılmaktadır. Buz eritme periyodunda ısı transferi akışkanının debisi $130\text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. Bu çalışma periyodu elektriğin pahalı olduğu pik (puant) zamanlarda yapılmaktadır.

Normal soğutma periyodunda (Şekil 3.6) sistemin depolama tankı ile olan akış bağlantısı üç yollu vanalar ile kesilir. Soğutma sistemi normal bir klima sistemi gibi çalışır ve binanın soğutulmasını sağlar. Normal bina soğutmasında ITA'nın çalışma sıcaklığı, buz eritme modundaki ile aynıdır. Plakalı ısı değiştiricisine, ITA soğutma grubundan 4°C gelir. Plakalı ısı değiştiricisinde ısıtarak 10°C sıcaklıkta soğutma grubuna geri döner. Bu çalışma modunda ısı transferi akışkanının debisi $127\text{ m}^3/\text{h}$ 'dir.



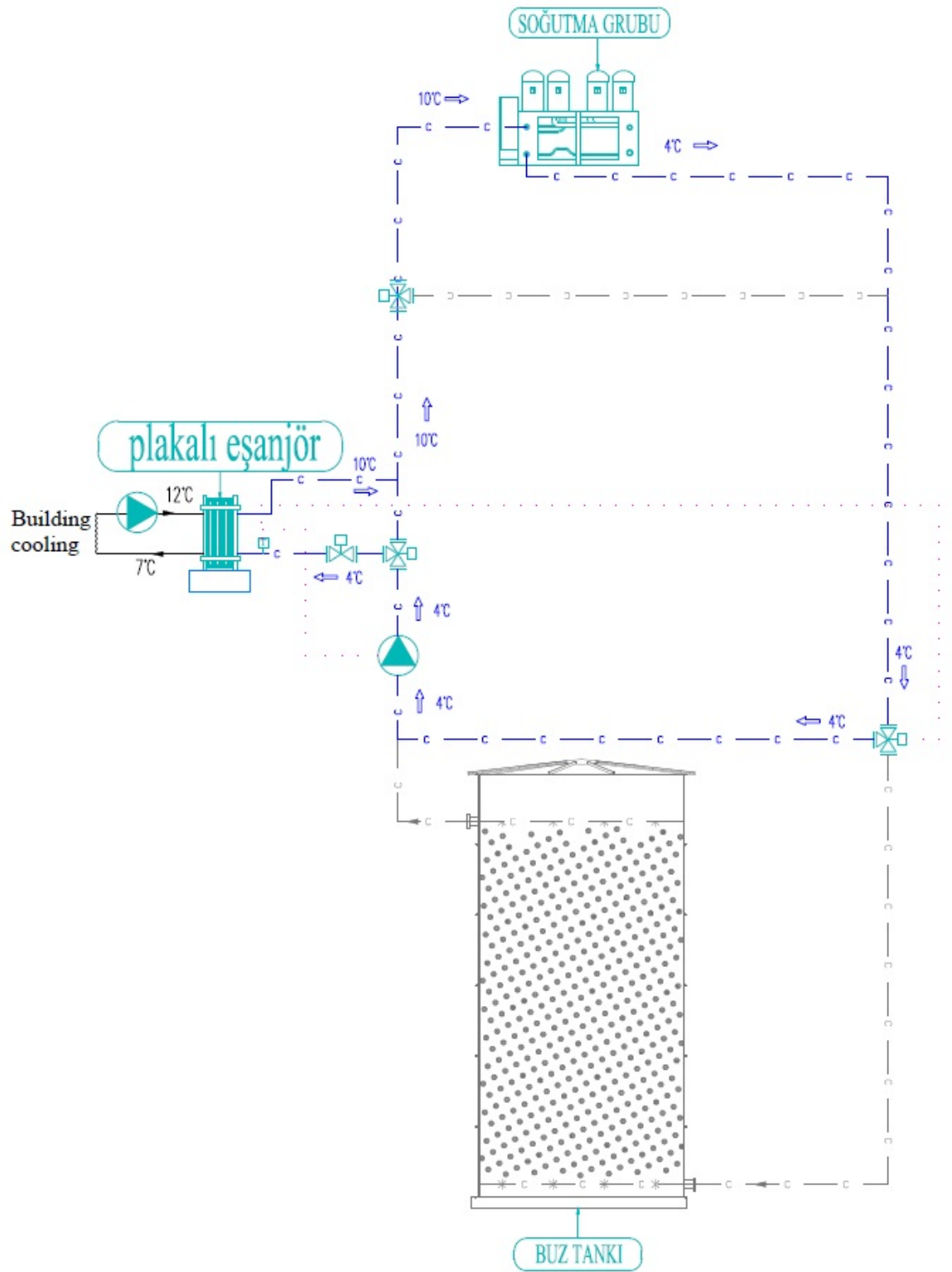
$(-6/-3^{\circ}\text{C})$:Buz Yapma

Şekil 3.4. Soğutma sisteminin buz yapma modundaki şematik gösterimi



[4/10°C] :Buz Eritme

Şekil 3.5. Soğutma sisteminin buz eritme modundaki şematik gösterimi



4/10 °C :Normal Bina Soğutma

Şekil 3.6. Soğutma sisteminin normal soğutma modundaki şematik gösterimi

4. BÖLÜM

MODELLEME VE ANALİZ

Tez çalışmasındaki modelleme ve analiz işlemleri; makro seviye çalışmalar, mikro seviye çalışmalar ve ekonomik açıdan değerlendirme çalışmaları olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Makro seviye çalışmalarda, alışveriş merkezinde bulunan BED sistemi ve önemli sistem elemanları termodinamik ve ısı geçişi açısından değerlendirilmiştir. Mikro seviyedeki çalışmalarda, kapsülün ısı geçişi ve akışkan akımı davranışı irdelenmiştir. Son olarak ekonomik çalışmalarda ise, BED sisteminin ekonomik açıdan irdeleme ve değerlendirmesi yapılmıştır. Bu bölümde; makro seviye, mikro seviye ve ekonomik değerlendirme çalışmalarında kullanılan teorik, sayısal ve deneysel modelleme ve analiz altyapısı açıklanmıştır.

4.1. Makro Seviyede Çalışmalar

Bu kısımda, sisteminin temel elemanlarını (buz tankı, soğutma ünitesi ve ısı değiştiricisi) termodinamik açıdan değerlendirmek için gerekli olan ifadeler ve denklemler tanıtılmıştır. Ayrıca BED tankı içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için kullanılan teorik model açıklanmıştır.

4.1.1. Isıl Enerji Depolama Sistemlerindeki Temel Termodinamik Kavramlar

Bu bölümde, ısı enerjisi depolama sistemleri açısından önemli olan termodinamik kavramlar açıklanmıştır. Bu kısımda verilen bilgilerde, İbrahim Dinçer ve Marc A. Rosen'nin yazmış olduğu Thermal Energy Storage System and Application [6] kitabından yararlanılmıştır.

Enerji ve Ekserji: Bir ısı enerjisi depolama sistemini değerlendirmek için enerji ve ekserji önemli parametrelerdir. Enerji ve ekserji analizleri kendi içlerinde

kıyaslandığı zaman, ekserji analizleri enerji analizlerine göre daha rasyonel bilgiler vermektedir. Bu yüzden, enerji ve ekserji analizlerini aynı anda gerçekleştirmek sistem açısından daha değerli bilgiler vermektedir.

Sıcaklık: Ekserji, ısı geçişinin sıcaklığını ve düşen sıcaklık kanalıyla gerçekleşen ısı geçişinin kalitesini hakkında bilgiler verir. Isının depolandığı maddenin sıcaklığının ortam sıcaklığına göre farkı oldukça önemlidir. Bu farkın etkisi ekserji analizi ile ortaya konmaktadır.

Verimlilik: Enerji ve ekserji verimleri bir sistemin performansını belirlemek için oldukça önemlidir. Ayrıca sistem performansını arttırmak için sistem üzerinde hangi eleman ya da proses üzerinde iyileştirme yapılacağının belirlenmesinde, enerji ve ekserji analizlerinin kullanılması elverişli bir yöntemdir.

Kayıplar: Enerji analizi ile sistem sınırından olan tüm kayıplar kolaylıkla belirlenebilir. Ekserji analizinde kayıplar ikiye ayrılır; bunlardan ilki sistemden serbest kalan ekserji ve ikincisi ise iç ekserji yıkımıdır. İç ekserji yıkımı termodinamiğin ikinci kanunu ile alakalı olup entropi ve ekserji ifadeleri ile açıklanmaktadır.

Termodinamik analizler gerçekleştirilirken aşağıdaki dengeler kullanılır:

1. Kütle dengesi
2. Enerji dengesi
3. Entropi dengesi
4. Ekserji dengesi

Bu dengelerin kapalı ya da açık bir sisteme uygulanması ile sistemin termodinamik analizi yapılmış olur. Termodinamik analizlerle, sistemlerin sistem sınırlarından olan kayıpları ve içinde gerçekleşen tersinmezlikler belirlenir. Bir sistem için enerji ve ekserji analizleri yapılarak sistemin performansı hem TD1K hem de TD2K açısından belirlenmiş edilmiş olur.

Bir sistem için genel termodinamik denge ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Giris + Uretim - Cikis - Yok olan = Degisim \quad (4.1)$$

Burada; giriş ve çıkış sistem sınırlarından giren ve çıkan ısı ve işi temsil ederken, üretim ve yok olan ise sistem içerisinde meydana gelen üretilen ve yok olan (yıkılan) nicelikleri temsil etmektedir. Denklem 4.1 yukarıda sıralanan kütle, enerji, entropi ve ekserji için ayrı ayrı yazılarak bir sistemin termodinamik analizi gerçekleştirilir.

Termodinamik analizler sırasında, sistemin karmaşıklığını azaltmak ve hesaplamaları kolaylaştırmak için bazı kabuller yapılır. Bu kabuller hesaplamalarda bir miktar hataya neden olmaktadır. Ancak parametrik analizler sırasında, hesaplamalar aynı sistem için farklı çalışma şartlarında ya da farklı tasarım kriterlerinde yapılmaktadır. Kabuller tüm hesaplamalarda kullanılacağından, hangi çalışma şartının ya da tasarım parametresinin daha iyi performans göstereceği bağli olarak değişmez. Bu yüzden yapılan kabuller hatalara neden olsa da, sistemi farklı tasarım ve çalışma şartlarında değerlendirmek için bağli olarak doğruya yakın sonuçlar vermektedir. Bu tez çalışması kapsamında, termodinamik analizler kapsamında aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Akışkanların tamamı sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir.
2. Faz değişimi sırasında FDM'nin sıcaklığı sabit kalmaktadır.
3. BED tankı dışındaki sistem elemanlarındaki ve tesisatlardaki ısı kaybı ve kazançlar ihmal edilmiştir.
4. ITA'nın fiziksel özellikleri sıcaklığa bağli olarak alınmıştır.
5. Suyun ve buzun fiziksel özelliklerinin sıcaklık ile değişmediği kabul edilmiştir.
6. Kapsüllerin tamamının su ile dolu olduğu ve faz değişimi sırasındaki hacmin değişmediği kabul edilmiştir.
7. Deneysel çalışmalarda ortam sıcaklığı ölçülen gerçek değer olarak alınırken, teorik hesaplamalarda ortam sıcaklığı 24 °C olarak alınmıştır.
8. ITA'yı basınçlandırmak için kullanılan pompaların tam kapasite çalıştığı kabul edilmiştir.

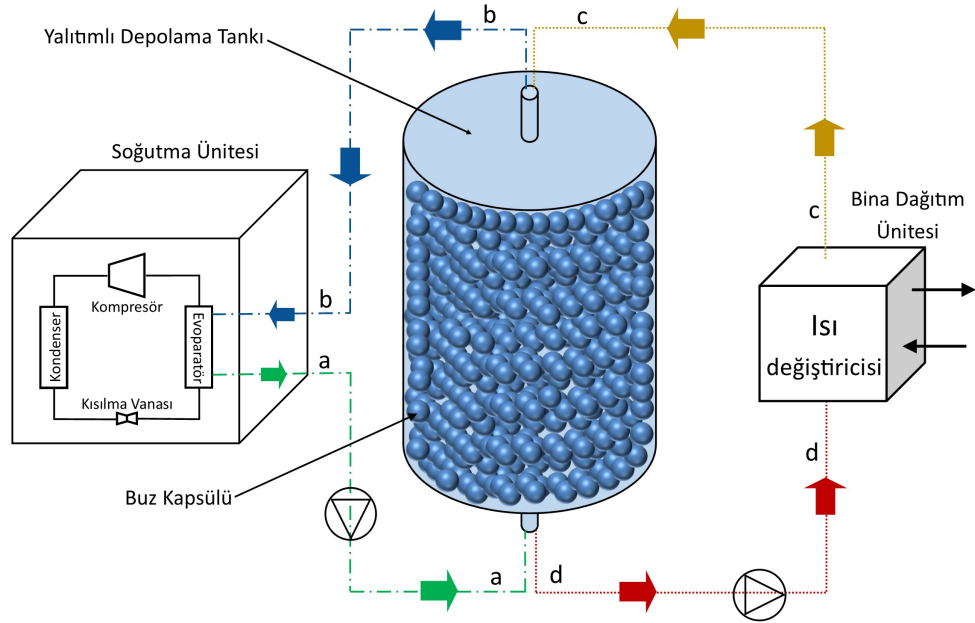
4.1.2. Makro Seviyede Termodinamik Analizler

Makro seviyedeki termodinamik analizler termodinamiğin birinci (TD1K) ve ikinci kanunu (TD2K) ışığında gerçekleştirilmiştir. Çünkü yalnızca TD1K'nun kullanılması durumunda, sadece sistemin sınırlarından geçen ısı ve iş etkileşimleri dikkate alınmaktadır. Sistem içerisindeki tersinmezlikleri dikkate almak için TD2K'nundan yararlanmak gerekmektedir. TD1K ve TD2K analizleri uygulamalarda genellikle *enerji ve ekserji analizleri* olarak adlandırılır. Bu bölümde, GİMSA'da kullanılan BED sistemini termodinamik açıdan değerlendirmek gerekli olan ifadeler ve bağıntılar verilmiştir. BED sistemi ve sistem elemanları için enerji ve ekserji verimi ifadeleri gösterilecektir.

4.1.2.1. Buz Depolama Tankının Termodinamik Analizi

Buz kapsüllerinin tutulduğu yalıtımlı depolama tankı, bir BED sistemi için en önemli sistem elemanıdır. Bu yüzden, kapsüllü BED sistemleri ile alakalı yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu depolama tankları ve buz kapsülleri ile alakalıdır. Bu çalışmalardan görüldüğü üzere, BED tankı sistem performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Enerji analizi ile BED tankına giren ve çıkan ısı ve işler belirlenip enerji dengesi yazılırken; ekserji analizi ile sistem içerisindeki tersinmezlikler ekserji yıkımı değeri ile belirlenir.

Depolama tankının şematik görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'den görüldüğü üzere *a* hattı (yeşil) tankın enerji yükleme durumunda girişini, *b* hattı (mavi) tankın enerji yükleme durumunda çıkışını temsil etmektedir. Tankın enerji yükleme durumundaki ITA debisi $130.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. *c* hattı (sarı) tankın enerji boşaltma durumundaki girişini temsil ederken, *d* hattı (kırmızı) tankın enerji boşaltma durumundaki çıkışını temsil etmektedir. Tankın enerji boşaltma durumunda ITA debisi ise $127.37 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. Önceki bölümlerde açıklandığı ve şekillerde gösterildiği üzere sistemde ITA'yı hareketlendirmek için bir adet pompa kullanılmaktadır. Enerji yükleme ve boşaltma periyotlarına göre ITA'nın yönlendirilmesi üç yollu vanalar ile sağlanmaktadır. Şekil 4.1'de iki adet pompa görüntüsü şeklindeki görüntü karmaşıklığını engellemek için kullanılmıştır. Pompanın gücü ise $\dot{W}_{pompa} = 20 \text{ kW}$ 'dır.



Şekil 4.1. BED tankının ve BED sisteminin şematik olarak gösterimi

Şekil 4.1’de görülen her bir hat (a , b , c , d) için enerji ve ekserji miktarları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$e(T_i) = c (T_i - T_o) \quad (4.2)$$

$$ex(T_i) = c \left[(T_i - T_o) - T_o \ln\left(\frac{T_i}{T_o}\right) \right] \quad (4.3)$$

burada c ısı transferi akışkanın özgül ısısını, T sıcaklığı, T_o ise depolama tankını çevreleyen ortam sıcaklığını temsil etmektedir. i alt indisi ise sistemdeki herhangi bir hattı (a , b , c , d) temsil etmektedir.

4.1.2.2. Kütle Dengesi

Kütlenin korunumu doğanın en temel ilkelerinden biridir. Kütlenin; yoktan var edilemeyeceğini veya var olanın ise yok edilemeyeceğini açıklar. Açık bir sistem (kontrol hacmi, KH) için kütlenin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
& (KH'ne giren toplam kutle) - (KH'den cikan toplam kutle) \\
& = (KH icindeki toplam degisim)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\frac{dm_{KH}}{dt} = \sum \dot{m}_{giris} - \sum \dot{m}_{cikis} \tag{4.5}$$

Burada m ve $\dot{m}$ sırasıyla, kütle ve kütleli debiyi ifade etmektedir. Sürekli akışlı sistemlerde kontrol hacmi içerisinde kütle değişimi olmadığından $\sum \dot{m}_{giris} = \sum \dot{m}_{cikis}$ olur.

4.1.2.3. Enerji Dengesi

Bir sistemin enerji analizi sistemi tanımak açısından oldukça önemlidir. Enerji analizi ile birlikte sisteme giren ve çıkan enerjiler, ısılar ve işler belirlenir. Yani sistemin sistem sınırlarından geçen ısı, enerji ve iş etkileşimleri tespit edilir ve TD1K uygulanarak o sistem için enerji dengesi yazılır. BED tankı için enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Giren\ enerji - (Cikan\ enerji + Isi\ Kazanci) = Sistemdeki\ Degisim \tag{4.6}$$

Bu ifade, BED için şekil 4.1 dikkate alınarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$(\dot{E}_a - \dot{E}_b) - [(\dot{E}_c - \dot{E}_d) + \dot{Q}_{kayip}] = \Delta \dot{E} \tag{4.7}$$

Burada $(\dot{E}_a - \dot{E}_b)$ soğuk enerji girdisini, $(\dot{E}_c - \dot{E}_d)$ geri kullanılan soğuk enerjiyi, $\dot{Q}_{kayip}$ BED tankının ortamdan aldığı ısı miktarını ve $\Delta \dot{E}$ ise sistemdeki değişimini temsil etmektedir. Denklem 4.7'deki köşeli parantez içinde kalan kısım toplam soğuk enerji çıktısı olarak adlandırılmaktadır. Sistem çevrim halinde çalıştığı için $\Delta \dot{E} = 0$ olur.

BED tankının enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme durumundaki enerji verimliliği ifadeleri ile aşağıda sırası ile verilmiştir.

$$\eta_{yukleme} = \frac{(\dot{E}_a - \dot{E}_b) - \dot{Q}_{kayip}}{(\dot{E}_a - \dot{E}_b)} \quad (4.8)$$

$$\eta_{bosalma} = \frac{(\dot{E}_d - \dot{E}_c) - \dot{Q}_{kayip}}{(\dot{E}_d - \dot{E}_c)} \quad (4.9)$$

$$\eta_{bekleme} = 1 - \left(\frac{\dot{Q}_{kayip}}{(\dot{E}_a - \dot{E}_b) - \dot{Q}_{kayip}} \right) \quad (4.10)$$

Ayrıca katılaşma ve erime sırasında, kapsül içindeki su-buz karışımının enerjisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$E = m[(1 - F) (u_k - u_o) + F (u_s - u_o)] \quad (4.11)$$

Burada u_k , u_s ve u_o sırasıyla suyun katı, sıvı ve ortam şartlarındaki iç enerjilerini temsil etmektedir. F (melted fraction) ise sıvı kısmın, katı kısma oranını temsil etmektedir. m ise kapsül içindeki depolama maddesinin toplam kütlesidir.

Çevre sıcaklığının tank içerisinden sıcak olmasından dolayı, ortamdan tanka doğru ısı geçişi olur. Yani tank ortamdan ısı kazanır. Isı kazancı ya da soğu kaybı $\dot{Q}_{kayip}$ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{Q}_{kayip} = \frac{\Delta T A}{R_T} \quad (4.12)$$

Burada ΔT ortam ile tankın iç kısmı arasındaki sıcaklık farkını, A tankın toplam yüzey alanını ve R_T ise tankın iç kısmı ile ortam arasındaki ortalama ısı direnci göstermektedir. Buradaki R_T ifadesinin hesaplanması Bölüm 4.1.3'de açıklanmıştır.

4.1.2.4. Entropi Dengesi

Bir önceki bölümde, enerji ve enerjinin korunumu konuları hakkında bilgiler ve bağıntılar verilmişti. Bu bölümde incelenecek olan entropi ise sistem ile ilgili bir özellik olup, enerjinin aksine korunmamaktadır. Yani entropinin korunumu ilkesi diye bir kavram bulunmamaktadır. Bu korunmama durumu Clausius eşitsizliği ile açıklanmaktadır. Clausius eşitsizliği, $\delta Q/R$ ifadesinin termodinamik bir çevrim üzerindeki integralinin sıfıra eşit veya sıfırdan küçük olduğu söyler. Clausius

eşitsizliğindeki eşit olma durumu tümünden veya içten tersinir çevrimler için; eşitsizlik durumunda tersinmez çevrimler için geçerlidir. Yani entropi sistemin içindeki tersinmezliklerin bir ölçüsüdür. Tersinmez bir hal değişimi sırasında bir miktar entropi üretilir. Bu entropi üretimi tamamen tersinmezlikler ile alakalıdır. Bir hal değişimi sırasında üretilen entropi, *entropi üretimi* olarak adlandırılır ve sistemin içindeki tersinmezlikleri temsil eder.

Entropi özeliği, bir sistemin moleküler bozukluğunun ya da rastgeleliğinin bir ölçüsüdür ve TD2K entropinin sistem içerisinde üretildiğini ancak yok edilemediğini ifade eder. Bu nedenle, bir sistemde hal değişimi sırasında meydana gelen entropi değişimi, hal değişimi sırasında sistem içinde oluşan entropiye eşit büyüklükte entropi geçişinden daha büyük olup, herhangi bir sistem için entropideki artış ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} & (Giren toplam entropi) - (Cikan toplam entropi) \\ & + (Uretilen toplam entropi) = (Sistemdeki toplam entropi degisimi) \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\sum \dot{S}_{giren} - \sum \dot{S}_{cikan} + \dot{S}_{uretilen} = \Delta \dot{S}_{sistem} \quad (4.14)$$

Burada $\dot{S}$ ifadesi entropiyi temsil etmektedir. Sistem çevrim halinde çalıştığı için $\Delta \dot{S}_{sistem} = 0$ olur. Yukarıda verilen eşitlik entropi dengesi olarak adlandırılır. Ayrıca entropi üretimi ekserji yıkımı ile orantılıdır. Bu oran aşağıdaki gibi gösterilir.

$$I = T_o \dot{S}_{uretilen} \quad (4.15)$$

Burada I ifadesi ekserji yıkımını (kaybolan ekserji) temsil ederken, T_o ise ortam sıcaklığıdır. Bu ifadeden görüldüğü üzere; entropi üretimi, ekserji yıkımı ile orantılıdır. Hem ekserji yok oluşu hem de entropi üretimi sistem içerisindeki tersinmezlikleri temsil eder. Ayrıca bu ifadeden görüldüğü üzere çevre (referans) sıcaklığı sistemin ekserjisi üzerindeki önemli etkiye sahiptir.

4.1.2.5. Ekserji Dengesi

TD1K enerjinin yoktan var edilemeyeceğini, var olan enerjinin ise yok edilemeyeceğini ifade eder. Yani enerji bir türden başka bir türe dönüşebilir, ancak yok olamaz ya da artamaz. Süreç esnasında sistem sınırından sisteme ısı veya iş olarak transfer edilen enerji, ya sistemden ısı veya iş olarak çıkar ya da iç enerji olarak depolanır. Enerji, süreç esnasında tüketilemez veya üretilmez. Sadece enerjinin bir türünden başka bir türe dönüşür. Bu dönüşümün üst sınırları ise TD2K ile belirlenmiştir. Isıl sistemlerde bir süreç esnasında tüketilenin, enerjinin iş yapabilme potansiyeli olduğu ve bu süreç esnasında da iş yapabilme potansiyelinin azaldığı ya da kaybolduğu termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarının ortak açıklamasıdır. Enerjinin iş yapma bilme potansiyeli, kabiliyeti, yeteneği *ekserji* olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, bir sistemin ya da sürecin sahip olduğu kullanılabilir enerji miktarı *ekserji* olarak tanımlanır. Ekserji aynı zamanda "kullanılabilirlik" olarak da tanımlanmaktadır. Bir sistemin ekserji analizinin yapılması ile sistemdeki tersinmezlikler ve bu tersinmezliklerin miktarları belirlenir. Bir sistem ya da süreç içerisindeki tersinmezliklerin belirlenmesi ile sistemin ya da sürecin en iyi şekilde çalışması için gerekli olan tüm önlemler alınabilir. Sistem sınırlarından olan etkileşimin yanında sistemin içerisindeki kayıpları da hesaba kattığı için bir sistemin ekserji analizi enerji analizine göre daha fazla önem arz eden bilgiler verebilir. Bu yüzden, ısıl bir sistem için ekserji dengesinin yazılması ve ekserji veriminin belirlenmesi önemlidir.

Buz depolama tankı için ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} & (Ekserji \text{ girisi}) - (Ekserji \text{ cikisi} + Isi \text{ Kazanci Ekserjisi}) \\ & - (Ekserji \text{ yok olusu}) = (Sistemim Ekserjisindeki Degisim) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Bu ifade, Şekil 4.1 dikkate alınarak, BED tankı için aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$(\dot{E}x_a - \dot{E}x_b) - [(\dot{E}x_d - \dot{E}x_c) - \dot{E}x_{\dot{Q}_{kayip}}] - I = \Delta \dot{E}x_{sistem} \quad (4.17)$$

Burada $(\dot{E}x_a - \dot{E}x_b)$ ifadesi soğuk ekserji girişini, $(\dot{E}x_d - \dot{E}x_c)$ geri kullanılan soğuk ekserji çıkışı, $\dot{E}x_{\dot{Q}_{kayip}}$ ısı kazancından dolayı kaybolan ekserjiyi, I ekserji yıkımını (yok oluşunu) ve $\Delta \dot{E}x_{sistem}$ ise sistemki ekserji değişimini göstermektedir. Sistem

çevrim olarak çalıştığı için $\Delta \dot{E}x_{sistem} = 0$ 'dır. Denklem 4.17'de köşeli parantezler arasındaki kalan kısım ise toplam ekserji çıkışı olarak ifade edilmektedir.

Buz kapsülleri içerisinde, donma ve erime esnasında, su-buz karışımı için ekserji ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$Ex = m \left[(1 - F)[(u_k - u_o) - T_o(s_k - s_o)] + F[(u_s - u_o) - T_o(s_s - s_o)] \right] \quad (4.18)$$

Burada u ve s ifadeleri sırası ile iç enerji ve entropiyi; s , k ve o ifadeleri ise sırası ile sıvı, katı ve ortamı (çevreyi) temsil etmektedir. F ise sıvı hacminin katı hacmine oranını göstermektedir. m ise FDM'nin kütlesidir.

Ortamdan tanka olan ısı geçişinden dolayı meydana gelen ekserji kaybı ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\dot{E}x_{Q_{kayıp}} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \quad (4.19)$$

BED tankı için ekserji verimleri enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme periyotlarındaki ekserji verimleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\psi_{yukleme} = \frac{(\dot{E}x_a - \dot{E}x_b) - (\dot{E}x_{Q_{kayıp}} - I)}{(\dot{E}x_a - \dot{E}x_b)} \quad (4.20)$$

$$\psi_{bosaltma} = \frac{(\dot{E}x_d - \dot{E}x_c)}{(\dot{E}x_d - \dot{E}x_c) - (\dot{E}x_{Q_{kayıp}} - I)} \quad (4.21)$$

$$\psi_{bekleme} = 1 - \frac{(\dot{E}x_{Q_{kayıp}} - I)}{(\dot{E}x_a - \dot{E}x_b) - (\dot{E}x_{Q_{kayıp}} - I)} \quad (4.22)$$

4.1.3. Buz Depolama Tankının Isı Kazancının Hesaplanması

BED tankının termodinamik analizleri yapılırken; ortamdan tanka geçen ısı geçişi (ısı kazancı) miktarının belirlenmesi gerekir. Isı kazancını tespit etmek için, tankın iç kısmı ile dış ortam arasındaki ısı direncin belirlenmesi gerekmektedir. BED tankı için ısı direnci aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$R_T = \frac{1}{h_{ic}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_{cidar}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_{yalitim}} + \frac{1}{h_{dis}} \quad (4.23)$$

Burada h_{ic} ve h_{dis} BED tankının iç ve dış kısımdaki ısı taşınım katsayılarını temsil etmektedir. r_1, r_2, r_3 tankın iç tarafından dış kısmına doğru yarı çapları, k ise ısı iletim katsayısını temsil etmektedir. Denklem 4.23'i çözebilmek için h_{ic} ve h_{dis} 'ın hesaplanması gerekmektedir. Bu ifadeler, ısı taşınım hesaplama yöntemleri ile bulunabilir. Isı taşınım katsayısı aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$h = \frac{Nu \ k}{D_{tank}} \quad (4.24)$$

Burada Nu Nusselt sayısını, k ITA'nın ısı iletim katsayısını, D_{tank} ise tankın çapını temsil etmektedir. Nu sayısı tankın iç ve dış kısmı için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Tankın iç kısmında zorlanmış taşınım, dış kısmında ise doğal taşınım durumu söz konusudur. Tankın iç kısmı için Nu sayısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [63].

$$Nu_{ic} = \frac{h_{ic} \ D_{tank}}{k} = 0.023 \ Re^{0.8} \ Pr^{0.4} \quad (4.25)$$

Tankın içindeki Reynolds sayısı;

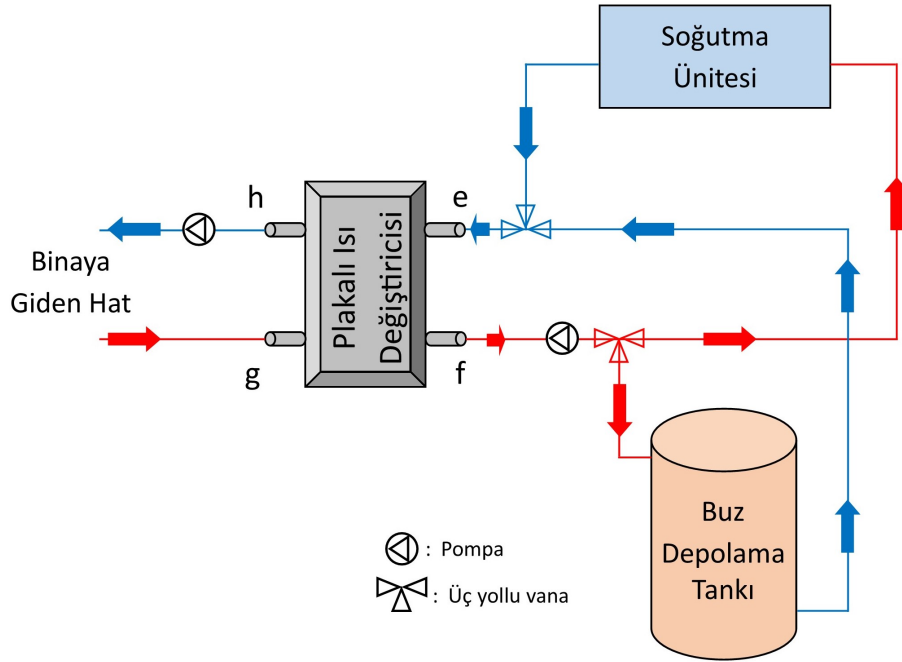
$$Re = \frac{V \ D_{tank}}{\nu} \quad (4.26)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada V ısı transferi akışkanının hızını, ν ise ısı transferi akışkanının viskozitesini göstermektedir.

BED tankı, durgun hava ortamı içerisinde tutulmaktadır. Bu yüzden tankın dış kısmı için doğal taşınım ile ısı geçişi söz konusudur. Tankın dış kısmı için Nu_{dis} sayısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir [63].

$$Nu_{dis} = \frac{h_{dis} \ D_{tank}}{k} = 0.59 \ (Ra \ Pr)^{0.25} \quad (4.27)$$

Denklem 4.25 ve 4.27'den h_{ic} ve h_{dis} değerleri hesaplanarak Denklem 4.23'de yerine yazılır. Böylece tankın iç tarafı ile dış kısmı arasındaki ısı direnç değeri belirlenmiş olur.



Şekil 4.2. Plakalı ısı değiştiricisinin ve bağlantılarının şematik olarak gösterimi

4.1.4. Isı Değiştiricisinin Termodinamik Analizi

BED tankından ya da soğutma grubundan gelen soğutulmuş ITA, bir plakalı ısı değiştirici vasıtasıyla bina soğutma birimlerine giden suyu soğutmaktadır. Şekil 3.5 ve 3.6’de bu durumlar şematik olarak gösterilmiştir. BED tankından ya da soğutma ünitesinden alınan soğuk ITA 4°C sıcaklıkta bina soğutma dağıtım birimlerine giden plakalı ısı değiştiricisine girer (e hattı). Burada binadan gelen 12°C sıcaklığındaki suyu (h hattı), 7°C sıcaklığa kadar soğutulur ve binaya geri gönderilir (g hattı). ITA ısı değiştiricisinde 10°C sıcaklığa kadar ısınarak ya buz depolama tankına ya da soğutma ünitesine geri döner (f hattı). Sistemin şematik olarak gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’den de görüldüğü üzere, sistemdeki ITA’nın yön kontrolü üç yönlü vanalar ile sağlanmaktadır.

Şekil 4.2’den görüldüğü gibi, soğutma ünitesinden ya da BED tankından gelen soğunun binaya soğutma birimlerine aktarılması için bir adet plakalı ısı eşanjörü kullanılmıştır. Bu eşanjörün giriş ve çıkışları için enerji ve ekserji miktarları Denklem 4.2 ve 4.3’den hesaplanabilir. Her bir hattın enerji ve ekserji değerleri bilindiğine göre, bina dağıtım merkezinin enerji ve ekserji verimleri sırası ile aşağıdaki ifadeler yardımı ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{e - f \text{ hattı enerji değişimi}}{g - h \text{ hattı enerji değişimi}} = \frac{\dot{E}_e - \dot{E}_f}{\dot{E}_g - \dot{E}_h} \quad (4.28)$$

$$\psi = \frac{e - f \text{ hattı enerji değişimi}}{g - h \text{ hattı enerji değişimi}} = \frac{\dot{E}x_e - \dot{E}x_f}{\dot{E}x_g - \dot{E}x_h} \quad (4.29)$$

4.1.5. Soğutma Ünitesinin Termodinamik Analizi

Binanın soğutma sisteminde, 2 adet *BLUEBOX TETRIS W/LC* 54.4 marka ve model soğutma ünitesi kullanılmıştır. Soğutma grubu kapalı ve endüstriyel bir sistem olduğundan, sistem üzerinden her hangi bir sıcaklık ya da basınç ölçümü alınamamıştır. Ancak BlueBox firması ile iletişime geçip mümkün olarak teknik veriler kendilerinden alınmıştır. Elde edilen veriler ışığında soğutma sistemi için mümkün olan termodinamik analizler yapılmıştır.

BlueBox firmasından, soğutma ünitesinin -6°C ve -3°C sıcaklıklarında çalışması durumunda aşağıda sıralanan teknik veriler alınmıştır [64].

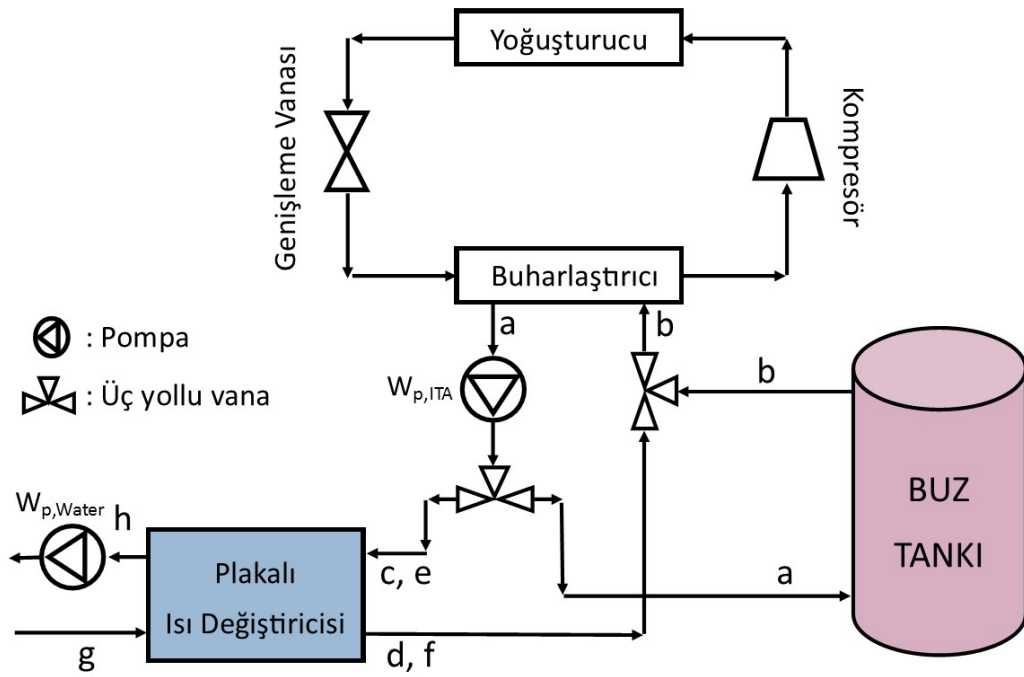
- o Sistemin soğutma kapasitesi 320.14 kW 'dır.
- o Sistemde kullanılan kompresörün güç ihtiyacı 101.86 kW 'dır.
- o Buharlaştırıcı giriş ve çıkış sıcaklıkları -6°C ve -3°C 'dir.
- o Yoğuşma sıcaklığı 39°C 'dir.
- o Sistemin COP değeri 3.14'dür.

Soğutma ünitesinin 10°C ve 4°C sıcaklıklarında çalışması durumunda alınan teknik veriler ise [64];

- o Sistemin soğutma kapasitesi 415.26 kW 'dır.
- o Sistemde kullanılan kompresörün güç ihtiyacı 125.74 kW 'dır.
- o Buharlaştırıcı giriş ve çıkış sıcaklıkları 10°C ve 4°C 'dir.
- o Yoğuşma sıcaklığı 48°C 'dir.

- o Sistemin COP değeri 3.30'dur.

Yukarıda verilen bilgilerden, soğutma ünitesinin kendi içerisindeki COP değerleri hesaplanabilir. Ancak soğutma sistemi ile BED tankı ve ısı değiştiricisi arasındaki ITA'nın ve ısı değiştiricisinden binaya giden suyun hareketlendirilmesi için iki adet pompa kullanılmaktadır (Şekil 4.3). Sistemin geneli için COP hesabı yapılırken sisteme yapılan tüm işler dikkate alınmalıdır. Soğutma sisteminin şematik olarak gösterimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekilde görülen pompalardan ITA'nı hareketlendirmek için kullanılan gücü $\dot{W}_{p,ITA} = 20kW$, bina tarafında kullanılan suyu hareketlendirmek için kullanılan gücü ise $\dot{W}_{p,Water} = 15kW$ 'dir.



Şekil 4.3. Alışveriş merkezinde kullanılan soğutma ünitesinin ve soğutma sisteminin şematik olarak gösterimi

Bir soğutma sisteminin COP değeri genel olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [65].

$$COP = \frac{\text{Elde edilmek istenen yuk}}{\text{Harcanması gereken is}} \quad (4.30)$$

Alışveriş merkezinde kullanılan soğutma sistemi (Şekil 4.3) için bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$COP = \frac{\dot{E}_g - \dot{E}_h}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{p,ITA} + \dot{W}_{p,Water}} \quad (4.31)$$

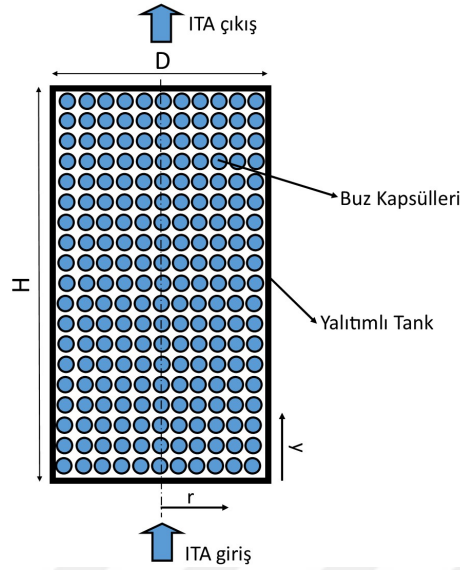
Daha önce de açıklandığı üzere, soğutma sistemi üzerinde soğutma çevrimine dair her hangi bir ölçüm alınamadığından, soğutma sisteminin enerji ve ekserji verim değerleri hesaplanması mümkün olmamıştır. Ayrıca soğutma sisteminin tasarımında pik yüklerinde olmadığı zamanlarda enerji tasarrufu sağlaması açısından aynı model ve kapasitede iki adet soğutma ünitesi kullanılmıştır.

4.1.6. Makro Seviyede BED Tankı İçerindeki Isı Geçişi Analizi

BED sistemlerindeki depolama tankı içerisindeki sıcaklık dağılımı, tankın ısııl modellemesi ve performansı açısından önem arz etmektedir [22, 66]. Çünkü tank içerisindeki sıcaklık dağılımının iyi bir şekilde anlaşılması, sistemin performansını ve yapılabilecek olan iyileştirme faaliyetlerini belirlemek için gereklidir. Böylece sistemin tasarımında ve işletilmesinde, sistem performansını olumsuz yönde etkileyebilecek parametreler elemine edilebilir. Gizli ısııl enerji depolama sistemlerinin ısııl modellemesi, duyulur ısııl enerji depolama sistemlerinin ısııl modellemesine göre daha karmaşıktır. Bu karmaşıklık katı-sıvı ara yüzeyindeki lineer olmayan hareket davranışlarından, erime sırasındaki kaldırma kuvvetlerinin etkilerinden ve kapsüllerle ITA arasındaki birleşik ısı geçişinden kaynaklanmaktadır. Bu durum tank içerisindeki sıcaklık dağılımını belirlemek oldukça zorlaştırmaktadır.

Bu bölümde, tank içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için bir teorik model oluşturulmuştur. Çünkü tez çalışması kapsamında incelenen BED sistemi tez çalışmasından önce kurulduğu için tank içerisinden, sıcaklık dağılımını belirlemek için ölçüm almak mümkün olmamıştır. Bu sebepten dolayı tankın içerisindeki sıcaklık dağılımı teorik olarak belirlenmiştir.

Yapılan literatürde taramasında kapsüllü BED sistemlerinde tankın ısııl modellemesi için gözenekli (poroz) ortam benzetimi yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Kapsüllü BED sisteminin gözenekli ortam gibi modellenmesinde, içerisinde FDM'lerin olduğu kapsüllerin sürekli bir ortam gibi davrandığı kabul edilir. Yani kapsüller birbirinden bağımsız olarak durmamaktadır. Gözenekli ortam olarak modellemesi, ısııl modelleme için çözülmesi gereken enerji denklemini



Şekil 4.4. Buz kapsüllerinin tutulduğu yalıtımlı BED tankının şematik olarak gösterimi

oldukça basitleştirir. Böylece sistemin analizi, daha kolay ve daha bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Gözenekli ortam modellemesi için aşağıda sıralanan kabuller yapılmıştır.

1. Kaldırma kuvveti etkileri ihmal edilmiştir.
2. Viskoz yayınım etkileri ihmal edilmektedir.
3. ITA sıkıştırılamaz bir akışkandır.
4. ITA'nın termofiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız olarak alınmıştır.
5. Akışın y yönünde tam gelişmiş olduğu kabul edilmiştir.
6. Su ve buz faz değişimi sırasında sıcaklık sabit kalmaktadır.

Yukarıda açıklanan kabuller dikkate alınarak, çalışmada kullanılan tankın şematik görünümü Şekil 4.4'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere tank D çapında ve H yüksekliğindedir. Şekil 4.4 ve açıklanan kabuller dikkate alınarak, buz depolama tankı içerisinde akan ITA için enerji denklemi sürekli ortam şartlarında silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\epsilon \rho C_p u_{\infty} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(k r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H A_{yatak} (T_{FDM} - T) \quad (4.32)$$

Bu denklem gözenekli ortamlar için silindirik koordinatlarda 2 boyutlu, sürekli şartlar altındaki enerji denklemidir. Bu denklemde ϵ tank içerisindeki gözenekliliği, ρ ITA'nın yoğunluğu, C_p ITA'nın özgül ısısını, u_∞ ITA'nın akış hızını, H kapsüller ile ITA arasındaki ortalama ısı geçiş katsayısını, A_{yatak} tank içerisindeki kapsüllerin toplam yüzey alanını ve T_{FDM} ise faz değişim sıcaklığını temsil etmektedir. Denklem 4.32'yi çözerken radyal yöndeki sıcaklık değişimi lineer ve parabolik olarak kabul edilebilir [22]. Böylece integral yöntemi kullanılarak Denklem 4.32 kolaylıkla çözülebilir. Bu denklemin çözümü için aşağıdaki sınır şartları kullanılmıştır.

$$T(x, 0) = T_c \quad (4.33)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4.34)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=D} = \frac{\ddot{q}_d}{k} \quad (4.35)$$

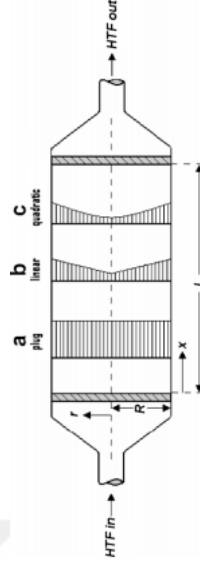
$$T(r, 0) = T_{in} \quad (4.36)$$

Bu ifadelerden Denklem 4.33 tank içerisindeki merkez sıcaklığı, Denklem 4.34 tankın y eksenini etrafında simetrik olduğunu ve Denklem 4.35 tank cidarındaki ısı kazancını göstermektedir. Denklem 4.35'deki $\ddot{q}_d$ ifadesi Fourier Kanunundan aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ddot{q}_d = \frac{T_\infty - T_y}{R_T} \quad (4.37)$$

Burada T_∞ çevre sıcaklığını, T_y yüzey sıcaklığını ve R_T ise daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere tankın iç kısmından dış kısmına olan ısı direnci temsil etmektedir.

Denklem 4.32'i çözmek için radyal yöndeki sıcaklık değişiminin lineer veya parabolik olarak değiştiğinin kabul edilebileceği yukarıda belirtilmişti. Lineer ve parabolik durumda sıcaklık değişimi ifadeleri aşağıda sırasıyla verilmiştir ve Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.5. Tank içerisinde radyal yöndeki sıcaklık değişiminin lineer ve parabolik değişiminin gösterimi

$$T = T_c + \frac{T_\infty - T_c}{kR_T + D} r \quad (4.38)$$

$$T = T_c + \frac{T_\infty - T_c}{2kR_T D + D^2} r^2 \quad (4.39)$$

Radyal yöndeki sıcaklık değişimini gösteren bu ifadeler Denklem 4.32’de yerine sırası ile yazılarak tank içerisindeki sıcaklık değişimi elde edilir.

Denklem 4.32’da, Denklem 4.38 ve 4.39 ifadelerinin yazılmasıyla, adi diferansiyel denklem elde edilmiş olur. Bu denklemde tek değişken T_c ’dir. Bu adi diferansiyel denklemin çözülmesiyle $T_c(r, z)$ ifadesi elde edilir. Ayrıca Denklem 4.32’den $\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ ifadesinin çıkarılması ile enerji denklemi bir boyutlu hale getirilir. Yine aynı sınır şartları ve radyal yöndeki sıcaklık değişimleri uygulanarak $T_c(z)$ ifadesi yine elde edilmiş olur. Bir boyutlu enerji denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$\epsilon \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + H A_{yatak} (T_{FDM} - T) \quad (4.40)$$

Yukarıda verilen iki boyutlu ve bir boyutlu denklemler kullanılarak sistem üzerindeki önemli etkilere sahip olan; tank içerisindeki gözenekliliğin, kapsül çapının, ITA giriş sıcaklığının ve ITA debisinin sistem üzerindeki etkileri parametrik olarak araştırılabilir. Yukarıda verilen diferansiyel denklem çözümleri sırasında yapılan

kabullerden dolayı sistemin gerçek değerleri ile teorik olarak bulunan değerler arasında bir miktar fark olacaktır. Ancak parametrik analizler sırasında, tüm durumlar için aynı kabuller kullanılacağı için hata tüm durumlarda bağıl olarak aynı olacaktır. Böylece parametrik analizlerin sonuçlarının karşılaştırılmasında hata tüm durumlarda bağıl olarak aynı olacağı için karşılaştırma açısından önemli bir etkiye sahip olmayacaktır. Sistem üzerinde önemli etkilere sahip olan parametreler farklı değerleri için irdelenebilecektir.

4.2. Mikro Seviyede Çalışmalar

Buz kapsülü şekillerinin sistem performansı üzerinde önemli etkileri olduğu literatür taraması bölümünde belirtilmişti. Buz kapsüllerinin en önemli etkisi enerji yükleme süresidir. İyileştirilmiş enerji yükleme süresinin iki önemli etkisi vardır. Bunlardan ilki aynı enerji yükleme süresinde daha fazla enerji depolanmasıdır. İkincisi ise enerji yükleme süresinin kısalması ile enerji yükleme için gerekli olan toplam enerji miktarının azaltılmasıdır. Böylece sistemden elde edilecek olan hem ısı hem de ekonomik fayda arttırılabilir. Bu bölümde GİMSA'daki BED sisteminde kullanılan buz kapsüllerinin davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Cryogel firmasına ait modifikasyon yapılmış kapsüllerin, normal küre kapsüllere göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Kapsüllerin sayısal modelini geliştirilirken ElGhnam ve arkadaşlarının [32] çalışması baz alınmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında; kapsül çapının, ITA sıcaklığının ve ITA debisinin etkisi araştırılmıştır. Sayısal çalışmalardan elde edilen veriler, ElGhnam ve arkadaşlarının deneysel çalışmalarının sonuçlar ile doğrulanmıştır. Mikro seviyede çalışmalar kapsamında, düz küre ve Cryogel'in buz kapsülü olmak üzere iki adet buz kapsülü modellenmiştir. GİMSA'da kullanılan Cryogel buz kapsülünün, normal düz küre kapsül ile performans karşılaştırılması yapılmıştır. Analizler enerji yükleme (buzlanma, katılaşma) ve enerji boşaltma (erime, sıvılaşma) periyotları için gerçekleştirilmiştir.

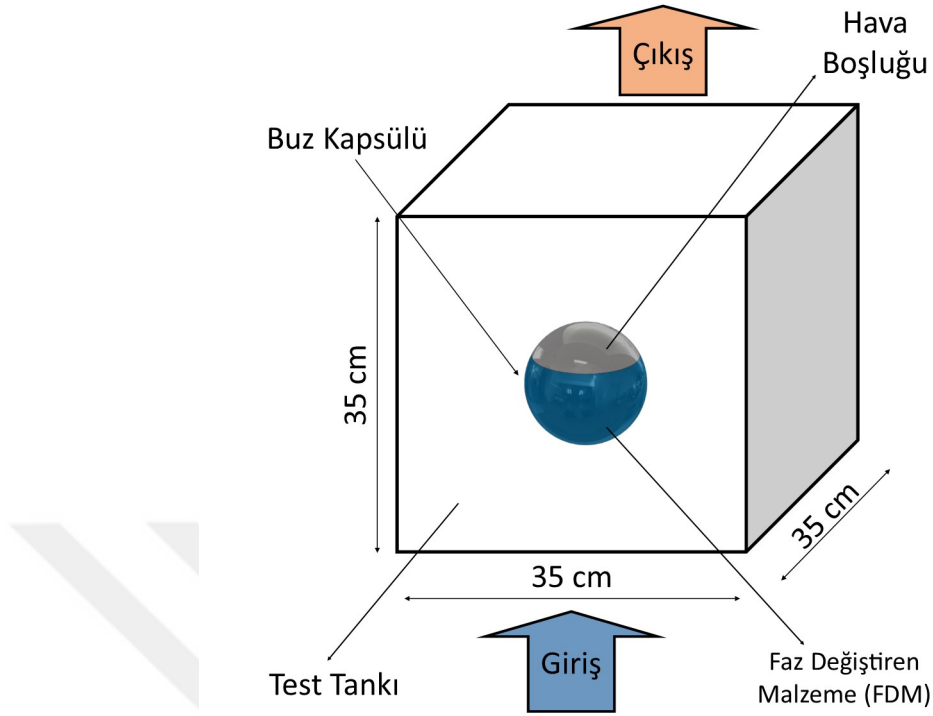
4.2.1. Sayısal Model

Sayısal modellemeler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemelerde, ElGhnam ve arkadaşlarının [32] yapmış olduğu deneysel çalışma göz önünde

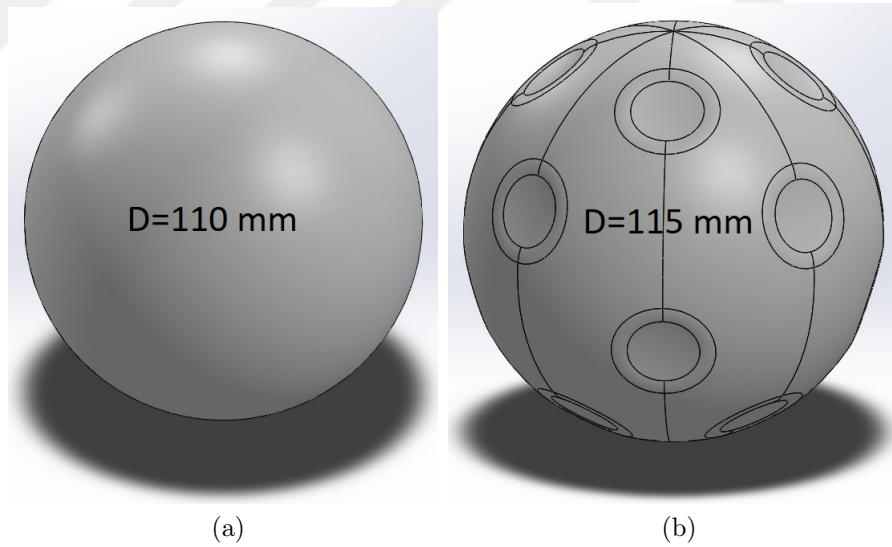
bulundurulmuştur. Sayısal modelin şematik görünümü Şekil 4.6'de verilmiştir. Şekil 4.6'den görüldüğü üzere, $35\text{ cm} \times 35\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ ölçülerindeki prizmatik bir tankın tam ortasına buz kapsülü yerleştirilmiştir. Bu tankın alt kısmından ITA girmekte ve üst kısmından ise çıkmaktadır. ElGhnam ve arkadaşlarının çalışmasında kapsül hacminin %80'i su ile doldurulmuştur. Geriye kalan %20'lik kısım ise hava hacmidir.

Tez çalışması kapsamında, iki farklı sayısal modelleme yapılmıştır. Sayısal modellemelerin birinde hava boşluğu dikkate alınırken, ikincisinde hava boşluğu dikkate alınmamış kapsülün tamamının FDM ile dolu olduğu kabul edilmiştir. Bu sayısal çalışmaların sonuçları kıyaslanmıştır. İki farklı sayısal modellemenin yapılmasındaki en büyük neden sayısal çözümlemelerin süresidir. Hava boşluğunun dikkate alındığı sayısal analizde, bir sayısal çözümleme yaklaşık olarak 56 saat civarında (3.40 GHz 12 işlemci, 32 GB RAM ile) sürmektedir. Hava boşluğunun dikkate alınmadığı durumda ise bir sayısal çözümleme yaklaşık olarak 32 saat civarında tamamlanmaktadır. İrdeleme çalışmaları kapsamında ana amaç Cryogel kapsülün ısı performansının, düz küre kapsül ile karşılaştırılması olduğundan hava boşluğunu dikkate almamanın karşılaştırmada önemli etkisi olmayacaktır. Çünkü sayısal modellemelerde kapsül hacimleri eşit olarak alınmıştır. Kapsüllerin performans karşılaştırılması bağl olarak çok az bir hata ile gerçekleştirilmiş olacaktır. Sonuçta hava hacminin dikkate alındığı duruma göre çok daha kısa sürede hemen hemen aynı doğrulukta kapsüller arasında karşılaştırma yapılmış olacaktır.

Şekil 4.6'de verilen model kapsamında ilk olarak kapsüller SolidWORKS ile modellenmiştir. Tez çalışması kapsamında modellenen ve çözümlenen buz kapsülleri Şekil 4.7'de görülmektedir. Cryogel kapsül GİMSA'da aktif olarak kullanılan kapsüldür. Katılaşma ve erime sürelerinde kapsül hacminin önemli etkisi olduğu için düz kürenin hacmi Cryogel kapsül hacmi ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Kapsül hacimlerinin eşit olması durumundaki kapsül çapları Cryogel kapsül için 11.50 cm ve düz küre kapsül için ise 11 cm'dir. Yani iki kapsülün çapları arasında 5 mm bir fark bulunmaktadır. Bu fark ise kapsül etrafındaki akışı alanı üzerindeki ciddi bir etkisi yoktur. Çünkü düz kapsül ve Cryogel kapsül etrafındaki akışta Reynolds sayıları arasındaki fark %4.2 oranında değişmektedir. Reynold sayısındaki bu değişimin ısı geçişi üzerindeki önemli bir etkisi bulunmamaktadır.



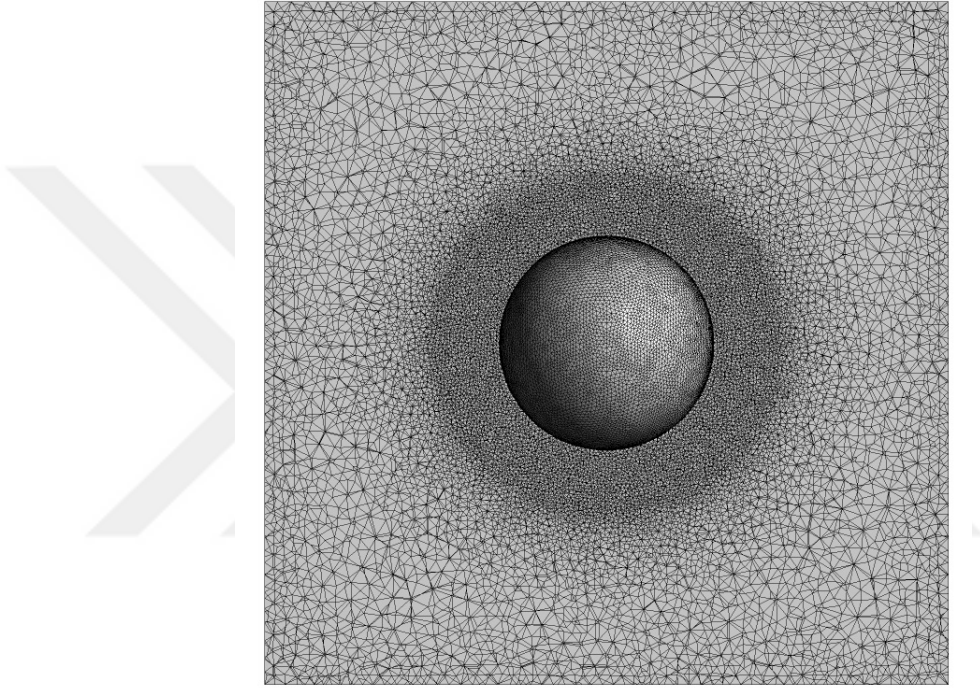
Şekil 4.6. Sayısal modelin şematik olarak gösterimi



Şekil 4.7. Sayısal modellemesi yapılan a) düz küre kapsül ve b) CRYOGEL kapsülün görüntüleri

Modellemeler sırasında sadece kapsüllerin FDM hacimleri modellenmiştir. Kapsül cidarı ve diğer katı kısımlar modellenmemiştir. Kapsül cidarının kalınlığı ve malzeme özelliği sayısal analizler sırasında sisteme sınır şartı olarak girilmiştir. SolidWORKS 2018 programında modellenen kapsüller Workbench 18.1 programı kullanılarak sayısal çözümleme için hazır hale getirilmiştir. Workbench 18.1 programının Mesh modülü ile model sonlu sayıda hacme bölünmüştür. Sayısal modelin orta düzlemdeki

ağ yapısı Şekil 4.8’de görülmektedir. Ağ yapısı kurulurken sayısal çözümlemeyi ağ yapısından bağımsızlaştırmak için büyük boyuttan küçük boyuta doğru farklı eleman boyutu denenmiştir. Ayrıca ITA ve kapsül arasındaki temas yüzeyinde daha hassas ağ yapısı kullanılmıştır. Böylece kapsül etrafındaki akış ve ısı geçişi hesaplamaları daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Aynı özellikteki ağ yapısı Cryogel kapsülde de kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Düz küre kapsül için ağ yapısı

4.2.2. Sayısal Prosedür

Buz kapsüllerinin sayısal modelleri yukarıda detayları verilen modelleme yöntemleriyle ElGhnam ve arkadaşlarının [32] çalışması baz alınarak oluşturulmuştur. Elde edilen bu sayısal modelin çözülmesi için FLUENT 18.01 [67] programı kullanılmıştır. Fluent programı aracılığı ile süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri çözümlenmiştir. Ayrıca küre etrafındaki türbülans etkilerini de hesaba katılmıştır. Farklı türbülans modelleri denenerek, bu modeller içerisinde en iyi çözüm veren türbülans modeli seçilmiştir. Donma ve erimeyi modellemek için Solidification& Melting modülü kullanılmıştır.

Basınç ve hız eşleme metodu olarak Coupled algoritması kullanılmıştır. Ayrıca Solidification& Melting modülünün kullanılabilmesi için basınç çözümlemelerinde

PRESTO! şeması kullanılmıştır. Sayısal çözümlerler zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümlemenin sonuçlarını zaman adımından bağımsızlaştırmak için zaman adımı 3, 2, 1, 0.5 ve 0.1 sn olarak denenmiştir. Bunların içerisinde en iyi ve en hızlı çözümü veren zaman adımı seçilmiştir.

Şekil 4.6’de görülen sayısal modelin alt yüzeyi giriş (velocity inlet), üst yüzeyi ise çıkış (pressure outlet) olarak tanımlanmıştır. Tez çalışmasında giriş için farklı sıcaklık ve hız değerleri için çözümler yapılmıştır. Sayısal analizler hem enerji yükleme (donma) hem de enerji boşaltma (erime) periyotları için yapılmıştır. Modellenen su, buz, hava ve ITA hacimleri için fiziksel özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. Su, buz, hava ve ITA’nın sıkıştırılmaz akışkan olduğu ve fiziksel özelliklerinin sıcaklık ile değişmediği kabul edilmiştir.

Tablo 4.1. Su, buz, hava ve ITA’nın sayısal analizlerde kullanılan fiziksel özellikleri

Akışkan	ρ kg/m^3	c_p J/kgK	k W/mK	μ $kg/m\ s$	h_{ks} J/kg	T_{FDM} K
Su	998.5	4182	0.6	0.001003	333500	273.15
Buz	915	2200	0.0454		333500	273.15
Hava	1.225	1006.43	0.0242	1.7894×10^{-5}		
ITA	1058	3605	0.465	0.0085		

4.3. BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Bu çalışmada gerçekleştirilen BED sisteminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi iki ana başlıkta incelenmiştir. Bunlar;

1. GİMSA’da kullanılan BED sisteminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi
2. Farklı BED kullanım stratejilerinin sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir.

İlk kısımda GİMSA’da kullanılan BED sisteminin ekonomik etkisi GİMSA’ya fatura edilen elektrik tüketim miktarı ve fatura bedelleri üzerinden gerçek şartlar altında değerlendirilmiştir. Sistemin ekonomik performansı açısından önem arz eden, geri ödeme süresi ve 10 yılın sonunda sağlayacağı kâr miktarı belirlenmiştir. İkinci kısımda ise BED sistemlerinde ekonomik performans üzerindeki en önemli etkiye

sahip olan BED kullanım stratejilerinin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, 8 farklı BED kullanım stratejisinin sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Her bir BED kullanım stratejisi için geri ödeme süresi ve 10 yılın sonunda sağlayacağı kâr miktarı hesaplanmıştır. En kısa sürede geri ödeme yapan ve 10 yılın sonunda en yüksek kârı sağlayan BED kullanım stratejisi belirlenmiştir.

4.3.1. GİMSA’da Kullanılan BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

GİMSA’ya entegre edilen BED sisteminin ekonomik olarak sağladığı fayda GİMSA’ya fatura edilen elektrik miktarları üzerinden değerlendirilmiştir. Temmuz 2016 fatura döneminden başlayarak, Nisan 2017 fatura dönemine kadar fatura edilmiş 10 aylık periyot için değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmeler hem elektrik tüketim miktarı hem de fatura edilen bedel üzerinden yapılmıştır. GİMSA’da soğutma sisteminde ayrı bir elektrik aboneliği bulunduğu için BED sisteminin faydası net bir şekilde belirlenmiştir. BED’in olduğu durum ile BED olmadığı durum arasındaki ekonomik faydayı karşılaştırmak için BED’in olmadığı durum tekli tarife ve üçlü tarife kullanımı durumuna göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yasal zorunluluk olmadıkça firmalar tarafından genellikle tekli tarife kullanılmaktadır. Bu yüzden her iki durumda sağlanacak ekonomik fayda belirlenmiştir.

BED sisteminin kurulum maliyetleri, BED sisteminin kurucu firması Temas Mühendislikten alınmıştır. Bu değerler GİMSA’da kullanılan sistemin kurulduğu dönemdeki değerleridir. Sistemin kullanılmaya başladıktan sonra ilerleyen yıllarda sağlayacağı fayda hesaplanırken elektrik birim fiyatlarına yıllık %5 zam geleceği kabul edilmiştir. Ayrıca sistem için gerekli olan bakım ve servis ücretleri de yıllık bazda dikkate alınmıştır. Sistemde meydana gelebilecek arıza ve sorunların oluşturacağı maliyetler dikkate alınmamıştır. GİMSA’da kullanılan soğutma sisteminin elektrik tüketim miktarları Tablo 4.2’de görülmektedir. Bu değerler, GİMSA elektrik faturalarından alınmıştır. Tablo 4.2’deki değerler kullanılarak, sistemde BED olmadığı durumlar için de elektrik tüketim maliyetleri belirlenmiştir. Böylece BED sisteminin sağladığı ekonomik fayda belirlenmiştir.

Tablo 4.2. GİMSA’da soğutma sistemi için fatura edilen elektrik miktarları

	Fatura Dönemi	İlk Endeks			Son Endeks		
		Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant	Gece
1	Temmuz 2016	0	0	0	97191	39419	271474
2	Ağustos 2016	97191	39419	271474	156769	61452	433606
3	Eylül 2016	156769	61452	433606	219678	84956	611927
4	Ekim 2016	219678	84956	611927	227267	89725	615109
5	Kasım 2016	227267	89725	615109	238214	94985	619210
6	Aralık 2016	238214	94985	619210	249851	100540	623389
7	Ocak 2017	249851	100540	623389	262161	106291	627708
8	Şubat 2017	262161	106291	627708	272836	111462	631548
9	Mart 2017	272836	111462	631548	283859	116659	636213
10	Nisan 2017	283859	116659	636213	291360	121054	638723

4.3.2. Buz Depolama Sisteminin Farklı BED Kullanım Şartlarında Ekonomik Analizi

BED sistemlerinde, elektrik birim fiyatının pahalı olduğu saatlerdeki soğutma yükü, elektriğin ucuz olduğu saatlere kaydırılır. Böylece elektrik tarifesinin gün içerisindeki değişiminden yararlanarak, soğutma sistemleri için gerekli olan elektrik maliyetleri azaltılır. Bölüm 2.1’deki çalışmalarda görüldüğü üzere, BED sistemlerinin elektrik tüketim maliyetini azaltmada ve elektrik tüketimindeki pik yükü kaydırmada önemli katkıları bulunmaktadır. Yine Bölüm 2.1 ve 2.2’den görüldüğü üzere, BED sistemlerinin işletilmesi ile alakalı çok sayıda stratejiler bulunmaktadır. *BED kullanım stratejisi en genel anlamda ne kadar enerji depolanacağı ve bu depolanan enerjinin nasıl kullanılacağına belirlenmesidir.* Bu stratejilerin, BED sistemlerinden elde edilecek ekonomik fayda üzerinde etkileri olduğu kadar, sistemin ilk yatırım maliyeti üzerinde de ciddi etkileri vardır. Bu sebepten dolayı BED kullanım stratejisi dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

BED sistemleri, normal bina soğutma sistemlerine göre daha yüksek ilk yatırım maliyeti ve bakım-servis ücreti gerektirmektedir. Ancak BED sistemlerinden elde edilecek ekonomik tasarruf sayesinde ödenen fazla yatırım miktarı kısa sürede geri ödenerek, kâr durumuna geçer. Sistemin ilk yatırım maliyeti ve ekonomik tasarruf

miktarı üzerindeki en büyük etkiye BED kullanım stratejisi sahiptir. Çünkü BED kullanım stratejisi, ne kadar enerji depolanacağını ve depolanan enerjinin nasıl kullanılacağını belirlemektedir. Ne kadar enerji depolanacağı sistemin ilk yatırım maliyeti ile direkt alakalıdır. Çünkü artan depolama miktarı ile BED sistemi için gerekli olan ilk yatırım maliyeti de artmaktadır. Depolanan enerjinin nasıl kullanılacağı ise sistemden alınacak ekonomik tasarruf miktarı ile direkt alakalıdır. İyi bir şekilde planlanmamış ve analiz edilmemiş BED kullanım stratejisi, sistemin geri ödemesi süresini uzatabilir ya da sistemden sağlayacağı ekonomik tasarruf miktarını azaltabilir. Bu yüzden BED kullanım stratejileri, kullanılacak olan mekan için iyi bir şekilde planlanmalı ve analiz edilmelidir.

Bu bölümde, GİMSA için farklı BED stratejilerinin ekonomik açıdan etkisi incelemek için gerekli olan alt yapı tanıtılacaktır. Ekonomik analizler kapsamında 8 farklı BED kullanım strateji incelenmiştir. Ekonomik hesaplamalar soğutmanın pik yükü üzerinden yapılmıştır.

4.3.3. Alışveriş Merkezi İçin Düşünülen BED Kullanım Stratejileri

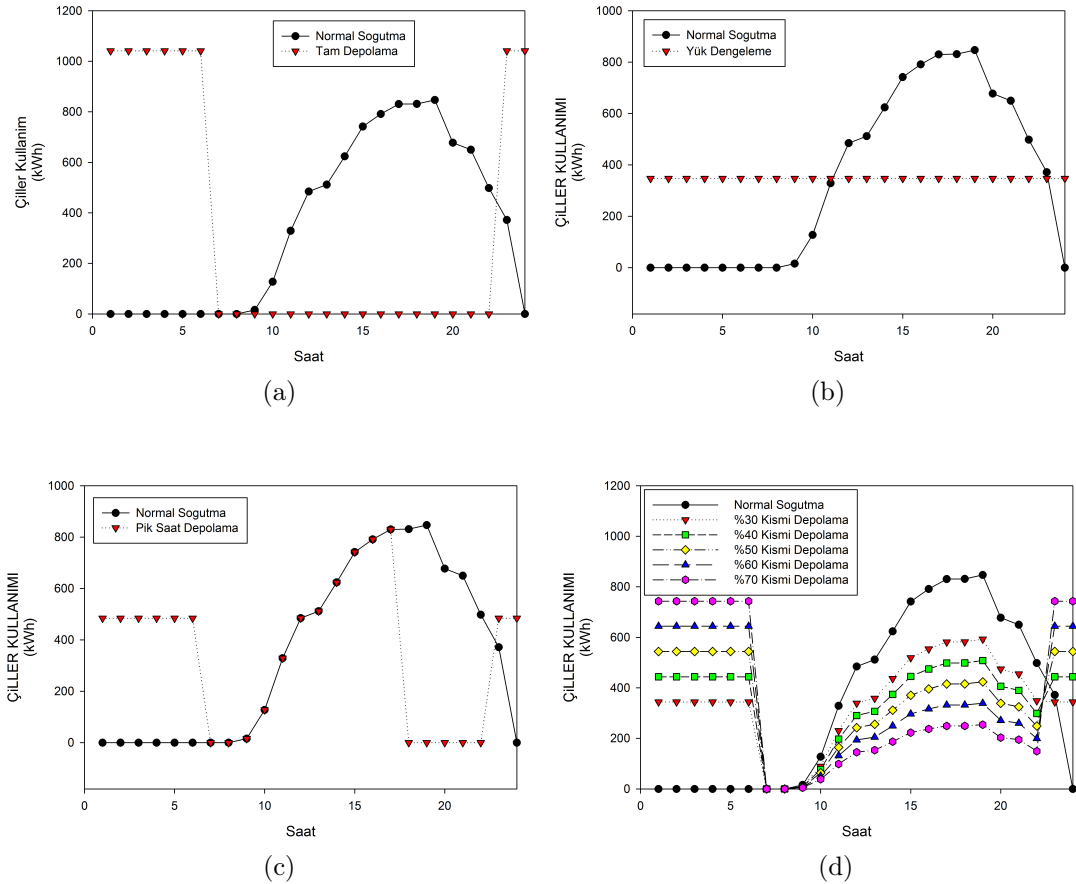
Tez çalışması kapsamında alışveriş merkezi için 8 farklı BED kullanım stratejisi ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan stratejiler ve bu stratejilerde depolanması gereken enerji miktarları Tablo 4.3'de görülmektedir.

Tablo 4.3. BED kullanım stratejileri ve depolanan enerji miktarları

BED Kullanım Stratejisi	Depolanan Enerji Miktarı (kWh)	Depolanan Enerji Miktarı (%)
Tam Depolama	8,332	%100
Yük Dengeleme Soğutucu Kullanımı	2,777	%33.33
Pik Saatler için Kısmi Depolama	3,876	%46.52
%30 Kısmi Depolama	2,760	%33.13
%40 Kısmi Depolama	3,556	%42.68
%50 Kısmi Depolama	4,352	%52.23
%60 Kısmi Depolama	5,148	%61.78
%70 Kısmi Depolama	5,943	%71.34

Tablo 4.3'dan görüldüğü üzere, bazı soğutma grubu kullanımlarının depolama miktarları yaklaşık olarak aynıdır. Örneğin, yük dengeleme strateji ile %30 kısmi depolamada yaklaşık olarak 2,750 kWh enerji depolanmaktadır. Benzer şekilde

pik saatler için enerji depolama ile %40 kısmi enerji depolamada yaklaşık olarak 3600 kWh enerji depolanmaktadır. Ancak bu depolama kapasitelerinden yararlanma şekilleri birbirinden farklıdır. Her bir BED kullanım stratejisinin saatlik soğutma grubu kullanımı Şekil 4.9'de görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, tam depolama stratejisinde (Şekil 4.9a), binanın pik soğutma yükünün tamamı depolanır. Soğutma grubu sadece pik olmayan saatlerde çalıştırılır. Bu stratejide diğer stratejilere göre daha yüksek kapasiteli soğutma gruplarına gereksinim duyulur. Ayrıca deponalacak enerji miktarında diğer stratejilere göre yüksek olmasından dolayı daha yüksek depolama hacmi gerektirmektedir.



Şekil 4.9. Çalışmada kullanılan BED kullanım stratejilerinin saatlik soğutma grubu kullanımı

Yük dengeleme stratejisinde (Şekil 4.9b) temel amaç soğutma gruplarını gün içerisinde eşit miktarda kullanmaktır. Bu amaç doğrultusunda toplam soğutma yükünün bir kısmı depolanır. Enerji yükleme işleminin büyük bir kısmı gece tarifesinde gerçekleştirilir. Ayrıca gündüz tarifesinde bina soğutma ihtiyacının

soğutma grubu kapasitesinin altında olduğu zaman aralıklarında da yine enerji yükleme işlemi gerçekleştirilir. Depolanan enerji, soğutma grubu kapasitesini aşan soğutma yüklerinde kullanılır. Bu BED kullanım stratejisinde gün içerisinde pik yükü karşılamak için gerekli olan yüksek kapasiteli soğutma gruplarına gerek duyulmaz.

Pik saatler için kısmi depolama stratejisinde (Şekil 4.9c) sadece pik saatlerdeki soğutma yükü depolanır. Enerji yükleme işlemi gece tarifiesi saatlerinde gerçekleştirilir. Gündüz tarifiesi süresince (bekleme periyotunda) enerji depolanır. Depolanan enerji sadece pik saatlerde kullanılır. Bu stratejinin temel amacı pik saatlerdeki yüksek elektrik birim fiyatından kaçınmaktır. Bu sistemde binanın soğutma yükünün saatlik değişimine göre soğutma grubu kapasitesi normal bina soğutma sistemi ile aynı olabileceği gibi daha düşükte olabilir.

Kısmi depolama stratejilerinde (Şekil 4.9d) temel hedef binanın soğutma yükünü pik olmayan saatlere kaydırmak ve soğutma grubu kapasitesini azaltmaktır. Bu kapsamda bina için gerekli toplam soğutma yükünün bir kısmı pik olmayan saatlerde depolanır. Depolanan enerji ise gün içerisinde kullanılır. Depolanan enerji soğutma gruplarına giden ITA'nın ön soğutmasında kullanılabileceği gibi, direk bina soğutması içinde kullanılabilir. Bu tez çalışması kapsamında, toplam soğutma yükünün %30, %40, %50, %60 ve %70'inin depolandığı durumlar dikkate alınmıştır.

Şekil 4.9'de görülen, pik soğutma yükü için saatlik soğutma grubu kullanımları dikkate alınarak sistemin günlük elektrik tüketim maliyet analizi yapılmıştır. Böylece farklı BED kullanım stratejilerinin, BED sisteminden elde edilecek ekonomik tasarruf üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Ekonomik analizlerde pik soğutma yükü dikkate alınmıştır. Pik soğutma yükünün bütün bir yıl içerisinde sadece kısa süreyi kapsadığı unutulmamalıdır. Ancak BED kullanım stratejileri aynı kullanım şartları altında karşılaştırılmış olduğundan, stratejiler arasındaki ekonomik fayda gerçek şartlar altında bağl olarak aynı kalacaktır. Böylece GİMSA alışveriş merkezi için farklı BED kullanım stratejilerinin sağladığı ekonomik fayda belirlenmiş olacaktır.

4.3.4. BED Kullanım Stratejileri Göre İlk Yatırım Maliyetleri

BED sistemlerinin genel yapısı ve şematik görüntüsü Bölüm 3.3'de verilmişti. Bir

BED sisteminin temel makine, teçhizat ve ekipmanları Tablo 4.4’de görülmektedir. Ayrıca Tablo 4.4’de bu ekipmanları fiyatları ve stratejilerine göre nasıl değiştiği de verilmektedir.

Tablo 4.4. BED sisteminde kullanılan makine, teçhizat, ekipmanlar ve bunların ilk yatırım miktarları

Sistem Elemanı	BED Kullanım Stratejisiyle Değişimi
BED Tankı	Orantılı
BED Kapsülü	Orantılı
Soğutma Grubu	Orantılı
Pompa	Orantılı
Isı Değiştiricisi	Sabit
ITA	Orantılı
Tesisat ve Elemanları	Sabit

Tablo 4.4’den görüldüğü üzere BED sisteminde kullanılan makine, teçhizat ve ekipmanların, BED kullanım stratejileri göre değişimi farklı olabileceği gibi sabitte olabilmektedir. BED sistemi elemanlarından tesisat işçiliği ve tesisat elemanlarını tüm stratejiler için hemen hemen aynıdır. Çünkü bütün BED stratejilerinde, aynı tesisat hattı ve ekipmanları kullanılmaktadır. Bunun dışında BED sisteminde yer alan tüm önemli sistem elemanları, BED kullanım stratejisine göre değişim göstermektedir. Bu değişimler BED sisteminin depolama kapasitesi ile orantılı olarak değişebileceği gibi, firmaların fiyat politikasına göre değişmektedir. Tez çalışması kapsamında her bir ürün baremi için fiyat alınmış ve fiyat değişimleri firmalardan alınan bilgiler ışığında belirlenmiştir. BED tankının maliyeti depolama kapasitesi ile orantılı olarak değişmektedir. Çünkü tank metal sac ve yalıtım malzemesinden oluşmaktadır. Bu ürünler ise ağırlık ve alan üzerinden fiyatlandırılan ürünler olduğundan, artan depolama kapasitesi ile deponun maliyeti de artmaktadır. BED kapsülü depolama tankına benzer şekilde depolama kapasitesi ile orantılı olarak değişmektedir. Çünkü depolama kapasitesi direk olarak kapsül sayısı ile ilişkilidir. Artan depolama kapasitesiyle buz kapsülü sayısı da artacaktır. Soğutma ünitesinin (grubu) fiyatları markadan markaya ciddi bir şekilde değişim göstermektedir. Ancak bu tez çalışmasında, farklı BED kullanım stratejilerinin ekonomik performans açısından karşılaştırmasında aynı markalar kendi içlerinde değerlendirilmiştir. Böylece hangi BED kullanım stratejisinin ekonomik açıdan daha iyi performans

gösterdiği aynı marka grupları içerisinde belirlenecektir ve en iyi durum tüm markalarda aynı olacaktır. Artan depolama kapasitesiyle tank hacmi ve kapsül sayısı artacağından sistemdeki basınç düşüşleri artacaktır. Artan depolama kapasitesi ile pompanın kapasitesi de artmaktadır. Bu yüzden artan depolama kapasitesiyle pompa maliyetleri orantılı olarak artmaktadır. Bina dağıtım santrallerinden gelen suyu ITA ile soğutma için bir plakalı ısı değiştiricisi kullanılmaktadır. Bina soğutma yükü tüm durumlarda aynı olduğundan, soğutulması gereken su miktarı da aynı olacaktır. Bu yüzden plakalı ısı değiştiricisinin kapasitesi tüm durumlarda aynıdır. Buna bağlı olarak tüm stratejiler için ısı değiştiricisinin maliyeti sabit olarak alınmıştır. ITA'nın maliyeti depolama kapasitesi ile orantılı olarak değişmektedir. Çünkü artan depolama kapasitesi ile depolama hacmi artacak ve daha fazla ITA'ya gerek duyulacaktır. ITA'lar litre bazında satışa sunulan ürünler olduğundan depolama kapasitesi ile doğru orantılı değişen bir maliyete sahiptir.

Yukarıda açıklanan ilk yatırım maliyetlerine ek olarak, soğutma sisteminin belirli periyotlarda düzenli bakımının yapılması gerekmektedir. Geri ödemesi süresinin hesaplanmasında bu yıllık periyodik bakımlar dikkate alınmıştır. Ancak sistemde meydana gelecek beklenmedik arızalar ve bakım gereksinimleri dikkate alınmamıştır. Ayrıca sistemin ekonomik olarak analizinin yapılmasında elektrik fiyatlarına gelecek zamlarda dikkate alınmıştır. Bu kapsamda elektrik birim fiyatının yıllık %5 oranında artış göstereceği düşünülmüştür.

4.4. Bölüm Sonu Değerlendirmesi

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların modelleme ve analiz alt yapıları açıklanmıştır. Çalışmalar makro seviye çalışmalar, mikro seviye çalışmalar ve ekonomik analizler olmak üzere üç ana başlıkta gerçekleştirilmiştir. Makro seviye çalışmalarda BED sisteminin ve sistem elemanlarının termodinamik analizlerinde kullanılacak denge ifadeleri açıklanmıştır. Ayrıca BED tankı içerisinde sıcaklık dağılımını elde etmek için tankı gözenekli ortam gibi ortam gibi modellenmiştir. Bu modellemenin alt yapısı ve denklem çözümleri açıklanmıştır. Mikro seviyede çalışmada GİMSA'da kullanılan buz kapsüllerinin ısı ve akışkan akımı davranışını incelemek için kullanılan sayısal modelleme yöntemi tanıtılmıştır. Ekonomik

analizler iki temel başlıkta işlenmiştir. İlk olarak GİMSA'daki gerçek elektrik tüketiminden yola çıkarak sistemin GİMSA'ya sağladığı ekonomik fayda ve sistemin geri ödeme süresi belirlenmiştir. İkinci olarak 8 farklı BED kullanım stratejisinin ekonomik fayda ve geri ödeme süresi üzerindeki etkisi belirlenmiştir. En iyi depolama stratejisini belirlenmiştir.



5. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasından elde edilen veriler ve bulgular açıklanmıştır. Tez çalışmasının ana faaliyet başlıkları olan makro seviye, mikro seviye ve ekonomik değerlendirme çalışmalarından elde edilen sonuçlar neden-sonuç ilişkileri içerisinde irdelenmiştir.

5.1. Makro Seviye Çalışmaların Sonuçları

Tez çalışmasında makro seviyede yürütülen sistemin termodinamik ve ısı geçişi analizleri bu bölümde verilmiştir. Sonuçlar neden-sonuç ilişkileri içerisinde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

5.1.1. Makro Seviye Termodinamik Analiz Sonuçları

Bu kısımda, BED sisteminde kullanılan ana ekipmanların (buz depolama tankı, soğutma ünitesi ve ısı değıştiricisi) ve BED sisteminin genel; enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme periyodundaki performansları termodinamik açıdan değerlendirilmiştir. İlk olarak; BED tankının, soğutma grubunun ve ısı değıştiricisinin tasarım değeri üzerinden termodinamik analizler yapılmıştır. Daha sonra GİMSA'dan alınan verilerle, BED sisteminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik ve ortalama enerji ve ekserji verimleri belirlenmiştir.

5.1.1.1. BED Tankının Termodinamik Açıdan Değerlendirilmesi

BED sistemini termodinamik açıdan değerlendirmek için sisteme Bölüm 4.1.2'deki açıklanan bağıntı ve ifadeler kullanılarak TD1K ve TD2K uygulanmıştır. Termodinamik analizler kapsamında sisteme kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri

uygulanarak sistemin enerji ve ekserji verimleri belirlenmiştir. Hesaplamalar sırasında yapılan kabuller Bölüm 4.1.1’de sıralanmıştır. Şekil 4.1’de görülen her bir hat için sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değerleri Tablo 5.1’de görülmektedir. Termodinamik analizlere başlamadan önce, analizlerde kullanmak üzere ilk olarak ortamdan tanka geçen ısı geçişi miktarını tespit etmek gerekmektedir. Bu bağlamda, Bölüm 4.1.3’da açıklanan taşınım ile ısı geçişi alt yapısı kullanılmıştır.

Hesaplamalarda $Nu_{ic} = 3.54$ ve $Nu_{dis} = 105.28$ olarak hesaplanmıştır. Nu ifadelerinden;

$$h_{ic} = 408.39 \text{ kW/m}^2 \text{ K} \quad (5.1)$$

ve

$$h_{dis} = 0.6830 \text{ kW/m}^2 \text{ K} \quad (5.2)$$

olarak hesaplanmıştır. h_{ic} ve h_{dis} değerleri kullanılarak, Denklem 4.23’den BED tankının iç tarafı ile dış tarafı arasındaki ısı direnç;

$$R_T = 3.32 \text{ (m}^2 \text{ K/kW)} \quad (5.3)$$

olarak hesaplanmıştır. BED tankı için hesaplanan bu ısı direnç tüm çalışma periyotları (enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme) için yaklaşık olarak aynıdır. Bu ısı direnç değeri, depolama tankının toplam yüzey alanı ve sistemin farklı periyotlardaki çalışma sıcaklıklarının ortalaması kullanılarak Denklem 4.12’den tankın ısı kazancı miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaların sonucunda sistemin çalışma periyotları için BED tankının ısı kazancı;

$$\dot{Q}_{kazanc,yukleme} = 10.53 \text{ kWh} \quad (5.4)$$

$$\dot{Q}_{kazanc,bosaltma} = 5.82 \text{ kWh} \quad (5.5)$$

$$\dot{Q}_{kazanc,bekleme} = 8.95 \text{ kWh} \quad (5.6)$$

olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. BED sistemindeki her bir hat için sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değerleri

Hat	T (°C)	V (m ³ /h)	E (kW)	Ex (kW)
a	-6	130.08	-3623.65	170.97
b	-3		-3212.38	133.10
c	10	127.46	-1369.80	23.92
d	4		-2188.83	62.03

Tablo 5.2. Buz depolama tankı için enerji yükleme, boşaltma ve bekleme periyotlarında enerji ve ekserji verimleri

Çalışma Modu	Enerji Verimi η (%)	Ekserji Verimi ψ (%)	Ekserji Yokoluşu I (kW)
Yükleme	94.01	76.84	36.04
Boşaltma	97.50	63.57	38.31
Bekleme	97.70	95.86	0.61

Sistemde ITA'nın sirkülasyonunu sağlamak için 20 kW'lık pompa kullanılmaktadır. Bu pompa gücünü ve Tablo 5.1'deki enerji ve ekserji değerlerini kullanarak; BED tankının enerji yükleme, enerji boşaltma ve bekleme durumundaki enerji verimleri, ekserji verimleri ve yok olan ekserji miktarları Tablo 5.2'da verilmiştir. Tablo 5.2'den görüldüğü üzere, enerji verimliliği tüm periyotlarda %94 ve üstündedir. En düşük enerji verimi değeri %94 ile enerji yükleme periyotunda görülmektedir. Enerji boşaltma ve bekleme periyotlarındaki için enerji verimleri %97.50 civarındadır. Enerji yükleme periyodundaki enerji veriminin daha düşük olmasının nedeni, bu periyotta ITA'nın sıcaklığının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. ITA sıcaklığının daha düşük olması, ortam ile olan sıcaklık farkını arttırmıştır. Artan sıcaklık farkıyla BED tankının ortamdaki ısı kazancı miktarı da artmıştır. BED sisteminin üç çalışma periyodundaki enerji verimi değerlerine bakılacak olursa, sistem ideale yakın bir seviyede çalışıyor gibi görünmektedir. Ancak enerji verimini elde etmek için kullanılan enerji dengesi sistemdeki tersinmezlikleri hesaba katmamaktadır. Sistemdeki tersinmezlikleri dikkate almak için ekserji dengesinin yazılarak, ekserji verimlerinin irdelenmesi gerekmektedir. Tablo 5.2'den enerji

yükleme, enerji boşaltma ve bekleme periyotları için ekserji verimlerine bakılacak olursa; ekserji verimi değerlerinin enerji yükleme için %76.84, enerji boşaltma için %63.57 ve bekleme için ise %95.86'dır. Ekserji verimlerinden görüldüğü üzere, en yüksek ekserji verimi bekleme periyodundadır. Çünkü bu periyotta, BED tankının tek etkileşimi ısı kazancıdır. Isı kazancı ve ısı kazancından kaynaklı meydana gelen ekserji yok oluşu düşük olduğundan, ekserji verimi de yüksek çıkmıştır. En düşük ekserji verimi %63.57 ile enerji boşaltma periyodundadır. Enerji boşaltma periyotundaki ekserji verimi ITA'nın ortalama sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark daha düşük olduğu için, enerji yükleme periyoduna göre daha düşüktür. Enerji yükleme ve enerji boşaltma periyotlarındaki ekserji verimlerinden görüldüğü üzere ekserji veriminde çevre ile olan sıcaklık farkı önemlidir. Sıcaklık farkı arttıkça sistemin ekserji verimi daha yüksek çıkmaktadır. BED tankının ekserji veriminin sistemin çalışma periyotlarına göre değişimi, Rosen ve arkadaşlarının [18] ve Acar ve Dinçer'in [20] yapmış oldukları çalışmaların sonuçları ile uyum göstermektedir.

5.1.1.2. Isı Değiştiricisinin Termodinamik Açıdan Değerlendirilmesi

GİMSA'da kullanılan BED'in entegre edildiği soğutma sisteminde; soğutma sisteminden ya da BED tankından gelen ITA kullanılarak, bina dağıtım ünitelerinden gelen su soğutulmaktadır. Bu soğutma işlemi bir plakalı ısı değiştiricisi vasıtasıyla sağlanmaktadır. Plakalı ısı değiştiricisi şematik olarak Şekil 4.2'de görülmektedir. Şekil 4.2'de görülen plakalı ısı değiştiricisinin giriş ve çıkışlarını temsil eden e, f, g ve h hatları için sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değerleri için Tablo 5.3'de verilmiştir. Plakalı ısı değiştiricisi çok iyi yalıtılmıştır ve ortam ile olan ısı geçiş yüzey alanı BED tankına göre oldukça düşüktür. Bu yüzden, yapılan termodinamik analizlerde, plakalı ısı değiştiricisinin ısı kazancı ihmal edilmiştir.

Tablo 5.3'de görülen her bir hat için enerji ve ekserji değerleri, Denklem 4.28 ve 4.29 kullanılarak soğunun binaya dağıtımını için kullanılan plakalı ısı değiştiricisinin enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonucunda plakalı ısı değiştiricisi için enerji verimi;

$$\eta_{\text{ısı degistiricisi}} = \%91.50 \quad (5.7)$$

Tablo 5.3. Plakalı ısı değıştircisinin giriş ve çıkışlarındaki sıcaklık, debi, enerji ve ekserji değeri

Hat		T (°C)	V (m ³ /h)	E (kW)	E _x (kW)
ITA giriş	e	4	127.47	-2191.67	62.11
ITA çıkış	f	10		-1368.02	23.89
Su giriş	g	12	130.10	-1216.17	16.91
Su çıkış	h	7		-1969.77	45.03

ve ekserji verimi ise

$$\psi_{isi\ degistircisi} = \%73.58 \quad (5.8)$$

olarak hesaplanmıştır. Plakalı ısı değıştircisinde yok olan ekserji miktarı 10.10 kW olarak hesaplanmıştır.

5.1.1.3. Soğutma Sisteminin Termodinamik Açından Değerlendirilmesi

Bölüm 4.1.5’de açıklandığı üzere sistemde aynı marka, model ve kapasitede iki adet soğutma grubu kullanılmıştır. Bu soğutma gruplarının enerji yükleme ve normal soğutma periyotlarındaki teknik verileri Bölüm 4.1.5’de verilmiştir. Soğutma grubunun kendi içindeki COP değeri $COP_{yukleme} = 3.14$ ve $COP_{bosaltma} = 3.30$ ’dur. Ancak COP hesaplamalarında sistemin geneli dikkate alındığı zaman, binanın soğutulmasında harcanan tüm işler hesaba katılmalıdır. Bu kapsamda, sistem genelinde binayı soğutmak için soğutma grubu tarafındaki ITA ve bina dağıtım tarafındaki su için olmak üzere iki adet pompa kullanılmaktadır. Pompaların güçleri $W_{p,ITA} = 20kW$ ve $W_{p,Water} = 15kW$ ’dir. Bu pompa güçleri dikkate alınarak soğutma sisteminin geneli için COP değeri Denklem 4.31 kullanılarak;

$$COP_{sistem,BED} = \frac{320.14(kW)}{101.86(kW) + 20(kW) + 15(kW)} = 2.33 \quad (5.9)$$

$$COP_{sistem,normal\ sogutma} = \frac{415.26(kW)}{125.74(kW) + 20(kW) + 15(kW)} = 2.58 \quad (5.10)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden görüldüğü üzere, bir soğutma sistemindeki COP değerlerini hesaplarken sistemde harcanan tüm değerler dikkate alınmalıdır. Normal soğutma durumundaki COP'nin, buz yapma durumundaki COP'ye göre yüksek olmasındaki neden düşük sıcaklık kuyusunun sıcaklığıdır. Normal soğutma durumunda ITA sıcaklığı daha yüksek olduğundan COP değeride yüksek olmaktadır.

5.1.1.4. Alışveriş Merkezinde Kullanılan BED sisteminin Termodinamik Açidan Değerlendirilmesi

Bu kısımda, Bölüm 4.1.2'de verilen teorik alt yapı kullanarak sistemin saatlik termodinamik analizi yılın en sıcak ayları olan Haziran, Temmuz ve Ağustos için yapılmıştır. Analizlerde kullanılan veriler GİMSA'da kullanılan BED sisteminden alınmıştır. Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik ortalama sıcaklık değerleri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Bu aylar için saatlik ve günlük ortalama enerji ve ekserji verimleri belirlenmiştir. Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için BED tankı için saat, periyot, giriş (T_{giris}) ve çıkış (T_{cikis}) sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları (T_{dis}), hacim oranı (F), enerji verimi (η) ve ekserji verimi (ψ) değerleri Tablo 5.4, 5.5 ve 5.6'de sırasıyla verilmiştir. Tablo 5.4, 5.5 ve 5.6'den görüldüğü üzere, enerji verimi değeri incelenen en sıcak 3 ay süresince ve günün saatlerinde önemli bir değişiklik göstermemiştir. Tüm durumlarda BED sisteminin enerji verimi %95 ile %98 arasında değişmiştir. Enerji analizi sonuçlarından görüldüğü üzere, sistem enerji açısından ideale yakın davranış göstermektedir. Enerji analizinin sonucunda sistem mükemmel yakın davranış göstermektedir ve iyileştirme yapılacak bir yer ya da proses yok gibi görünmektedir. Ancak, enerji analizinin sadece sistemin sınırlarından geçen iş ve enerji etkileşimlerini dikkate aldığı unutulmamalıdır. Enerji analizi sistem içerisindeki tersinmezlikleri hesaba katmamaktadır. Tablo 5.4, 5.5 ve 5.6'deki ekserji verimi ifadelerine bakılacak olursa, enerji verimi ifadelerinin aksine, aylara ve saatlere göre ciddi değişim göstermektedir. Ekserji değeri gün ve aylar içerisinde %12 ile %96 arasında değişim göstermiştir. Ekserji verimi değerlerinden görüldüğü üzere, sistemde bazı durumlarda ciddi ekserji yıkımı söz konusudur. Bu sebepten dolayı sistemde iyileştirme yapılabilecek ciddi bir potansiyel görünmektedir. Tüm durumlar incelendiği zaman en yüksek ekserji veriminin bekleme durumunda olduğu görülmektedir. Bekleme durumunda

BED tankının tek etkileşimi çevreden aldığı ısı kazancı olduğundan ekserji verimi yüksek çıkmaktadır. En düşük ekserji verimi ise enerji boşaltma periyodunda görülmektedir. Bu düşük ekserji verimine çevre sıcaklığı neden olmaktadır. Çünkü enerji boşaltma periyodunda tankın iç kısmının ortalama sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark en düşüktür. Çevre sıcaklığı ile sistem sıcaklığı arasındaki fark düştükçe sistemin ekserji verimi de düşmektedir.

Yılın en sıcak ayları için ortalama enerji ve ekserji verimleri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{\text{Toplam boşaltılan enerji}}{\text{Toplam yüklenen enerji}} \quad (5.11)$$

$$\psi = \frac{\text{Toplam boşaltılan ekserji}}{\text{Toplam yüklenen ekserji}} \quad (5.12)$$

Tablo 5.4’de Haziran ayı için saatlik ortalama dış ortam sıcaklığı, BED tankının giriş ve çıkışındaki sıcaklıklar, hacim oranı, enerji ve ekserji verimleri görülmektedir. Haziran ayı için gün içerisinde toplam yüklenen ve boşaltılan enerji miktarları dikkate alınarak sistemin ortalama enerji verimi $\eta = 0.95$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Haziran ayı için ortalama ekserji verimi ise $\psi = 0.85$ olarak hesaplanmıştır. Enerji ve ekserji verimlerinin saatlik değişimleri Tablo 5.4’de görülmektedir. Daha öncede belirttiği üzere, en düşük ekserji verimi enerji boşaltma periyodunda ve en yüksek ekserji verimi ise bekleme periyodunda görülmektedir. Ekserji veriminin gün içerisinde değişimi üzerindeki en büyük etkiye tank içerisindeki ortalama sıcaklık ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark sahiptir. Enerji ve ekserji verimlerinin yanında sıvı hacminin katı hacmine oranına bakılacak olursa, Haziran ayı ortalamasında enerji yükleme sırasında kapsüllerin tamamı katılaşmış, bekleme periyodunda neredeyse değişmemiş ve enerji boşaltma periyodunda ise neredeyse tamamı erimiştir.

BED sisteminin Temmuz ayı için saatlik ortalama sıcaklık, hacim oranı, enerji ve ekserji verimi değerleri Tablo 5.5’de verilmiştir. Temmuz ayı içerisindeki saatlik enerji ve ekserji verimlerinin değişimleri Haziran ayı ile aynıdır. Enerji verimliliği değeri gün içerisinde ciddi bir değişim göstermezken, en yüksek ekserji verimi

Tablo 5.4. Haziran ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri

Saat	Proses	Soğutma Yükü (kW)	T_{cevre} (°C)	T_{giris} (°C)	T_{cikis} (°C)	F	η	ψ
01:00	Yükleme	0	19.60	-5.60	-3.90	0.49	95.56	86.01
02:00	Yükleme	0	19.20	-5.60	-3.70	0.61	96.02	84.27
03:00	Yükleme	0	18.80	-5.50	-3.10	0.73	96.85	80.14
04:00	Yükleme	0	18.50	-5.00	-3.50	0.86	94.96	86.68
05:00	Yükleme	0	18.60	-4.60	-3.10	0.91	94.96	86.52
06:00	Yükleme	0	19.10	-4.40	-2.80	0.98	95.28	85.87
07:00	Bekleme	0	19.80	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
08:00	Bekleme	0	20.50	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
09:00	Bekleme	16	21.30	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
10:00	Bekleme	128	23.60	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
11:00	Bekleme	329	25.40	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
12:00	Bekleme	485	26.70	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
13:00	Bekleme	512	26.60	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
14:00	Bekleme	624	28.10	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
15:00	Bekleme	742	29.10	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
16:00	Bekleme	791	29.80	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
17:00	Bekleme	830	29.40	0.00	0.00	0.98	97.48	95.85
18:00	Boşaltma	831	27.40	7.50	4.30	0.77	96.78	26.76
19:00	Boşaltma	847	26.20	8.40	4.50	0.54	97.15	33.76
20:00	Boşaltma	678	25.20	8.90	5.30	0.34	97.78	33.94
21:00	Boşaltma	650	24.30	9.10	5.90	0.15	96.55	32.77
22:00	Boşaltma	498	23.30	7.60	5.10	0.01	96.00	26.54
23:00	Yükleme	372	21.50	-3.00	-2.40	0.04	97.60	80.16
00:00	Yükleme	0	20.30	-4.40	-3.60	0.29	96.89	79.13

bekleme periyodunda, en düşük ekserji verimi ise enerji boşaltma periyodunda görülmüştür. Enerji verimi tüm saatlerde %95 ile %98 arasında değişim göstermiştir. Ekserji verimi enerji yükleme periyodunda %88 ile %94 arasında değişim gösterirken, enerji boşaltma durumunda ise %12 ile %21 arasında değişmiştir. En düşük ekserji verimi %12 ile enerji boşaltma periyodunun son saatinde görülmüştür. Temmuz ayı için ortalama enerji ve ekserji verimleri Denklem 5.11 ve 5.12 kullanılarak $\eta = 0.95$ ve $\psi = 0.87$ olarak hesaplanmıştır. Temmuz ayı için sıvı hacminin, katı hacmine oranı incelendiği zaman, erime sırasında üretilen buzların tamamının eritildiği ancak enerji yükleme sırasında tamamen katılaşma olmadığı görülmüştür. BED tankındaki kapsüllerin %93'ü katılaşmıştır. Haziran ve Temmuz ayları arasındaki katılaşma

Tablo 5.5. Temmuz ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri

Saat	Proses	Soğutma Yükü (kW)	T_{cevre} (°C)	T_{giri} (°C)	T_{cikis} (°C)	F	η	ψ
01:00	Yükleme	0	23.20	-6.60	-5.10	0.45	94.96	89.34
02:00	Yükleme	0	22.50	-6.30	-4.70	0.53	95.28	88.32
03:00	Yükleme	0	21.90	-6.10	-4.60	0.62	94.96	88.70
04:00	Yükleme	0	21.40	-5.70	-4.90	0.73	90.56	93.43
05:00	Yükleme	0	20.70	-5.50	-4.50	0.84	92.45	91.70
06:00	Yükleme	0	20.40	-5.30	-4.20	0.93	93.13	90.78
07:00	Bekleme	0	22.00	0.00	0.00	0.93	97.48	95.85
08:00	Bekleme	0	26.60	0.00	0.00	0.93	97.48	95.85
09:00	Bekleme	16	27.40	0.00	0.00	0.93	97.48	95.85
10:00	Bekleme	128	27.10	0.00	0.00	0.92	97.48	95.85
11:00	Bekleme	329	27.90	0.00	0.00	0.92	97.48	95.85
12:00	Bekleme	485	29.10	0.00	0.00	0.92	97.48	95.85
13:00	Bekleme	512	30.20	0.00	0.00	0.92	97.48	95.85
14:00	Bekleme	624	30.70	0.00	0.00	0.92	97.48	95.85
15:00	Bekleme	742	31.20	0.00	0.00	0.91	97.48	95.85
16:00	Bekleme	791	31.60	0.00	0.00	0.91	97.48	95.85
17:00	Bekleme	830	31.10	0.00	0.00	0.91	97.48	95.85
18:00	Boşaltma	831	31.60	8.90	6.80	0.21	96.77	17.02
19:00	Boşaltma	847	31.30	9.70	7.80	0.40	97.14	16.31
20:00	Boşaltma	678	29.80	10.00	8.00	0.60	97.78	18.34
21:00	Boşaltma	650	27.40	10.20	8.10	0.81	96.55	21.46
22:00	Boşaltma	498	26.60	9.00	7.90	0.91	96.00	12.17
23:00	Yükleme	372	26.20	-5.30	-4.20	0.02	93.13	93.38
00:00	Yükleme	0	25.60	-5.50	-4.50	0.30	92.45	93.94

oranlarındaki farkın en büyük nedeni dış ortam sıcaklığıdır. Çünkü Temmuz ayındaki dış ortam sıcaklığı ve Haziran ayındaki dış ortam sıcaklığına göre çok daha yüksektir.

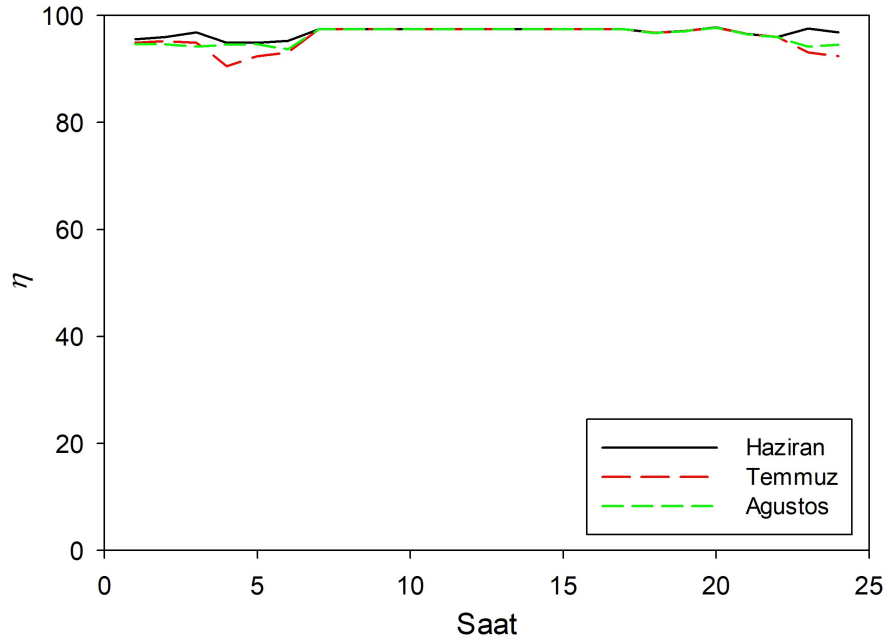
BED sisteminin Ağustos ayı değerleri Tablo 5.6'de görülmektedir. Enerji verimi diğer aylarda olduğu gibi tüm saatlerde hemen hemen aynı ve %94 ile % 97 arasında arasında değişmiştir. Ancak ekserji değerine bakıldığı zaman, ekserji verimleri %96 ile %16 arasında değişim göstermiştir. Saatlik enerji ve ekserji verimlerinin periyotlara göre değişimi Haziran ve Temmuz ayları ile aynıdır. En yüksek ekserji verimi bekleme periyodunda, en düşük ekserji verimi ise enerji boşaltma periyodunda görülmüştür. Ağustos ayı içi sıvı hacmin katı hacme oranına bakılacak olursa,

Tablo 5.6. Ağustos ayı için saatlik ortalama sıcaklıklar, buzlanma oranı, enerji ve ekserji verimleri

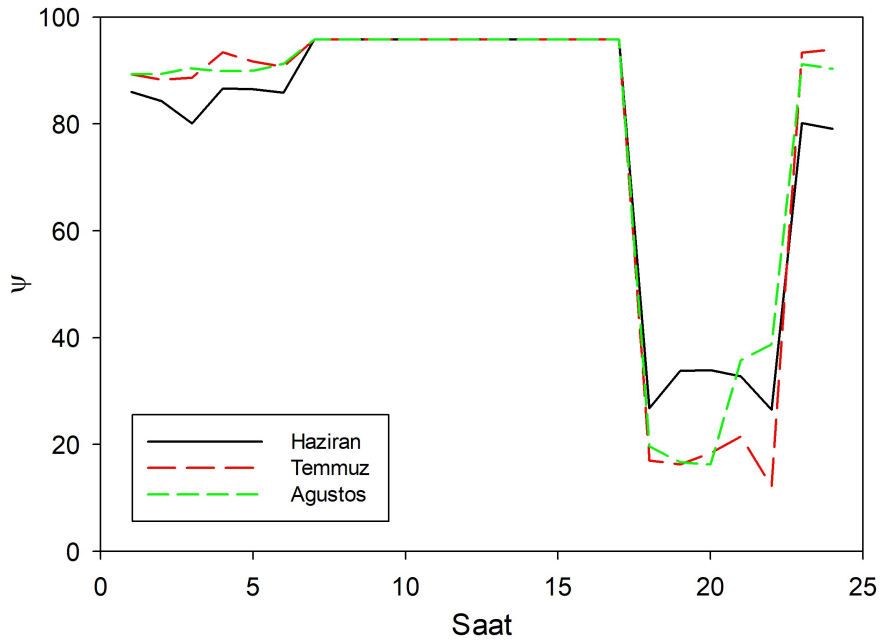
Saat	Proses	Soğutma Yükü (kW)	T_{cevre} (°C)	T_{giri} (°C)	T_{cikis} (°C)	F	η	ψ
00:00 - 01:00	Yükleme	0	25.6	-2.1	-0.7	0.33	94.61	89.30
01:00 - 02:00	Yükleme	0	25.1	-2.9	-1.5	0.45	94.61	89.40
02:00 - 03:00	Yükleme	0	25.1	-4.1	-2.8	0.56	94.19	90.48
03:00 - 04:00	Yükleme	0	24.9	-4.5	-3.1	0.66	94.61	89.88
04:00 - 05:00	Yükleme	0	24.3	-5.5	-4.1	0.77	94.60	90.00
05:00 - 06:00	Yükleme	0	24	-5.6	-4.4	0.88	93.70	91.27
06:00 - 07:00	Bekleme	0	24.6	0	0	0.88	97.48	95.85
07:00 - 08:00	Bekleme	0	25.3	0	0	0.88	97.48	95.85
08:00 - 09:00	Bekleme	16	26.9	0	0	0.88	97.48	95.85
09:00 - 10:00	Bekleme	128	28.8	0	0	0.88	97.48	95.85
10:00 - 11:00	Bekleme	329	30.5	0	0	0.88	97.48	95.85
11:00 - 12:00	Bekleme	485	31.1	0	0	0.88	97.48	95.85
12:00 - 13:00	Bekleme	512	32.5	0	0	0.88	97.48	95.85
13:00 - 14:00	Bekleme	624	33.4	0	0	0.88	97.48	95.85
14:00 - 15:00	Bekleme	742	33.8	0	0	0.88	97.48	95.85
15:00 - 16:00	Bekleme	791	34.4	0	0	0.88	97.48	95.85
16:00 - 17:00	Bekleme	830	33.6	0	0	0.88	97.48	95.85
17:00 - 18:00	Boşaltma	831	32.1	14.8	12.9	0.71	96.77	19.67
18:00 - 19:00	Boşaltma	847	29.2	14.7	13.4	0.61	97.14	16.64
19:00 - 20:00	Boşaltma	678	28.4	14.6	13.4	0.51	97.78	16.24
20:00 - 21:00	Boşaltma	650	26.7	14.5	11.6	0.28	96.54	35.76
21:00 - 22:00	Boşaltma	498	26.4	14.4	11.2	0.02	95.99	38.73
22:00 - 23:00	Yükleme	372	26.2	-1.8	-0.5	0.02	94.19	91.19
23:00 - 00:00	Yükleme	0	25.5	-2.1	-0.7	0.23	94.61	90.36

katılaşmanın Haziran ve Temmuz aylarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma dış ortam sıcaklığı neden olmaktadır. Haziran ayından başlayarak Temmuz ve Ağustos aylarında dış ortam sıcaklığı sürekli artmıştır. Bu yüzden üretilen buzların tamamı erirken, katılaşma tamamen gerçekleşmemiştir.

BED sisteminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için enerji veriminin, ekserji veriminin ve sıvı hacmin katı hacmine oranının saatlik değişimleri Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'de sırasıyla görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü ve daha öncede açıklandığı üzere, enerji verimi aylara ve saatlere göre önemli bir değişim göstermemiştir. Şekil 5.1'den görüldüğü üzere, sistem enerji verimliliği yönünden ideale yakın bir mertebe çalışmaktadır. Ancak enerji analizi sistemdeki tersinmezlikleri içermemektedir. Bu

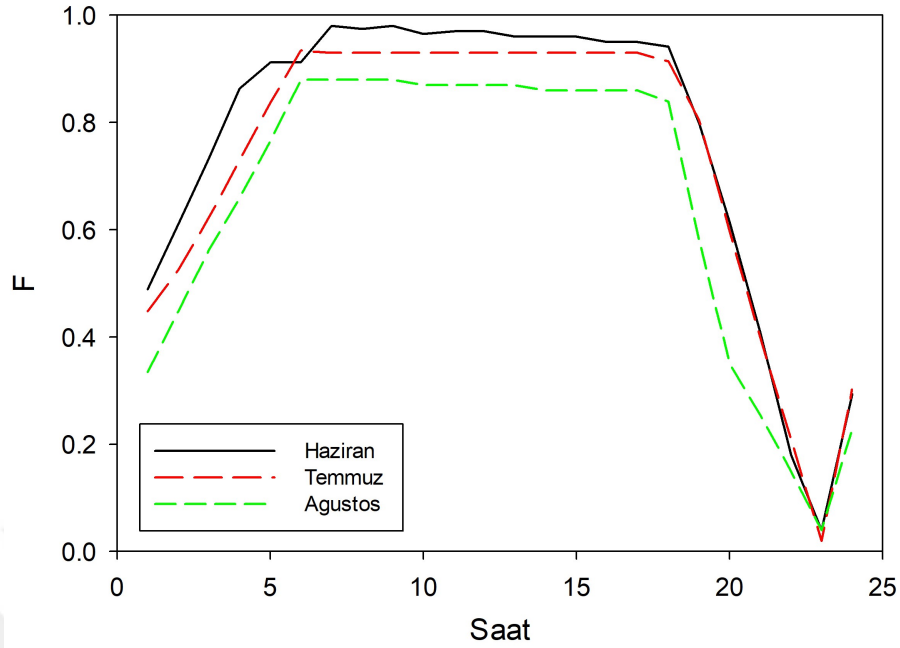


Şekil 5.1. BED tankının enerji veriminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değişimi



Şekil 5.2. BED tankının ekserji veriminin Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değişimi

kapsamda Şekil 5.2'den görüldüğü üzere, aylara ve saatlere göre ekserji yıkımı ve ekserji verimi ciddi miktarda değişim göstermektedir. En yüksek verimi bekleme saatlerinde, en düşük ekserji verimi ise enerji boşaltma saatlerinde görülmüştür. Enerji yükleme ile enerji boşaltma periyotlarındaki ekserji verimi farklı çevre sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Sıvı hacmin katı hacmine oranına bakıldığında zaman



Şekil 5.3. BED tankı içerisinde sıvı hacminin katı hacmine oranının Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için saatlik değişimi

(Şekil 5.3), enerji boşaltma periyodunda buzların tamamı erimiştir. Haziran ayından Temmuz ve Ağustos aylarına doğru katılaşma oranı gittikçe azalmıştır. Bu durum üzerindeki en büyük etki dış ortam sıcaklığıdır. Burada elde edilen sonuçlar, Rosen ve arkadaşlarının [18] ve Acar ve Dinçer'in [20] çalışmalarından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

5.1.2. Makro Seviyede Isı Geçişi Analizi Sonuçları

BED tankı içerisindeki sıcaklık dağılımı, sistemin ısıl performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu yüzden BED tankı içerisindeki sıcaklık dağılımı bilinmesi BED tankının ve sistemin performansını iyileştirmek için önem arz etmektedir. Ayrıca BED tankı için önemli tasarım parametrelerinin etkisini parametrik olarak araştırmak için önemli bir araçtır. Kısım 4.1.6'de vurgulandığı üzere, GİMSA'da kurulu olan BED sistemindeki tank içerisinde sıcaklık ölçümü almak mümkün olmamıştır. Ancak tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasını irdelemek için Kısım 4.1.6'de verilen teorik alt yapı kullanılmıştır. BED tankı gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Bu kapsamda tank içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek amacıyla gözenekli ortamlar için enerji denklemi çözülmüştür. Gözenekli ortamlar için enerji denklemi (Denklem 4.32) iki boyutlu ve bir boyutlu olarak, Kısım 4.1.6

verilen Denklem 4.33, 4.34 ve 4.35 sınır şartları kullanılarak çözülmüştür. Enerji denkleminin çözümünü kolaylaştırmak için tank içerisindeki radyal yöndeki sıcaklık değişimi bilmek ya da kabul etmek gerekmektedir. Bu çalışmada tank içerisinde radyal yöndeki sıcaklık değişiminin 2 farklı olduğu durum ele alınmıştır (Şekil 4.5). Radyal yöndeki sıcaklık dağılımı kabulü ile 2. mertebeden kısmi diferansiyel denklem olan enerji denklemi, adi diferansiyel denklem haline gelir. Böylece enerji denklemi çok daha kolay bir şekilde çözülmüştür.

Silindirik koordinatlarda iki boyutlu enerji denkleminin, radyal yöndeki sıcaklığın lineer olarak değiştiği kabul edilerek çözüldüğü zaman aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$T_c(z) = c_1 e^{\lambda_1 z} + c_2 e^{\lambda_2 z} + c_3 \quad (5.13)$$

Bu denklemdeki c_1, c_2, c_3, λ_1 ve λ_2 ifadeleri denklemin çözümü sırasında ortaya çıkan sabitlerdir. Bu sabitler ve denklem sırasında çözümü kolaylaştırmak için yapılan dönüşümler Ekler kısmında verilmiştir.

Silindirik koordinatlarda iki boyutlu enerji denkleminin, radyal yöndeki sıcaklığın parabolik olarak değiştiği kabul edilerek çözülmesi durumunda aşağıdaki ifade edilir.

$$T_c(z) = c_4 e^{\lambda_3 z} + c_5 e^{\lambda_4 z} + c_6 \quad (5.14)$$

Bu ifadedeki c_4, c_5, c_6, λ_3 ve λ_4 ifadeleri denklemin çözümü sırasında ortaya çıkan sabitlerdir. Denklem 6.1 ve Denklem 5.14 ile BED tankı içerisindeki sıcaklık dağılımı iki boyutlu olarak elde edilmiştir. Bu ifadelerdeki sabitler ve çözüm içerisinde çözümü kolaylaştırmak için yapılan dönüşümler Ekler kısmında verilmiştir.

Ekler kısmında verilen ifadeler Denklem 6.1 ve 5.14 yerine yazıldığı zaman, tankın merkezindeki sıcaklığın değişimi ($T_c(r, z)$) elde edilmiş olur. Ancak Ekler kısmında verilen ifadelerden görüldüğü üzere iki boyutlu analitik çözüm hem lineer sıcaklık değişimi kabulü durumunda hem de parabolik sıcaklık değişimi kabulü durumunda oldukça karmaşıktır. Bu yüzden Denklem 4.32'nin sağ tarafındaki ikinci kısım ihmal edilerek enerji denklemi bir boyutlu hale getirilip daha basit forma dönüştürülebilir.

Silindirik koordinatlarda bir boyutlu, radyal yöndeki sıcaklığın lineer değiştiği kabul

edilerek enerji denkleminin çözülmesi ile tank merkezideki sıcaklığın tank tabanından olan mesafe ile değişimi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T_c(z) = (c_7 e^{\lambda_5 z} - c_7 + T_g) e^{-\lambda_6 z} \quad (5.15)$$

Yukarıdaki denklemde olduğu gibi bu denklemde de $c_7, \lambda_5, \lambda_6$ ifadeleri denklem çözümü sırasında ortaya çıkan sabitlerdir. T_g ise ITA'nın tanka giriş sıcaklığıdır. Denklem çözümü sırasında ortaya çıkan sabitler Ekler kısmında verilmiştir.

Silindirik koordinatlarda bir boyutlu, radyal yöndeki sıcaklığın parabolik değiştiği kabul edilerek enerji denkleminin çözülmesi ile aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

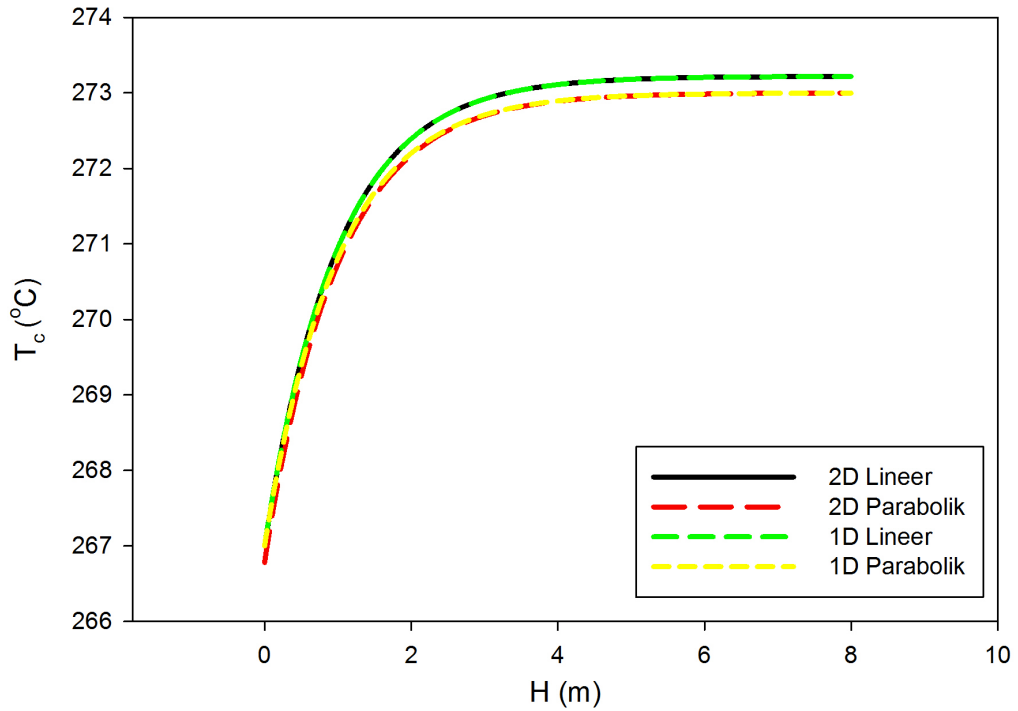
$$T_c(z) = (c_8 e^{\lambda_7 z} - c_8 + T_g) e^{-\lambda_8 z} \quad (5.16)$$

Bu ifadedeki sabitler Ekler kısmında verilmiştir. Ayrıca denklemlerin çözümünde gerekli olan parametrelerden tankın fiziksel uzunlukları da Bölüm 3'de açıklanmıştır. Tankın iç kısmı ile dış ortam arasındaki ısı direnç değeri önceki bölümlerde hesaplandığı üzere $R_T = 3.32 \text{ m}^2 \text{ K/kW}$ olarak alınmıştır. ITA'nın tank içerisine giriş sıcaklığı $T_g = -6^\circ\text{C}$ ve debisi ise $130 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak alınmıştır. ITA'nın fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi ihmal edilmiştir. ITA'nın fiziksel özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Ayrıca tank içerisinde 85,000 adet buz kapsülü olduğu dikkate alınarak, $\epsilon = 0.60$ olarak hesaplanmıştır.

Denklem 6.1, 5.14, 5.15 ve 5.16'de Ekler kısmında verilen sabitler yerine yazılarak ve yukarıda verilen fiziksel özellikler kullanarak tank içerisindeki sıcaklık değişimi 4 farklı durum için elde edilmiştir. Şekil 5.4'de bu dört farklı durum için tank merkezindeki sıcaklığın tankın yüksekliği ile değişimi görülmektedir. Şekil 5.4'den görüldüğü üzere, silindirik koordinatlarda bir boyutlu ve iki boyutlu ısı enerji denkleminin kullanımı arasında ciddi bir fark bulunmamaktadır. Buna ek olarak, radyal yöndeki sıcaklık değişiminin lineer ya da parabolik olarak kabul edilmesi durumları arasında da ciddi bir fark görülmemektedir.

Silindirik koordinatlarda, iki boyutlu ve bir boyutlu enerji denklemlerinin çözümleri göz önünde bulundurulduğu zaman iki boyutlu denklemin çözümü daha karmaşıktır ve zordur. İki boyutlu ve bir boyutlu denklemlerin verdikleri çözümlerin arasında

önemli bir fark bulunmadığından, buz depolama tanklarının ısıl modellemelerinde gözenekli ortamlar için silindirik koordinatlarda bir boyutlu enerji denkleminin kullanılması daha uygundur. Bu tez çalışmasında gözenekli ortamlar için enerji denklemi çözümünden elde edilen sonuçlar, MacPhee ve Dinçer [22] ve İsmail ve arkadaşlarının [29] yapmış oldukları çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

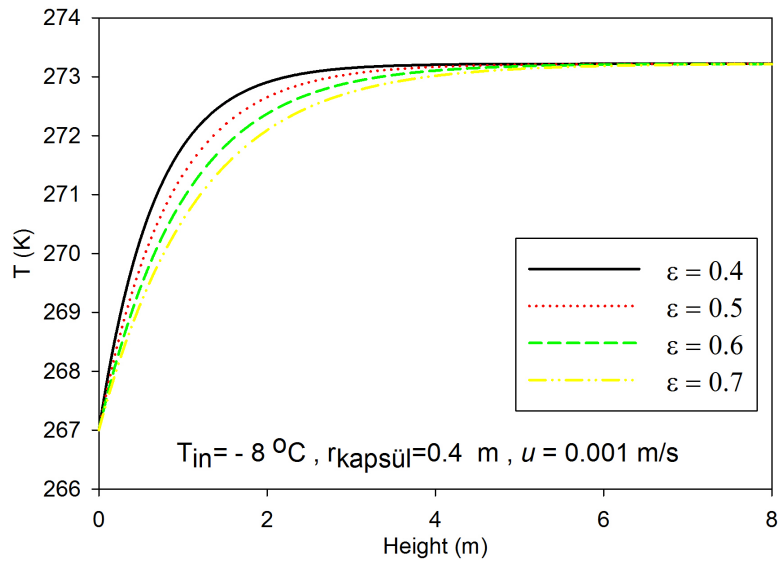


Şekil 5.4. Tank merkezindeki sıcaklığın tank tabanından tankın üst kısımlarına doğru değişimi

Tez çalışmasının bu kısmında, gözenekli ortamlar için silindirik koordinatlarda bir boyutlu enerji denklemi kullanarak sistemin parametrik analizi yapılmıştır. Tank içerisindeki gözenekliliğin, kapsül çapının, ITA giriş sıcaklığının ve ITA debisinin sistem üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Etkisi araştırılan bu parametrelerin termodinamik olarak etkileri MacPhee ve Dinçer'in [22] yapmış olduğu çalışmalarla irdelenmiş ve detaylı olarak araştırılmıştır. Bu tez çalışmasından elde edilmiş sonuçlar, MacPhee ve Dinçer'in [22] çalışmasından elde edilen termodinamik sonuçlar ile kıyaslanarak, beraber yorumlanmıştır.

Tankın gözenekliliğinin tank içerisindeki sıcaklık dağılımına etkisi Şekil 5.5'de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere azalan gözeneklilik ile tank içerisindeki

sıcaklık dağılımı (sıcaklık tabakalaşması) daha iyi olmaktadır. Artan sıcaklık tabakalaşmasının derecesi ile sistemin enerji ve ekserji verimleri de artmaktadır. Bu artışa azalan gözeneklilik ile türbülans etkilerinin artması neden olmaktadır. Çünkü azalan gözeneklilik ile buz kapsülleri arasındaki mesafede azalmaktadır. Azalan mesafe ile tank içerisinde buz kapsülleri arasındaki akan ITA için yerel Reynolds sayısı artmaktadır. Artan Reynolds sayısı ile Nusselt sayısı da artacaktır. Böylece tank içerisindeki ısı geçiş katsayısı da yükselecektir.



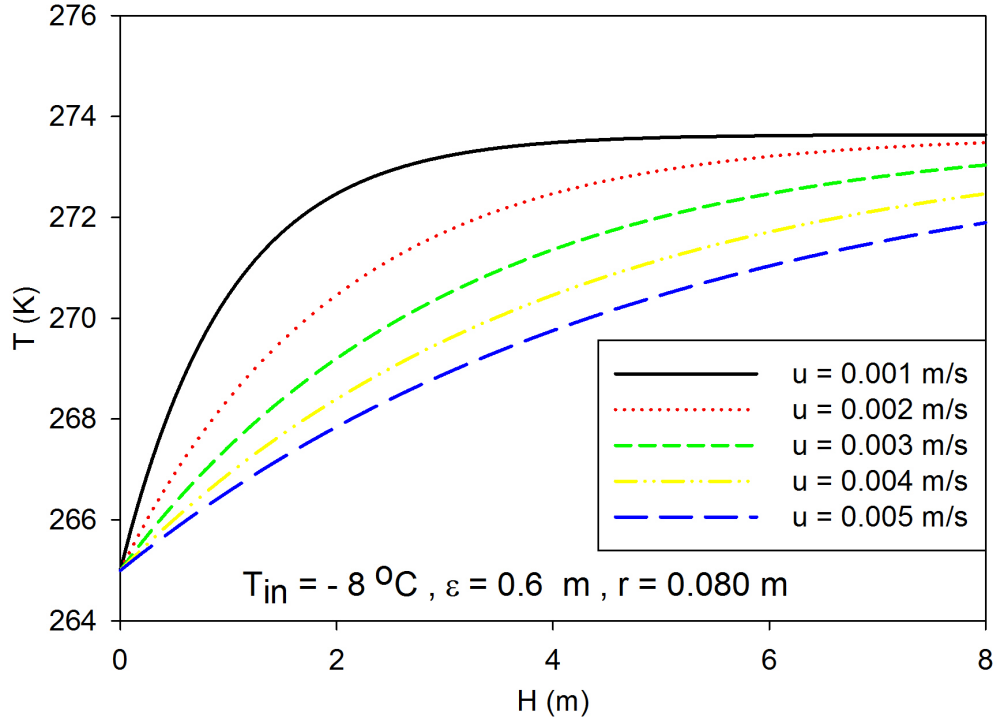
Şekil 5.5. Tank içerisindeki gözenekliliğin tankın merkezindeki sıcaklık dağılıma etkisi

Kapsül çapının tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisi Şekil 5.6'da verilmiştir. Artan kapsül çapı ile tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasının derecesi artmaktadır. Artan sıcaklık tabakalaşması ise sistemin termodinamik verimlerini de artmaktadır. Kapsül çapındaki artış, küre etrafındaki Reynold sayısının artmasına neden olmaktadır. Artan Reynolds sayısı, Nusselt sayısını ve ısı geçişini olumlu yönde etkilemektedir. Literatürde yapılmış olan çok sayıdaki çalışmalarda benzer sonuç bulunmuştur. Artan kapsül çapı ile hem sistemin enerji ve ekserji verimleri artmakta, hem de tamamen donma için gerekli olan süre azalmaktadır.

Şekil 5.6. Kapsül çapının tankın merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi

ITA'nın tank içerisine giriş sıcaklığının tankın sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisi Şekil 5.7'de görülmektedir. ITA giriş sıcaklığının düşmesi ile sistemin

Şekil 5.7. ITA giriş sıcaklığının tank merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 5.8. ITA giriş hızının tank merkezindeki sıcaklık dağılımına etkisi

ısı performansını olumlu yönde etkilenmektedir. Sistemin termodinamik verimleri artmakta ve tamamen donma süresi ise azalmaktadır. Çünkü azalan ITA giriş sıcaklığı ile kapsül içerisindeki FDM'ler arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. ITA ve FDM arasındaki sıcaklık gradyanının artmasıyla ısı geçişi hızı da artmaktadır.

ITA'nın tanka giriş hızının tankın merkezindeki sıcaklık tabakalaşması üzerindeki etkisi Şekil 5.8'de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere artan ITA hızı ile tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasının derecesi de artmaktadır. Sıcaklık tabakalaşması derecesinin artması sistemin ısı performansını olumlu yönde etkilemektedir. Artan hız ile tank içerisindeki türbülans etkileri artmaktadır. Artan Reynolds sayısı ve türbülans etkilerinden dolayı ısı geçişi de artmaktadır. Ancak artan debi daha yüksek pompa gücü gerektireceğinden bu durumda sistem tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır.

Yukarıda Şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8'de buz depolama tankının ısı performansı açısından önemli olan gözeneklilik, kapsül çapı, ITA giriş sıcaklığı ve ITA giriş hızının tank merkezindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi sırasıyla görülmektedir.

Bu şekillerden görüldüğü üzere sistemin ısı performansını en iyilemek için en doğru konfigürasyon belirlenmelidir.

5.2. Mikro Seviye Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

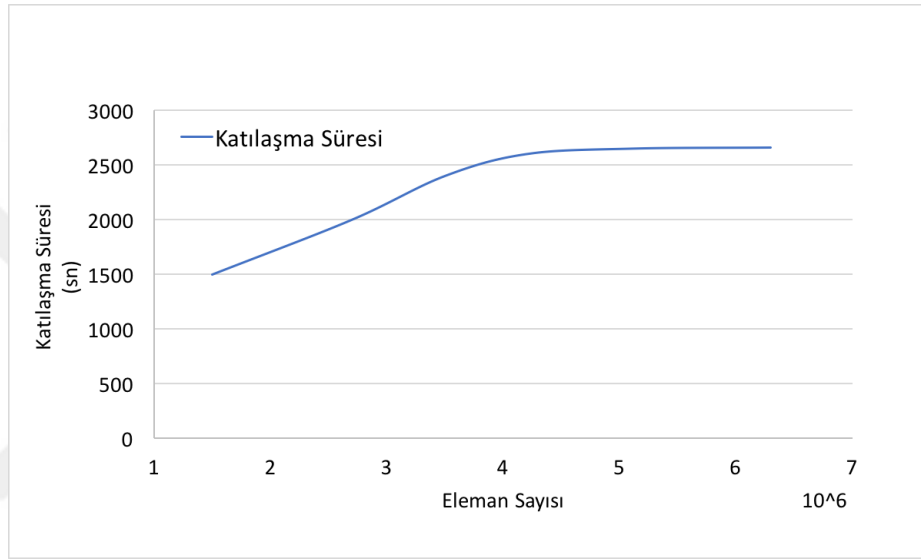
Bu bölümde, GİMSA’da bulunan BED sistemindeki buz kapsülünün ısı ve akışkan akımı davranışı ile alakalı sonuçlar verilmiştir. Bölüm 4.2’de detayları verilen sayısal model kullanılarak, sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözümler enerji yükleme periyodu için yapılmıştır. Sayısal çalışmalar kapsamında iki farklı kapsül modeli incelenmiştir. Bunlardan ilk GİMSA’da kullanılan CRYOGEL kapsül, ikincisi ise normal küre kapsüldür. CRYOGEL kapsülün normal küre kapsüle göre sağladığı iyileştirme belirlenmiştir. Herbir kapsül için tamamen donma süresi belirlenmiştir. Geliştirilen sayısal model ve çözümleme prosedürü ElGhnam ve arkadaşlarının [32] deneysel çalışması ile doğrulanmıştır.

5.2.1. Sayısal Modelin ve Çözüm Prosedürünün Doğrulanması

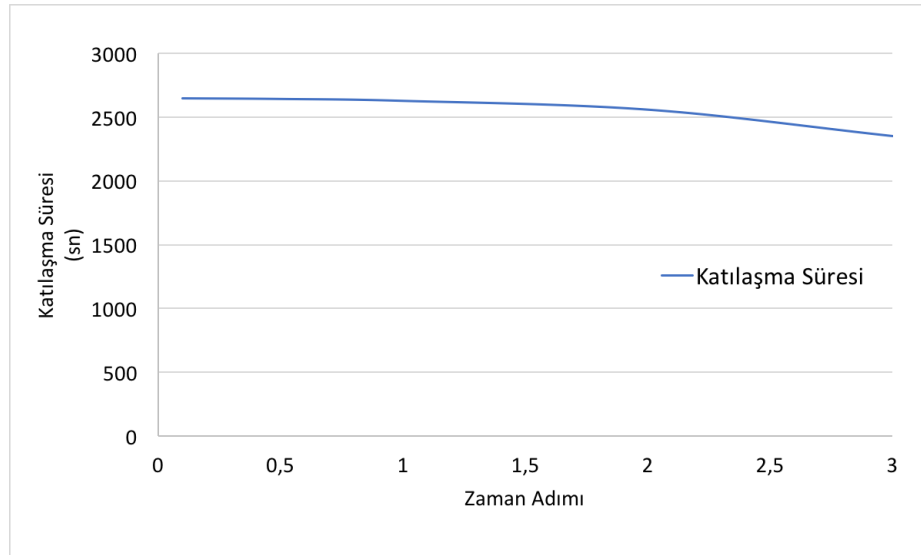
Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2 detayları verilen sayısal model ve çözümleme prosedürü kullanılarak Şekil 4.6’de görülen kontrol hacmi modellenmiş ve çözümlenmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ElGhnam ve arkadaşlarının [32] çalışması ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal modeli doğrulamak için iki farklı sayısal model oluşturulmuştur. Bunlar; kapsül içerisinde hava boşluğunun olduğu model ve kapsülün tamamının su dolu olduğu modeldir. Bölüm 4.2.1’de açıklandığı üzere, içerisinde hava boşluğu olan kapsül modelinin çözümleme süresi, içerişi tamamen su ile dolu olan kapsüle göre çok daha uzun sürmektedir. Geliştirilen sayısal modeli doğrulamak için her iki modelde çözümlenmiş ve aralarında önemli bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Sayısal çözümlemenin sonuçlarını eleman sayısından bağımsızlaştırmak için farklı sayıda eleman boyutu denenmiştir. Sayısal model oluşturulurken 1.5 milyon, 2.7 milyon, 3.5 milyon, 4.2 milyon, 5.1 milyon ve 6.3 milyon eleman sayısında çözümler yapılmıştır. Çözümler sırasında 4.2 milyon eleman sayısından sonra sonuçlarda kayda değer bir değişim olmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada, mesh boyutları kapsül için 2 mm, ITA için 4 mm ve temas yüzeyinde ise 1 mm olarak alınmıştır. Bu

durumda, küre kapsül için yaklaşık 4.2 milyon eleman ve CRYOGEL kapsül için ise 4.5 milyon eleman kullanılmıştır. Benzer şekilde sayısal çözümlmeleri zamana bağlı çözümün zaman adımından bağımsızlaştırmak için zaman adımı 3, 2, 1, 0.5 ve 0.1 s olarak denenmiştir. 0.5 s'den sonra sayılar analizlerin sonuçlarında önemli bir değişiklik olmadığından, zaman adımı 0.5 saniye olarak alınmıştır. Sayısal analiz sonuçlarının eleman sayısı ve zaman adımı ile değişimi Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'de verilmiştir.



Şekil 5.9. Grid bağımsızlığının gösterilmesi



Şekil 5.10. Grid bağımsızlığının gösterilmesi

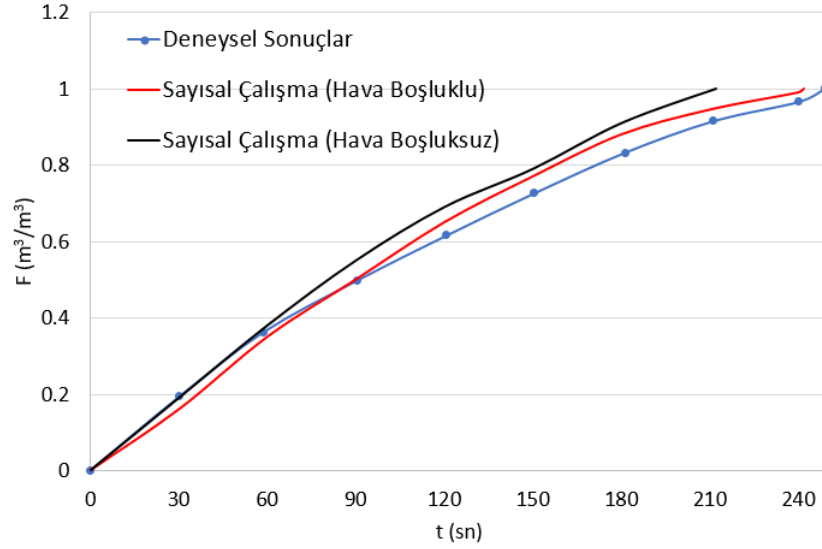
Sayısal çözümlmelerde türbülans etkilerini hesaplamak için $k-\epsilon$, $k-\epsilon RNG$, $k-\omega$, $k-kl-\omega$ ve $k-\omega SST$ modelleri denenmiştir. Yapılan çözümlmeler sonucunda $k-kl-\omega$ modeli ElGhnam ve arkadaşlarının çalışmasına en yakın sonucu vermiştir.

Ayrıca $k - kl - \omega$ akış hızının düşük olduğu ancak yüzey geometrisinden kaynaklı türbülans etkilerini hesaplamak için kullanılan bir modeldir. Gerçekleştirilen sayısal çalışmada Reynolds sayısı yaklaşık $Re = 150$ 'dir. Bu sebepten bu çalışmada $k - kl - \omega$ türbülans modeli kullanmak deneysel çalışmaya en yakın sonucu vermiştir. Ayrıca $k - kl - \omega$ türbülans modeline benzer şekilde $k - \omega$ SST modelinde aynı amaçlar için kullanılmaktadır. Ancak bu model $k - kl - \omega$ türbülans modeline göre daha uzun çözüm süresi gerektirmektedir.

Yukarıda açıklanan sayısal model ve prosedür kullanılarak ElGhnam ve arkadaşlarının çalışması modellenmiş ve çözümlenmiştir. Sayısal çalışmalar, içerisinde hava boşluğu olan kapsül ve tamamen su dolu olan kapsül için ayrı ayrı yapılmıştır. Yapılan sayısal çalışmanın sonucunda katı hacmin sıvı hacmine oranının (F) zaman ile değişimi Şekil 5.11'de görülmektedir. Şekil 5.11'dan görüldüğü üzere, içerisinde hava boşluğu olan model ElGhnam ve arkadaşlarının çalışması ile uyum içerisinde olup, sayısal çalışmada donma süresi deneysel çalışmaya göre %4 daha kısa sürmüştür. Bu durum üzerinde deneysel çalışmadaki ısı kayıplarının etkisi vardır. Ayrıca içerisinde hava boşluğu olmayan durum, deneysel çalışma ile kıyaslandığı zaman donma %16 daha kısa sürede gerçekleşmiştir. İçerisinde hava olmaması durumunda %20 daha fazla miktarda su bulunmaktadır. Fazla su miktarının buzlanma süresini arttırması gerekirken düşürmüştür. Bu durum üzerinde kapsülün tamamının su ile dolu olması, ısı genleşmelerin ihmal edilmesi ve ısı kayıpları ihmal edilmesinin etkisi vardır. Ayrıca bu duruma ek olarak suyun ısı iletim katsayısının havaya göre çok yüksek olması ve donmanın kapsülün her yerinden başlamasının da etkisi vardır. Şekil 5.11'den görüldüğü üzere, geliştirilen sayısal model buz kapsüllerini irdelemek için yeterlidir.

5.2.2. Sayısal Çözümlemelerden Elde Edilen Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında CRYOGEL ve normal küre kapsül için enerji yükleme (buz yapma) periyodunda çözümlemeler yapılmıştır. Çalışmada farklı ITA giriş hızı ve sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. ITA giriş hızları $V_g = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ve 0.05 m/s olarak alınmıştır. ITA giriş sıcaklıkları ise $T_g = 263, 265, 267, 269$ ve 271 K olarak alınmıştır. Başlangıçta kapsül içerisindeki suyun ve ITA'nın sıcaklığı

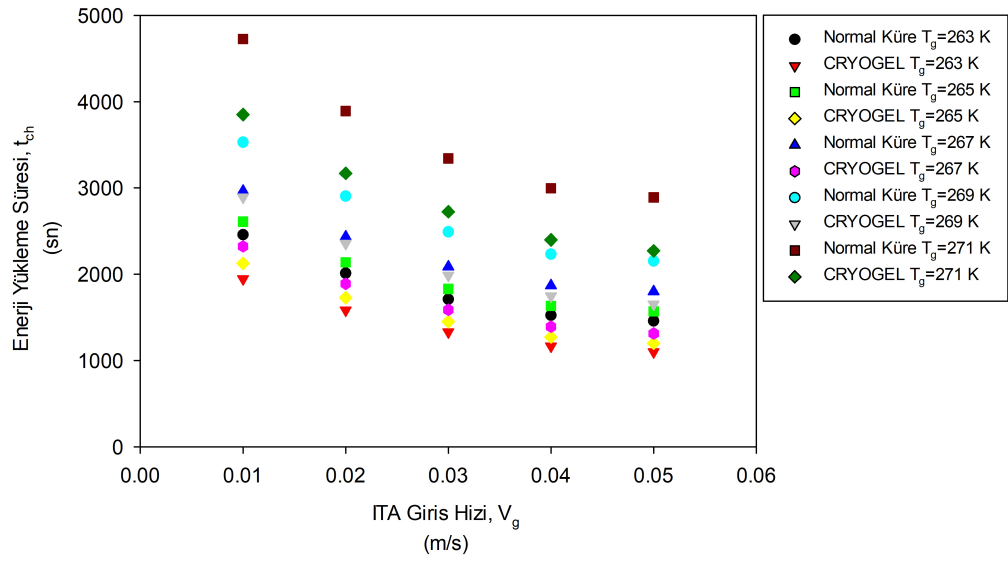


Şekil 5.11. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların, ElGhnam ve arkadaşlarının [32] çalışması ile karşılaştırılması

293 K olarak alınmıştır. Kapsül içerisindeki suyun 283 K sıcaklıktan tamamen katılaşmaya kadar sayısal analizler sürdürülmüştür. Böylece CRYOGEL kapsülün normal kapsüle göre katılma süresi performansı farkı ITA hızı ve sıcaklığı üzerinden karşılaştırılmıştır.

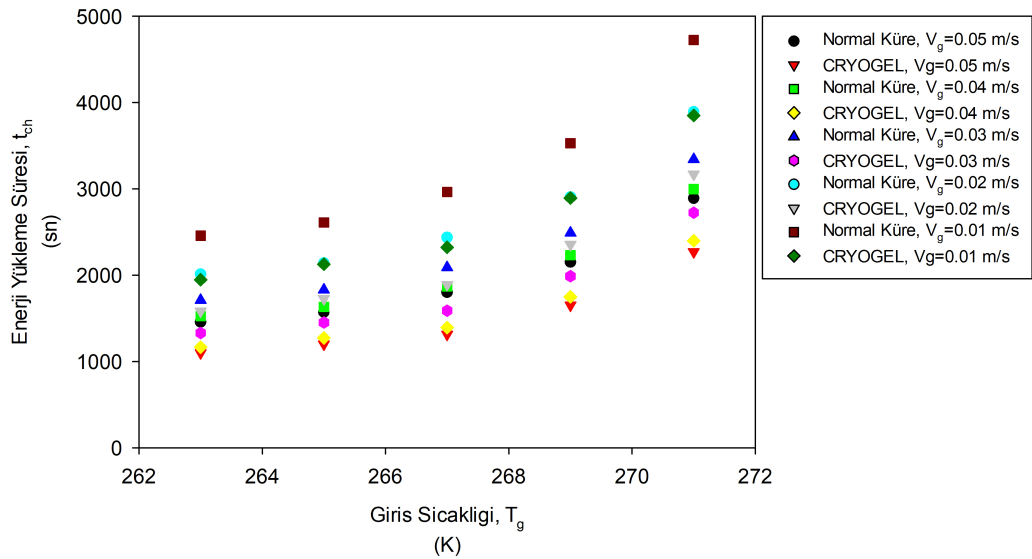
ITA giriş hızının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi Şekil 5.12’de görülmektedir. Şekil 5.12’den görüldüğü üzere artan ITA hızı ile enerji yükleme süresi düşmektedir. Ancak 0.04 m/s ’den sonra enerji yükleme süresinde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bu yüzden ITA giriş debisini 0.05 m/s ’den yüksek kullanmak sistemin ısı performansı ciddi seviyede arttırmayacaktır. Artan ITA debisi ile enerji yükleme süresinin kısılmasındaki en büyük etmen, artan ITA hızı ile türbülans etkilerinin artmasıdır. Artan türbülans etkileri ile kapsül etrafındaki ısı sınır tabaka daha kolay yırtılacaktır. Böylece küreden olan ısı geçişi hızı artacaktır. Ayrıca aynı hızda CRYOGEL kapsül ve normal küre kapsül karşılaştırıldığı zaman, tüm hızlarda CRYOGEL kapsül daha kısa enerji yükleme süresi sağlamıştır.

ITA giriş sıcaklığının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi Şekil 5.13’de verilmiştir. Şekil 5.13’den görüldüğü üzere, ITA giriş sıcaklığı azaldıkça tamamen katılma süresi de düşmektedir. Ancak 265 K ve 263 K giriş sıcaklıklarındaki tamamen katılma süresi arasındaki ciddi bir fark görülememektedir. Bu yüzden 263 K ’den daha düşük sıcaklıklarda katılma sağlamak katılma süresi çok fazla



Şekil 5.12. ITA giriş hızının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi

etkilemeyecektir. Sıcaklık düşmesi ile enerji yükleme süresinin kısılmasındaki en büyük etmen, kapsülün sıcaklığı ile ITA arasındaki sıcaklık farkının artmasıdır. Artan sıcaklık farkıyla ısı geçişinin hızı arttığından katılma süresi düşmüştür. Ayrıca CRYOGEL kapsül, normal küre kapsüle göre tüm giriş sıcaklıklarında daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 5.13. ITA giriş sıcaklığının enerji yükleme süresi üzerindeki etkisi

Enerji yükleme periyodu için yapılan sayısal analizlerden farklı ITA giriş hızları ve sıcaklıkları için elde edilen tamamen katılaşma süreleri ve birim zamanda depolanan enerji miktarları Tablo 5.7 – 5.11’de verilmiştir. Bu tablolardan, Şekil 5.12 ve 5.13’den görüldüğü üzere artan ITA debisi ve düşük ITA giriş sıcaklığı enerji yükleme süresini kısaltmaktadır. Ancak Şekil 5.12 ve 5.13’de vurgulandığı gibi belli bir hız ve sıcaklık değerinden sonra yapılacak değişiklikler sistemin performansı üzerinde önemli etkiye sahip değildir. Bu durum sistem tasarımında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere bir BED sisteminde enerji yükleme süresini düşürmek için ITA debisini yükseltme ya da ITA giriş sıcaklığı düşürme kullanılabilir. Ancak sistemin ilk yatırım maliyetleri göz önüne alındığı zaman, ITA giriş sıcaklığını düşürmek daha yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir. Çünkü daha düşük ITA sıcaklıkları için daha yüksek kapasiteli soğutma grupları, daha yüksek ITA debisi için ise daha yüksek pompa gücü gerekmektedir. Artan soğutma grubu kapasitesi ve pompa gücü ile sistemin ilk yatırım maliyeti artmaktadır. Soğutma gruplarının ilk yatırım maliyeti pompalara göre çok yüksektir. Bu yüzden bir BED sisteminde enerji yükleme süresini düşürmek için ITA debisini arttırmak daha mantıklı bir yaklaşım olacaktır.

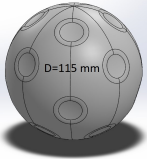
BED sistemlerinin performans analizlerinde enerji yükleme süresinin yanında birim zamanda depolanan enerji miktarda sık kullanılan parametrelerdendir. Buz kapsülü içerisinde depolanan enerji miktarının, enerji yükleme süresine oranı ile belirlenir. Depolanan enerji miktarı aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$Q_{depolanan} = mc_p(T_{başlangic} - T_{FDM} + mh_{ks}) \quad (5.17)$$

Burada m kapsül içerisindeki suyun kütlesini, c_p suyun özgül ısısını, $T_{başlangic}$ kapsülün ilk sıcaklığını, T_{FDM} suyun donma sıcaklığını ve h_{ks} ise suyun faz değişimi sırasındaki gizli enerjisini temsil etmektedir. Bu çalışmada kapsülün ve kapsül içerisindeki suyun başlangıç sıcaklığı 10°C ’dir. Kapsül etrafından soğuk ITA akarken kapsül içerisindeki su ilk olarak 10°C ’dan 0°C sıcaklığa düşer. Sıcaklığı 0°C sıcaklığa ulaştıktan sonra katılaşmaya başlar. Kapsül içerisindeki suyun tamamı katılaşmaya kadar enerji yükleme süresi devam eder. CRYOGEL kapsül ve normal küre kapsül hacimleri eşit olarak alındığından kapsüller içerisinde depolanan

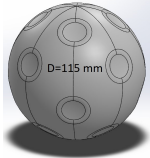
enerji miktarı eşit olacaktır. Ancak farklı çalışma şartlarında ve kapsül şekillerine göre enerji yükleme süreleri farklı olduğundan birim zamanda yüklenen enerji miktarları farklı olacaktır. Tablo 5.7 – 5.11’den görüldüğü üzere kısalan enerji yükleme süresi ile birim zamanda depolanan enerji miktarı artış göstermektedir. Birim zamanda depolanan enerji miktarının artması ile bir BED sistemi için iki önemli fayda sağlar. Bunlardan ilki; depolanması gereken enerjiyi daha kısa sürede yükleyerek soğutma grubu kullanım süresini azaltır. Böylece daha az enerji tüketilir. İkinci ise aynı süre içerisinde daha fazla enerjinin depolanmasıdır. CRYOGEL kapsülün enerji yükleme süresinde sağladığı iyileştirmeye ek olarak, CRYOGEL kapsülün kenarlarındaki çöküntüler kapsüllerin diğer kapsüller ile olan temas yüzeyini artırmaktadır. Böylece bir tank içerisine daha normal bir küreye göre daha fazla sayıda buz kapsülü sığdırılabilir ya da depolama kapasitesi için gerekli olan tank boyutu küçültülebilir. Böylece tank içerisindeki gözeneklilik artar. Gözenekliliğin artmasıyla 5.1.2’de belirtildiği üzere tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşması ve ısıl performansı iyileştirme gösterir.

Tablo 5.7. $T_{giris} = 263\ K$ ($-10\ ^\circ C$) olduğu durumda enerji yükleme süreleri

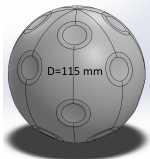
Kapsül Türü	$V_{in} = 0.01$	$V_{in} = 0.02$	$V_{in} = 0.03$	$V_{in} = 0.04$	$V_{in} = 0.05$
	2458 s 0.136 kW	2011 s 0.167 kW	1709 s 0.196 kW	1524 s 0.220 kW	1458 s 0.230 kW
	1947 s 0.172 kW	1582 s 0.212 kW	1329 s 0.252 kW	1165 s 0.288 kW	1099 s 0.305 kW

CRYOGEL kapsülün normal küre kapsüle daha kısa sürede donma sağlamasındaki iki etmen rol oynamaktadır. Bunlardan ilki CRYOGEL kapsülün normal kapsüle daha fazla yüzey alanına sahip olmasıdır. İkinci ise CRYOGEL kapsülün yüzey geometrisinden dolayı türbülans etkilerini arttırmasıdır. Şekil 5.15’de kontrol hacmi içerisindeki ITA’nın akım çizgileri görünmektedir. Şekil 5.15’deki akım çizgilerinden görüldüğü üzere, CRYOGEL bütün hızlarda normal küre kapsüle göre daha fazla türbülans etkilerine neden olmaktadır. Türbülans etkilerini daha

Tablo 5.8. $T_{giris} = 265\ K$ (-8°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri

Kapsül Türü	$V_{in} = 0.01$	$V_{in} = 0.02$	$V_{in} = 0.03$	$V_{in} = 0.04$	$V_{in} = 0.05$
	2610 s 0.128 kJ/s	2140 s 0.157 kW	1829 s 0.183 kW	1633 s 0.205 kW	1570 s 0.214 kW
	2126 s 0.158 kW	1727 s 0.194 kW	1451 s 0.231 kW	1272 s 0.264 kW	1200 s 0.279 kW

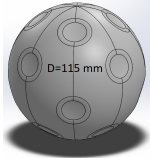
Tablo 5.9. $T_{giris} = 267\ K$ (-6°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri

Kapsül Türü	$V_{in} = 0.01$	$V_{in} = 0.02$	$V_{in} = 0.03$	$V_{in} = 0.04$	$V_{in} = 0.05$
	2965 s 0.113 kW	2436 s 0.138 kW	2088 s 0.161 kW	1868 s 0.179 kW	1799 s 0.186 kW
	2324 s 0.144 kW	1890 s 0.177 kW	1588 s 0.211 kW	1393 s 0.241 kW	1314 s 0.255 kW

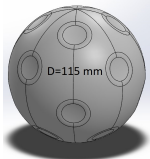
detaylı irdelemek için türbülans kinetik enerjisine bakmak gerekmektedir. Şekil ??’de ITA’daki türbülans kinetik enerjisinin dağılım diyagramı görülmektedir. Şekil ??’den görüldüğü üzere, CRYOGEL kapsülün türbülans kinetik enerji değeri daha normal küre kapsüle göre daha yüksek çıkmıştır. Hızın $V_g=0.01\ m/s$ olduğu durumda düz küre ve CRYOGEL kapsül için türbülans etkisi neredeyse yok denecek kadar düşüktür. Normal küre için $V_g=0.01\ m/s$ olduğu durumda, diyagramın farklı görünmesinin sebebi türbülans etkisinin düşük hızdan dolayı neredeyse yok denecek seviyede az olmasındandır. Şekil 5.16b’deki görüntünün diğerlerinden farklı olması ITA içesindeki dağılımı göstermesindendir. Diyagramın skalasına incelenecek olursa, türbülans etkilerinin çok dar aralıkta 0’a çok yakın olduğu görülmektedir.

Normal küre ve CRYOGEL kapsülleri için kapsül içerisindeki sıvı hacminin katı hacmine oranının (F) zamanla değişimi Şekil 5.14’de görülmektedir. Şekil 5.14’den görüldüğü üzere, artan hız ile tamamen katılaşma süresi kısalmaktadır. Ayrıca aynı

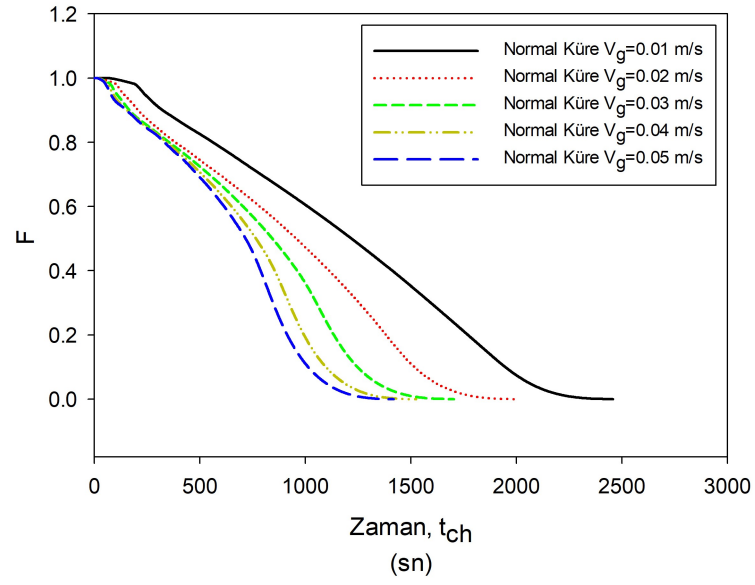
Tablo 5.10. $T_{giris} = 269 \text{ K}$ (-4°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri

Kapsül Türü	$V_{in} = 0.01$	$V_{in} = 0.02$	$V_{in} = 0.03$	$V_{in} = 0.04$	$V_{in} = 0.05$
	3520 s 0.095 kW	2905 s 0.115 kW	2493 s 0.134 kW	2233 s 0.150 kW	2154 s 0.156 kW
	2895 s 0.116 kW	2357 s 0.142 kW	1988 s 0.169 kW	1748 s 0.192 kW	1651 s 0.203 kW

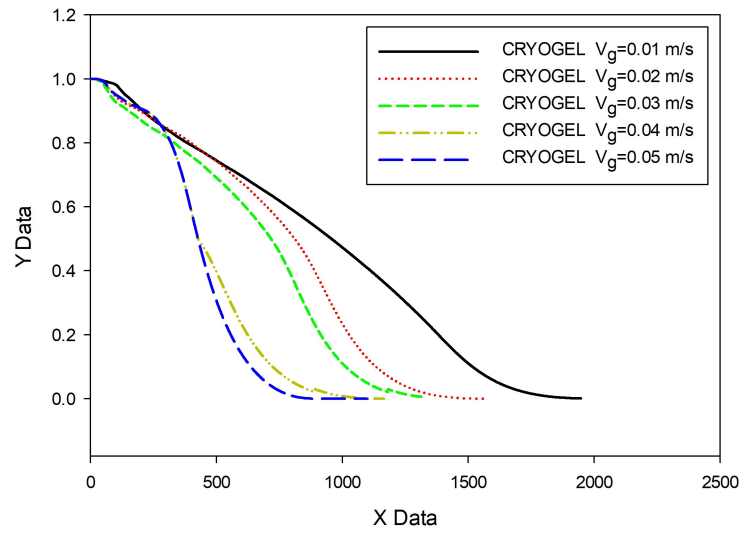
Tablo 5.11. $T_{giris} = 271 \text{ K}$ (-2°C) olduğu durumda enerji yükleme süreleri

Kapsül Türü	$V_{in} = 0.01$	$V_{in} = 0.02$	$V_{in} = 0.03$	$V_{in} = 0.04$	$V_{in} = 0.05$
	4727 s 0.071 kW	3892 s 0.086 kW	3344 s 0.100 kW	2998 s 0.112 kW	2892 s 0.116 kW
	3851 s 0.087 kW	3171 s 0.106 kW	2726 s 0.123 kW	2399 s 0.140 kW	2272 s 0.148 kW

hız değerlerinde normal küre kapsül ile CRYOGEL kapsül için F 'in değişimi hemen hemen aynı karakteristiğe sahiptir. CRYOGEL kapsül için $V_g = 0.04 \text{ m/s}$ ve $V_g = 0.05 \text{ m/s}$ hızlar için hemen hemen aynı katılma karakteristiğine sahiptir. Ancak $V_g = 0.05 \text{ m/s}$ hızda katılma daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

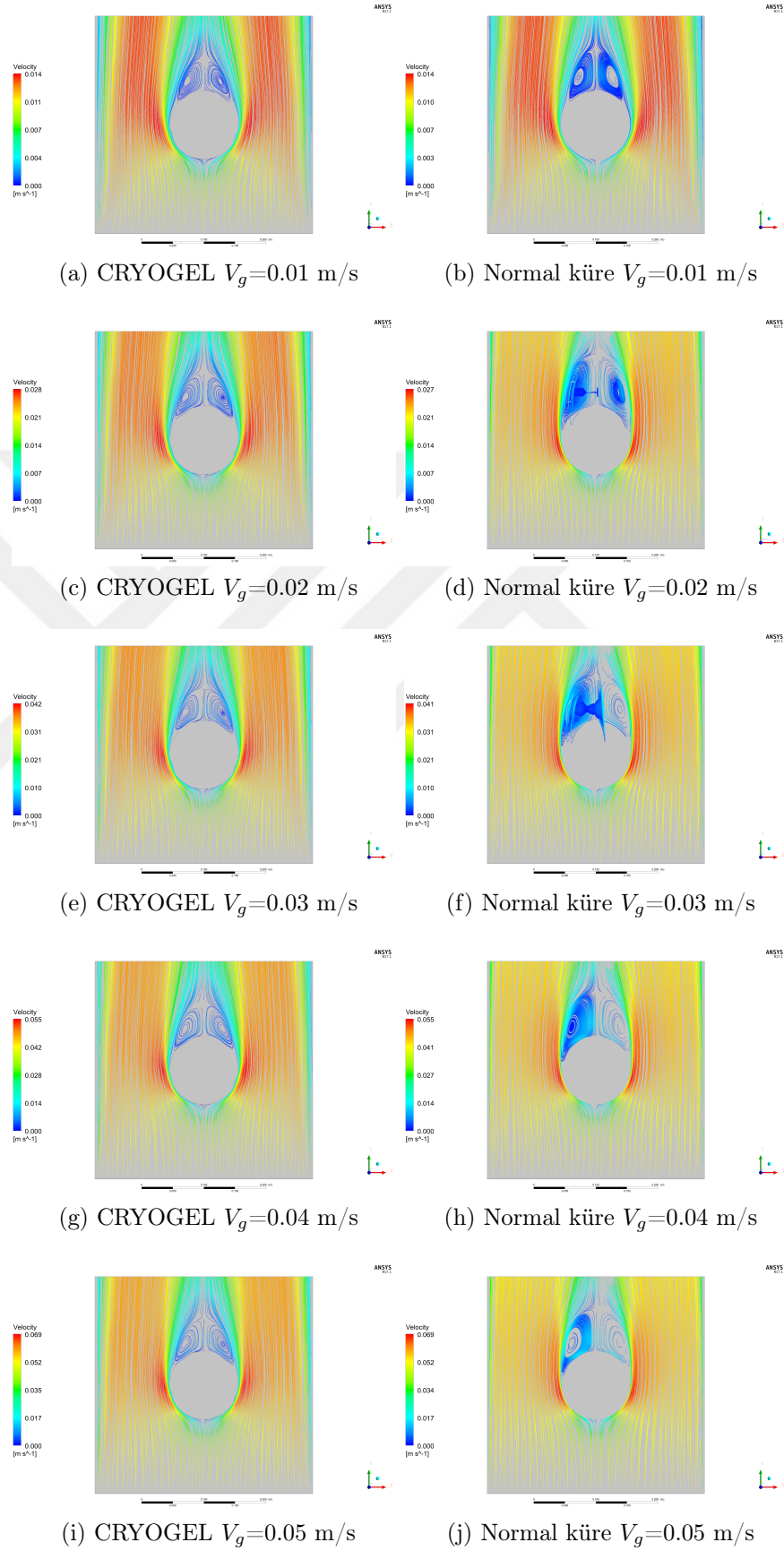


(a)

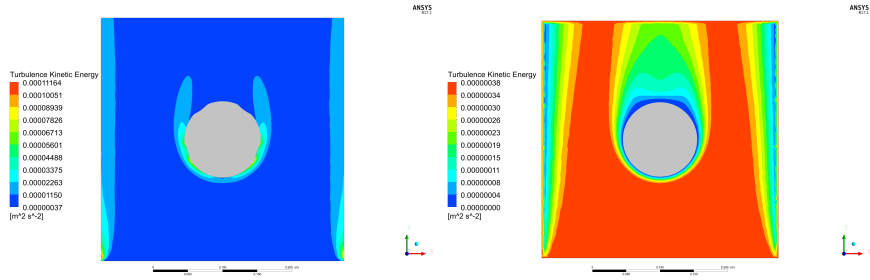
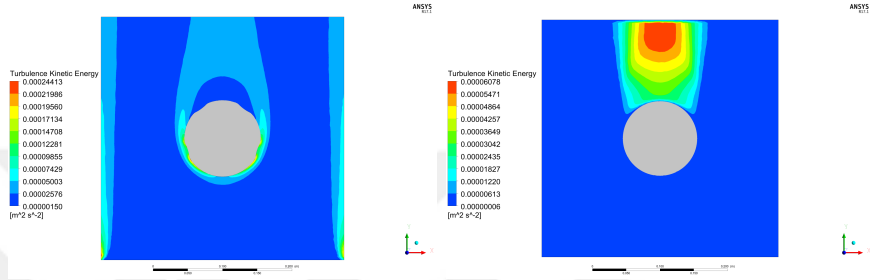
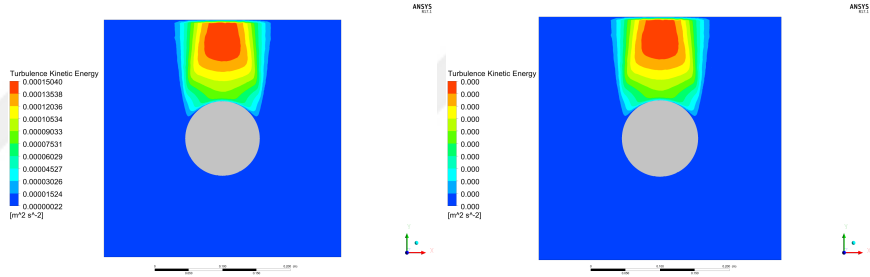
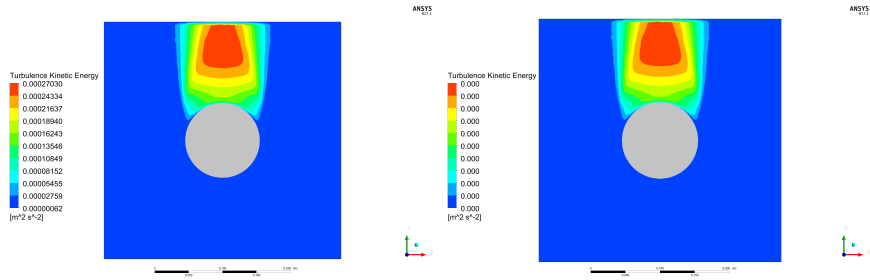
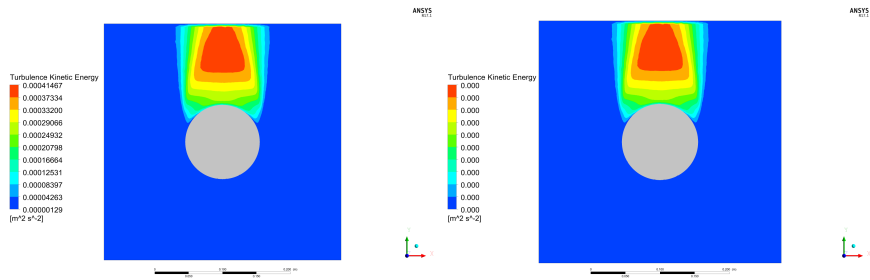


(b)

Şekil 5.14. Normal küre ve CRYOGEL kapsül için F' 'in zamanla değişimi



Şekil 5.15. Kapsül içerisindeki suyun tamamının katıldığı zaman kontrol hacmi içerisindeki ITA'nın akım çizgileri, $T_g=263$ K

(a) CRYOGEL $V_g=0.01$ m/s(b) Normal küre $V_g=0.01$ m/s(c) CRYOGEL $V_g=0.02$ m/s(d) Normal küre $V_g=0.02$ m/s(e) CRYOGEL $V_g=0.03$ m/s(f) Normal küre $V_g=0.03$ m/s(g) CRYOGEL $V_g=0.04$ m/s(h) Normal küre $V_g=0.04$ m/s(i) CRYOGEL $V_g=0.05$ m/s(j) Normal küre $V_g=0.05$ m/s

Şekil 5.16. Kapsül içerisindeki suyun tamamının katılaştığı zaman kontrol hacmi içerisindeki ITA'nın akım çizgileri, $T_g=263$ K

5.3. BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

5.3.1. GİMSA'da Kullanılan BED Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

GİMSA'da hali hazırda sadece pik saatler için kısmi depolama yapılmaktadır. Yani elektriğin en pahalı olduğu pik (puant) saatlerde soğutma grupları çalıştırılmamaktadır. Pik saatlerdeki soğutma yükü gece tarifesinde depolanmaktadır. GİMSA'da soğutma sistemi için ayrı bir elektrik aboneliği kullanıldığından, sistemin elektrik tüketimi üzerindeki etkisi elektrik faturaları üzerinden değerlendirilmiştir. Bölüm 4.3.1'de verilen Tablo 4.2'de GİMSA'nın Temmuz 2016'dan Nisan 2017'ye kadar olan elektrik tüketim miktarları görülmektedir. Tablo 4.2'de verilen elektrik tüketim miktarları göz önünde bulundurularak, GİMSA için hesaplanmış ve fatura edilmiş elektrik tüketim bedelleri Tablo 5.12'de verilmiştir. Tablo 5.12'den görüldüğü üzere 10 aylık sürede GİMSA'nın soğutma ihtiyacını karşılamak için 72,304.04 TL'lik ödeme yapılmıştır. Bu bedelden vergi ve diğer fonlar çıkarıldığı zaman ödenen bedel ise 58,454.78 TL olmaktadır. Dikkate alınan 10 aylık süre boyunca toplamda tüketilen enerji miktarı ise 210,227,400 kWh'dir.

BED sisteminin olmadığı durumdaki elektrik tüketim maliyetleri hesaplanırken, BED sisteminin olduğu durumda tüketilen enerjinin tamamının BED'in olmadığı durumda da tüketildiği kabul edilmiştir. BED sisteminin olmadığı normal bina soğutma sisteminde tekli tarife ya da üçlü tarife kullanılabilir. Burada sistemin her iki durumda sağlayacağı ekonomik fayda miktarını görmek için hem tekli tarife hem de üçlü tarife için hesaplamalar yapılmıştır. Tekli tarife için hesaplamalar yapılırken, fatura dönemi içinde tüketilen enerjinin tamamının tek bir fiyat üstünden ücretlendirildiği dikkate alınmıştır. Üçlü tarifede ise GİMSA'da kullanılan BED sistemi pik saatler için depolama yaptığından, gece tarifesinde tüketilen enerjinin pik (puant) saatlerde tüketildiği kabul edilmiştir. Açıklanan bu kabuller kullanılarak, BED sisteminin olmadığı durumdaki elektrik tüketim maliyetleri tekli ve üçlü tarife için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrı ayrı hesap yapılmasındaki sebep, ticarethanelerin ve bazı sektörde faaliyet gösteren işletmeler kanunlar gereği üçlü tarife kullanmak

zorunda olmalıdır. BED sistemlerinin sağlayacağı ekonomik faydayı belirlerken objektif bir yaklaşım için bu durum mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bölüm 3’de belirtildiği üzere GİMSA’da iki ayrı elektrik aboneliği kullanılmaktadır. Bunlardan biri sadece soğutma sistemlerinde kullanılan üçlü tarife aboneliği; diğeri ise GİMSA’nın genel elektrik ihtiyaçları için kullanılan tekli tarife aboneliğidir.

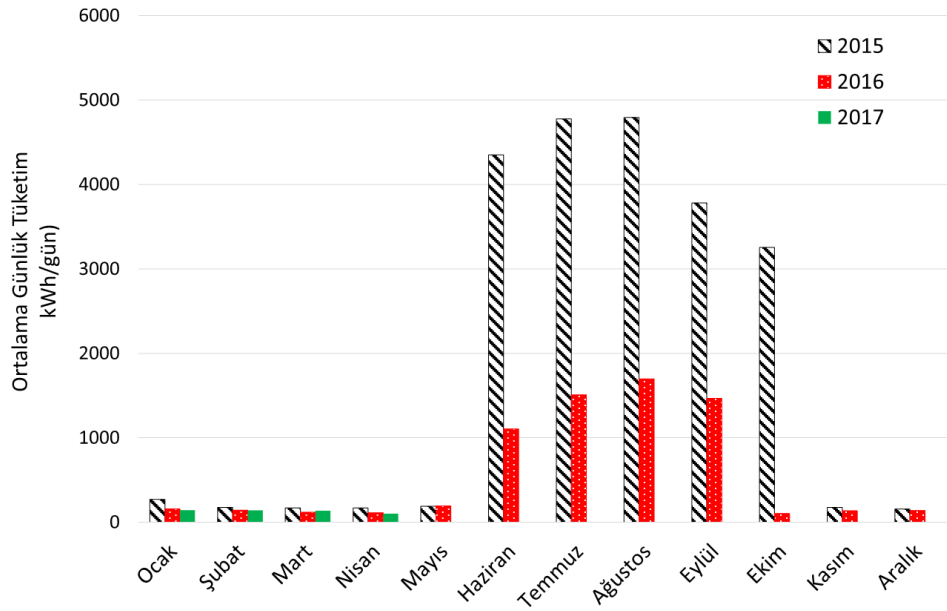
BED olmadığı, normal soğutma sisteminin tekli tarifede elektrik tüketim maliyetleri Tablo 5.13’de verilmiştir. Tekli tarifeye sahip normal soğutma sisteminde 10 aylık sürede toplam elektrik tüketim maliyeti vergi ve fonlar hariç 79,278.71 *TL* iken vergi ve fonlar dahil 97,908.54 *TL* olmaktadır. BED’in entegre edildiği soğutma sistemiyle normal soğutma sistemine göre sağlanan tasarruf miktarı vergi ve fonlar hariç 20,732.38 *TL*, vergi ve fonlar dahil 25,604.50 *TL* olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Ekim 2016’dan sonra soğutma ihtiyacı azaldığından elektrik tüketimi de düşmüştür.

Normal soğutma sisteminin üçlü tarifede elektrik tüketim maliyetleri Tablo 5.14’de görülmektedir. Tablo 5.14’den görüldüğü üzere, normal soğutma sistemi üçlü tarife ile kullanılırsa ödenecek olan bedel vergi ve fonlar hariç 95,797.88 *TL*, vergi ve fonlar dahil olduğu zaman ise 118,310.38 *TL*’dir. Bu değerlerden görüldüğü üzere sağlanan ekonomik tasarruf vergi ve fonlar dahil edilmediği zaman 37,252.10 *TL*, vergi ve fonlar dahil edilmediği zaman ise 46,006.34 *TL* olmaktadır. Daha önce belirtildiği üzere, Ekim ayından itibaren soğutma ihtiyacı azaldığından fatura bedelleri de düşmüştür.

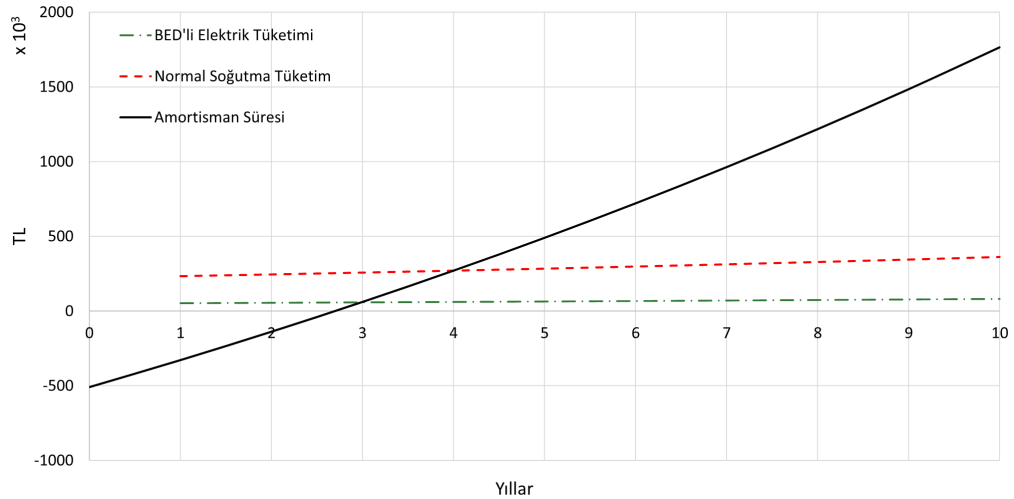
Tablo 5.12, Tablo 5.13 ve Tablo 5.14 dikkate alındığı zaman normal soğutma sisteminde, tekli tarife kullanımında %26.15 üçlü tarife kullanımında ise %38.22 ekonomik tasarruf sağlanmaktadır. Bu oranlar hesaplanırken vergi fonlar dikkate alınmıştır. BED sistemi ile elektrik tüketim maliyetleri düştüğü için ödenen vergi ve fon miktarı da azalmaktadır.

Şekil 5.17’de EnerjiSA’dan alınmış, günlük ortalama elektrik tüketim miktarları 2015, 2016 ve 2017 yılları için görülmektedir. Veriler 2017 yılının Nisan ayına kadar alınmıştır. Şekil 5.17’den görüldüğü üzere, 2015 ve 2016 yılı dikkate alındığı zaman, ortalama günlük elektrik tüketiminin yıl içerisindeki değişiminin aynı olduğu görülmektedir. Ayrıca BED sisteminin entegre edildiği Haziran 2016 tarihinden itibaren günlük elektrik tüketim miktarında ciddi bir düşüş görülmektedir. Bu

durum üzerindeki en büyük etmen; kullanılan BED sistemi ile daha düşük kapasiteli soğutma gruplarının kullanılmış olması ve elektrik tüketiminin gün içerisinde yayılı bir şekilde kullanılmasıdır. 2017 yılında dikkate alınan ilk 4 aya bakılacak olursa, 2015 ve 2016 yıllarına göre azda olsa bir düşüş söz konusudur. Ayrıca Ekim ayındaki ciddi düşüşün sebebi ise bina soğutmasında Ekim ayındaki düşük hava sıcaklığının bina iç ortam sıcaklığını düşürmede kullanılmaktadır. Böylece soğutma grubu ve BED sistemi kullanılmadan binanın soğutulması sağlanmaktadır. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere bina soğutma maliyetlerini düşürmek için BED sistemi ve ısı geri kazanımı aynı anda düşünülmelidir.



Şekil 5.17. GİMSA'nın yıllara göre aylık bazda günlük ortalama elektrik tüketimi



Şekil 5.18. GİMSA'da bulunan BED sistemi için yapılan yatırımın geri ödeme süresi ve 10 yıl süresince elde edilebilecek olan kâr miktarı

GİMSA'ya kurulan BED'in entegre edildiği soğutma sisteminin maliyeti yaklaşık olarak 1,100,000 TL'dir. Ayrıca GİMSA için BED'in olmadığı normal soğutma sisteminin maliyeti ise yaklaşık olarak 590,767 TL olmaktadır. Yani BED sistemi için fazladan 509,233 TL'lik bir maliyet gerekmektedir. Sistemin amortisman süresi hesaplanırken elektrik tüketiminin GİMSA için aynı kalacağı ve elektriğe %5 yıllık zam gelebileceği düşünülmüştür. Ayrıca yıllık bakım maliyeti yıllık 10,000 TL ve bu bakım maliyetine de her yıl %10 zam geleceği dikkate alınmıştır. Bu şartlarda sistemin yıllık tüketim maliyeti ve geri ödeme süresi Şekil 5.18'de görülmektedir. Şekil 5.18'den görüldüğü üzere, BED sistemine yapılan yatırım kendini yaklaşık 2.7 yılda geri ödemektedir. Ayrıca 10 yılın sonunda 1,764,825 TL'lik bir kâr elde edilmiş olacaktır.

5.3.2. Sistemin Farklı BED Kullanım Stratejilerinde Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Bölüm 4.3.2'de alışveriş merkezinde kullanılabilecek 8 farklı BED kullanım stratejisi tanıtılmıştı. Bu 8 farklı BED kullanım stratejisinin alışveriş merkezinin soğutma maliyetleri üzerindeki etkisi pik soğutma yükü üzerinden hesaplanmıştır. BED'in olmadığı normal bina soğutma sisteminin ve 8 farklı BED kullanım stratejisinin saatlik çiller kullanımları Tablo 5.15'da verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, her bir stratejinin çiller kapasitesi ve saatlik kullanım miktarı birbirine göre farklılık göstermektedir. Tablo 5.15'da yeşil kısımlar gece tarifesini, mavi kısımlar gündüz tarifesini ve kırmızı kısımlar ise pik saatleri temsil etmektedir. Tablo 5.15'daki çiller kullanım kapasiteleri kullanılarak, pik soğutma yükü için günlük soğutma maliyetleri hesaplanmıştır. Saatlik soğutma maliyetleri; BED olmadığı normal bina soğutması ve 8 farklı BED kullanım stratejileri göre hesaplanmıştır. Normal bina soğutma sistemi (BED'in olmadığı durum) hem tekli tarife hem de üçlü tarife için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Saatlik elektrik tüketim maliyetleri Tablo 5.16'de verilmiştir.

Tablo 5.12. EnerjiSA tarafından GİMSA'nın soğutma sistemine fatura edilmiş elektrik tüketim bedelleri

Dönem	Birim Fiyat (TL)			Fatura Edilen Miktar (TL)			Sistem kullanımı ücreti	Vergi ve Fonlar Hariç Toplam	Vergi ve Fonlar Dahil Toplam
	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant	Gece			
Temmuz 2016	0.219	0.388	0.096	4257.28	3061.11	5253.09	9330.43	21901.91	27048.86
Ağustos 2016	0.219	0.389	0.097	2619.31	1714.88	3161.02	5572.94	13068.15	16139.17
Eylül 2016	0.219	0.389	0.097	2765.76	1829.37	3476.65	6052.88	14124.66	17443.95
Ekim 2016	0.219	0.389	0.097	333.65	371.18	62.04	355.31	1122.17	1385.88
Kasım 2016	0.219	0.389	0.097	481.28	409.40	79.96	464.32	1434.95	1772.17
Aralık 2016	0.219	0.389	0.097	511.61	432.36	81.48	488.63	1514.07	1869.88
Ocak 2017	0.212	0.382	0.090	524.20	439.67	78.25	511.70	1553.82	1918.96
Şubat 2017	0.212	0.382	0.090	454.09	395.09	69.39	450.10	1368.67	1690.30
Mart 2017	0.212	0.382	0.090	468.89	397.08	84.29	477.51	1427.78	1763.30
Nisan 2017	0.212	0.382	0.090	319.07	335.80	45.35	329.38	1029.61	1271.57
TOPLAM								58545.78	72304.04

Tablo 5.13. Normal soğutma sisteminin tekli tarifiedeki elektrik tüketim maliyetleri

Dönem	Tekli tarife tüketim (<i>kWh</i>)	Birim Fiyat (<i>TL/kWh</i>)	Vergi ve Fonlar Hariç Toplam (<i>TL</i>)	Vergi ve Fonlar Dahil Toplam (<i>TL</i>)	BED'li Sisteme Göre Fark Vergi ve Fonlar Hariç (<i>TL</i>)	BED'li Sisteme Göre Fark Vergi ve Fonlar Dahil (<i>TL</i>)
Temmuz 2016	408084	0.270	30780.91	38014.42	8879.00	10965.57
Ağustos 2016	243743	0.271	18432.16	22763.71	5364.01	6624.55
Eylül 2016	264734	0.271	20019.52	24724.11	5894.87	7280.16
Ekim 2016	15540	0.271	1175.15	1451.32	52.98	65.43
Kasım 2016	20308	0.271	1535.72	1896.61	100.76	124.44
Aralık 2016	21371	0.271	1616.10	1995.89	102.03	126.00
Ocak 2017	22380	0.263	1655.31	2044.31	101.50	125.35
Şubat 2017	19686	0.263	1454.97	1796.89	86.30	106.59
Mart 2017	20885	0.263	1543.59	1906.33	115.81	143.03
Nisan 2017	14406	0.263	1064.73	1314.94	35.12	43.38
		Toplam	79278.17	97908.54	20732.38	25604.50

Tablo 5.14. Normal soğutma sisteminin üçlü tarifiedeki elektrik tüketim maliyetleri

Dönem	Gündüz Tüketim (kWh)	Puant Tarife Tüketim (kWh)	Birim Fiyat Gündüz Tarifesi (TL/kWh)	Birim Fiyat Puant Tarife (TL/kWh)	Vergi ve Fonlar Hariç Toplam (TL)	Vergi ve Fonlar Dahil Toplam (TL)	BED'li Sisteme Göre Fark Vergi ve Fonlar Hariç (TL)	BED'li Sisteme Göre Fark Vergi ve Fonlar Hariç (TL)
Temmuz 2016	97191	310893	0.219	0.388	37730.33	46596.95	15828.42	19548.09
Ağustos 2016	59578	184165	0.220	0.389	22526.22	27819.88	9458.07	11680.71
Eylül 2016	62909	201825	0.220	0.389	24527.12	30290.99	10402.46	12847.04
Ekim 2016	7589	7951	0.220	0.389	1307.80	1615.13	185.62	229.25
Kasım 2016	10947	9361	0.220	0.389	1674.19	2067.62	239.23	295.45
Aralık 2016	11637	9734	0.220	0.389	1757.86	2170.96	243.78	301.07
Ocak 2017	12310	10070	0.213	0.382	1805.76	2230.11	251.94	311.15
Şubat 2017	10675	9011	0.213	0.382	1592.67	1966.95	224.01	276.65
Mart 2017	11023	9862	0.213	0.382	1699.91	2099.39	272.14	336.09
Nisan 2017	7501	6905	0.213	0.382	1176.03	1452.40	146.42	180.83
				Toplam	95797.88	118310.38	37252.10	46006.34

Tablo 5.15. Normal soğutma ve 8 farklı BED kullanım stratejisinin saatlik çiller kullanımı

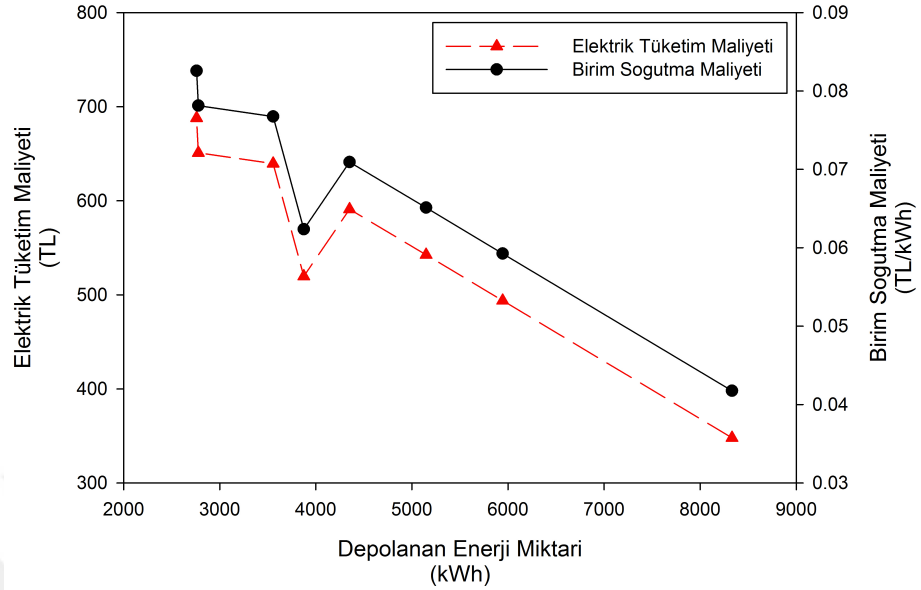
Saat	Normal Soğutma (kWh)	Tam Depolama (kWh)	Yük Dengeleme (kWh)	Pik Saat Depolaması (kWh)	%30 Kısmi Depolama (kWh)	%40 Kısmi Depolama (kWh)	%50 Kısmi Depolama (kWh)	%60 Kısmi Depolama (kWh)	%70 Kısmi Depolama (kWh)
1	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
2	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
3	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
4	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
5	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
6	0	1042	347	485	344	444	544	644	743
7	0	0	347	0	0	0	0	0	0
8	0	0	347	0	0	0	0	0	0
9	16	0	347	16	11	9	8	6	5
10	128	0	347	128	89	77	64	51	38
11	329	0	347	329	230	197	164	132	99
12	485	0	347	485	339	291	242	194	145
13	512	0	347	512	358	307	256	205	154
14	624	0	347	624	437	374	312	250	187
15	742	0	347	742	519	445	371	297	223
16	791	0	347	791	554	475	396	317	237
17	830	0	347	830	581	498	415	332	249
18	831	0	347	0	582	499	416	333	249
19	847	0	347	0	593	508	423	339	254
20	678	0	347	0	474	407	339	271	203
21	650	0	347	0	455	390	325	260	195
22	498	0	347	0	349	299	249	199	149
23	372	1042	347	485	344	444	544	644	743
24	0	1042	347	485	344	444	544	644	743

Tablo 5.16. Normal soğutma ve 8 farklı BED kullanım stratejisinin saatlik elektrik tüketim maliyeti

Saat	Normal Soğutma Tekli Tarife	Normal Soğutma Üçlü Tarife	Tam Depolama	Yük Dengeleme	Pik Saat Depolaması	%30 Kısmi Depolama	%40 Kısmi Depolama	%50 Kısmi Depolama	%60 Kısmi Depolama	%70 Kısmi Depolama
1	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
2	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
3	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
4	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
5	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
6	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
7	0	0	0	27.874	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	27.874	0	0	0	0	0	0
9	1.51	1.249	0	27.874	1.249	0.874	0.749	0.624	0.499	0.375
10	12.381	10.24	0	27.874	10.24	7.168	6.144	5.12	4.096	3.072
11	31.928	26.407	0	27.874	26.407	18.485	15.844	13.204	10.563	7.922
12	47.042	38.908	0	27.874	38.908	27.236	23.345	19.454	15.563	11.672
13	49.692	41.1	0	27.874	41.1	28.77	24.66	20.55	16.44	12.33
14	60.576	50.102	0	27.874	50.102	35.071	30.061	25.051	20.041	15.031
15	72.023	59.569	0	27.874	59.569	41.699	35.742	29.785	23.828	17.871
16	76.827	63.543	0	27.874	63.543	44.48	38.126	31.771	25.417	19.063
17	80.616	66.677	0	27.874	66.677	46.674	40.006	33.338	26.671	20.003
18	80.711	109.326	0	45.65	0	76.528	65.596	54.663	43.73	32.798
19	82.225	111.376	0	45.65	0	77.963	66.826	55.688	44.551	33.413
20	65.783	89.105	0	45.65	0	62.373	53.463	44.552	35.642	26.731
21	63.089	85.456	0	45.65	0	59.819	51.274	42.728	34.182	25.637
22	48.366	65.513	0	45.65	0	45.859	39.308	32.756	26.205	19.654
23	36.086	15.519	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
24	0	0	43.483	14.494	20.228	14.362	18.537	22.712	26.887	31.021
Top.	808.87	834.09	347.86	650.90	519.62	687.90	639.44	590.98	542.53	493.74

Tablo 5.16'deki maliyet hesaplamalarında Bölüm 3.2 verilen elektrik birim fiyatları kullanılmıştır. Ayrıca çillerlerin EER değerinin 3.0 olduğu yine maliyet hesaplarında göz önünde bulundurulmuştur. BED sisteminin olmadığı normal bina soğutma sisteminin tekli ve üçlü tarifedeki elektrik tüketim maliyetleri arasında ciddi bir fark görünmemektedir. Tekli tarife pik saatlerdeki yüksek elektrik birim fiyatı kullanılmadığından üçlü tarife göre daha avantajlı görülmektedir. BED sisteminin entegre edildiği soğutma sisteminde, artan depolama miktarı ile elektrik maliyeti düşüş göstermektedir. Bu durum kısmi depolama stratejileri ve tam depolama sistemlerinin maliyet sonuçlarında açıkça görülmektedir. %30 kısmi depolama stratejisinde, pik soğutma yükü altında elektrik tüketim maliyeti 687.44 TL olurken, %70 kısmi depolama stratejisinde 493.74 TL ve tam depolama durumunda ise 347.86 TL olmaktadır. Depolama miktarının elektrik tüketim maliyeti ile değişimi Şekil 5.19'de görülmektedir. Bu değişime ek olarak aynı diyagramda depolama miktarının soğutma birim maliyetinin (TL/kWh) değişimi de verilmiştir. Depolama miktarının artması ile soğutma birim maliyeti düşüş göstermektedir. Artan depolama miktarı ile soğutma birim fiyatındaki ve soğutma maliyetindeki düşüş üzerindeki en büyük etmen, artan depolama miktarı ile soğutma yükünün gece tarifi saatlerinde kaydırılmış olmasıdır. Artan depolama miktarı, gündüz ve pik saat tarifesindeki çiller kullanımını azalttığından; soğutmaya bağlı elektrik tüketim maliyetlerinde düşüşe sebep olmaktadır.

Şekil 5.19 dikkatle incelendiği iki noktada soğutma birim fiyatında ve toplam elektrik tüketim maliyetinde ciddi düşüşlerin olduğu iki nokta görülmektedir. Bu noktalar Tablo 5.15 ve 5.16'den kontrol edildiği zaman yük dengeleme ve pik saatler için depolama stratejilerine denk gelmektedir. Yük dengeleme ve %30 kısmi depolama stratejilerinde hemen hemen aynı miktarda enerji depolanmaktadır. Ancak elektrik tüketim maliyetleri birbirine göre farklılık göstermektedir. Çünkü bu stratejilerde depolanan enerji miktarı aynı olmasına rağmen, depolanan enerjiden yararlanma farklıdır. Bu farklılık da soğutma birim fiyatını ve toplam elektrik tüketim maliyetini direk olarak etkilemektedir. Yük dengeleme stratejisinde, %30 kısmi depolamaya göre daha az oranda pik saat çiller kullanımı söz konusudur. Pik saatlerdeki çiller kullanımı elektrik birim fiyatı açısından en yüksek kullanım aralığına denk geldiği için pik saatlerdeki çiller kullanımından kaçınmak gerekmektedir. Bu



Şekil 5.19. Elektrik tüketim maliyeti ve birim soğutma maliyetinin depolama miktarı ile değişimi

durum pik saatler için depolama stratejisinde açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.19). Pik saatler için enerji depolama stratejisinde toplam soğutma yükünün %46.52'si depolanmaktadır. Şekil 5.19'den görüldüğü üzere pik saatler için depolama stratejisi yaklaşık olarak %65 oranında enerji depolama ile aynı ekonomik faydayı sağlamaktadır. Bu farklılığa depolanan enerjinin nasıl kullanıldığı neden olmaktadır. Pik saatler için enerji depolama stratejisinde çillerler pik saatlerde kullanılmaz. Bu sayede, elektrik birim fiyatının en yüksek olduğu saatlerde soğutma için elektrik tüketiminden kaçınılmış olur. Böylece elektrik tüketim maliyeti ve toplam soğutma için birim soğutma maliyeti ciddi oranda düşürülmüş olur. Özetle, aynı miktarda depolama ile daha fazla ekonomik fayda sağlanmış olur.

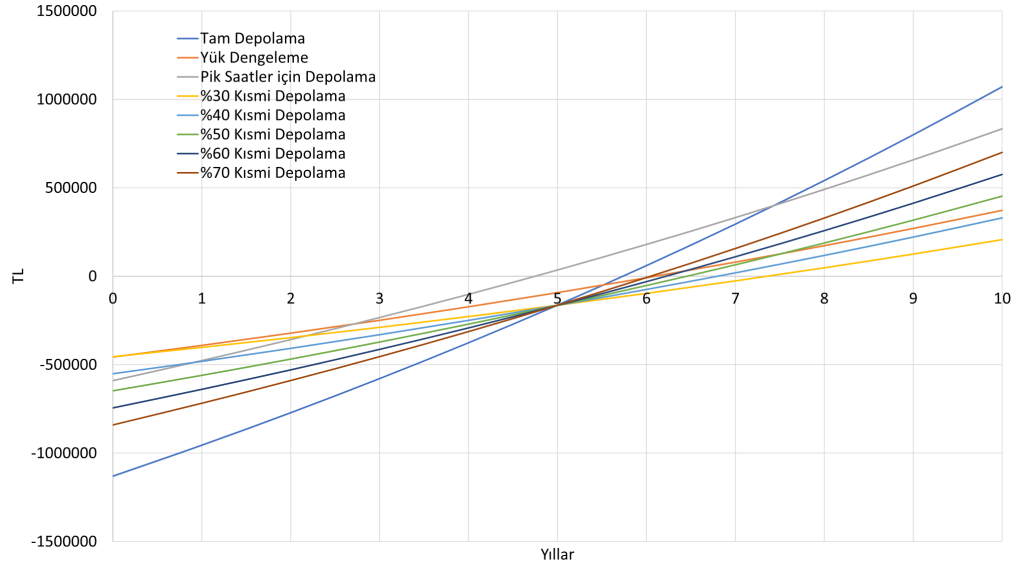
Yukarıdaki sonuçlardan sonuçlardan görüldüğü üzere BED sisteminden elde edilecek olan ekonomik fayda üzerinde BED kullanım stratejisinin ciddi etkisi vardır. BED kullanım stratejilerinin sistemin ekonomik tasarruf üzerindeki etkisinin yanında, sistemin ilk kurulum maliyetleri üzerinde de ciddi etkileri vardır. Bu yüzden sistemden alınan ekonomik faydanın yanında, sisteme yapılan ekstra yatırım ve bu yatırımın geri ödeme süresi de diğer önemli parametrelerdir. Bu yüzden BED sistemlerinin ekonomik fizibilitesi yapılırken, elde edilecek ekonomik faydanın yanında sistemin kendini geri ödeme süresi de irdelenmelidir. Kısalan geri ödeme

süresi, sisteme yapılan ilk yatırım maliyetini kısa sürede geri ödeyecek ve sistemi daha kısa sürede kara geçirecektir. Sistemin ilk yatırım ve geri ödeme süresini irdellemek için Bölüm 4.3.4'deki alt yapı ve kabuller kullanılmıştır. BED sisteminin ilk yatırım maliyetinin incelenen 8 farklı BED kullanım stratejisine göre değişimi Tablo 5.17'de görülmektedir. Bu tablodaki verilerden pik saatler için olan kısım GİMSA'da kurulu sistem için gerçek değerlerdir. Diğer değerler Tablo 4.4'de verilen değişim şekilleri dikkate alınarak elde edilmiştir.

Tablo 5.17. İncelenen BED kullanım stratejileri için ilk yatırım maliyeti ve pik soğutma yüküne göre yıllık elektrik tüketim maliyetleri

BED Kullanım Stratejisi	BED Sistemi için Ödenen Fark	Elektrik Tüketim Bedeli
Tam Depolama	1130330	175042.8
Yük Dengeleme	456736	65948.4
Pik Saat Depolaması	590000	113209.2
%30 Kısmi Depolama	454674	52628.4
%40 Kısmi Depolama	551197	70074
%50 Kısmi Depolama	647719	87519.6
%60 Kısmi Depolama	744241	104961.6
%70 Kısmi Depolama	840642	122526

Tablo 5.17'de BED sistemi için ödenen ekstra ilk yatırım maliyeti ve pik soğutma yükü üzerinden hesaplanmış yıllık soğutma maliyeti görülmektedir. Yıllık soğutma maliyetlerinin %5 artacağı dikkate alınarak sistemin geri ödeme süresi ve 10 yılın sonunda sağladığı kar miktarı Şekil 5.20'da verilmiştir. Şekil 5.20'dan görüldüğü üzere, en hızlı geri ödeme süresini 4.7 yıl ile pik saatler için depolama yapma stratejisi sağlamıştır. İkinci en hızlı geri ödemesini ise 6.6 yıl ile tam depolama stratejisi sağlamaktadır. Kısmi depolama stratejilerinde artan depolama kapasitesi ile sistemin geri ödeme süresi de kısalmaktadır. 10 yıllık sürede sağlanacak kar miktarlarına bakıldığı zaman, en yüksek kar miktarı 1,071,339 TL ile tam depolama stratejisinde, ikinci en yüksek kar miktarı ise 833,933 TL ile pik saatler için depolama stratejisinde görülmektedir. Sonuç olarak, artan depolama kapasitesi ile sistemin geri ödeme süresi azalırken, 10 yılın sonunda elde edilecek kar miktarı da artmaktadır. Ancak tam depolamanın dışındaki kısmi depolama stratejilerinde depolanan enerjinin nasıl kullanılacağı önem arz etmektedir. Yaklaşık olarak aynı depolama kapasitesine sahip %40 kısmi depolama ve pik saatler için depolama



Şekil 5.20. İncelenen BED kullanım stratejilerinin amortisman ve kar miktarının 10 yıllık sürede gösterimi

stratejilerinde ciddi geri ödeme süresi ve kar farkı vardır. Pik saatler için depolamada geri ödeme süresi 4.7 yıl ve 10 yılın sonundaki kar 833,933 TL iken, %40 kısmi depolama stratejisinde geri ödeme süresi 6.8 yıl ve 10 yılın sonundaki kar ise 330,186 TL'dir. Benzer şekilde hemen hemen bir birine yakın depolama kapasitesine sahip yük dengeleme ve %30 kısmi enerji depolama stratejilerinde geri ödeme süresi sırasıyla 6.1 yıl ve 7.3 yıldır. 10 yılın sonunda elde edilen kar ise yük dengeleme stratejisi için 372,756 TL, %30 kısmi enerji depolama stratejisi için 207,279 TL'dir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere tam depolama stratejisi dışında kalan kısmi depolama stratejilerinde depolanan enerjinin mümkün olduğu kadar elektriğin pahalı olduğu pik saatlerde kullanılmalıdır. Soğutma gruplarının mümkün olduğu kadar elektriğin pahalı olduğu saatlerde çalıştırılmasından kaçınılmalıdır.

6. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasın bir alışveriş merkezinde bulunan BED sistemi incelenmiştir. Araştırma faaliyetleri makro seviye çalışmalar, mikro seviye çalışmalar ve ekonomik değerlendirme çalışmaları olmak üzere üç ana başlıkta yürütülmüştür. Makro seviye çalışmalarda, alışveriş merkezinde kullanılan BED sisteminin ve sistem elemanlarının termodinamik analizleri TD1K ve TD2K ışığında yapılmıştır. Ayrıca BED sisteminin en önemli elemanı olan BED tankının ısı performansını ve BED tankının önemli tasarım parametrelerinin ısı performans üzerindeki etkisi belirlemek için BED tankı gözenekli ortam olarak modellenmiştir. Mikro seviye çalışmalarda, BED sisteminde kullanılan buz kapsülünün davranışı sayısal olarak incelenmiştir. CRYOGEL kapsülün ısı performansı düz küre kapsül ile kıyaslanmıştır. Ekonomik değerlendirme çalışmaları kapsamında iki temel araştırma faaliyeti yürütülmüştür. Bunlardan; ilki GİMSA'da kurulu olan BED sisteminin elektrik tüketim maliyetine sağladığı katkı miktarının, GİMSA'nın elektrik tüketim miktarları ve maliyetleri üzerinden belirlenmesidir. İkinci faaliyet ise 8 farklı BED kullanım stratejisinin, sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Tez çalışmasında yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. BED sistemi ve sistem elemanları için yapılan termodinamik analizlerden görüldüğü üzere enerji analizi sistemin ve sistem elemanların performansını belirlemede tek başına yeterli değildir. Enerji analizleri sistemi tanımak için önemli bir araçtır ancak sistemdeki tersinmezlikleri içermez. Bu yüzden sistemde meydana gelen tersinmezlikleri de hesaba katmak için ekserji analizinin yapılması gerekmektedir. Çünkü enerji verimleri sistem geneli ve sistem elemanları

için %94'ün üzerindeyken, ekserji verimleri %1 ile %99 arasında değişim göstermektedir. Enerji verimleri göre sistem ideale yakın davranış göstermiş gibi görünse de, ekserji analizleri durumun böyle olmadığını göstermektedir. Ekserji verimlerinden görüldüğü üzere, sistemi ısı olarak iyileştirmek için ciddi bir potansiyel görünmektedir.

2. Termodinamik analizlerden görüldüğü üzere sistemdeki en yüksek ekserji yıkımı enerji boşaltma periyotunda gerçekleşmektedir. Bunun nedeni enerji boşaltma periyodunda iş akışkanının sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farkın diğer periyotlara göre daha düşük olmasıdır. Bekleme periyotunda ise ekserji yıkımı en düşük seviyededir. Çünkü bekleme periyotunda sistem sadece ısı kazancının etkisindedir.
3. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında BED sisteminden alınan sıcaklık ve debi değerleri ile gerçekleştirilen termodinamik analizlerde yukarıdaki ilk iki madde ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara ek olarak incelenen üç ay içerisinde elde edilen buzların tamamı bina soğutmasında eritilerek kullanılmıştır. Ancak Hazirandan Ağustos'a kadar dış ortam sıcaklığı sürekli arttığı için tank içerisindeki katılaşma bu aylar için farklı olmuştur. Haziran ayında tank içerisindeki suların tamamına yakını katılaşırken, Temmuz ve Haziran aylardaki katılaşma miktarı düşmüştür. Artan dış ortam sıcaklığıyla meydana gelen bu durumda ısı kazançları artmasının ve soğutma gruplarının performansı düşmesi etkili olmuştur.
4. BED tankı içerisindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için gözenekli ortam modellemesi elverişli bir yöntemleri. BED tankı için gözenekli ortamlarda enerji denkleminin iki boyutlu ve bir boyutlu çözümlemelerinde önemli bir fark görülmemiştir. Ayrıca radyal yöndeki sıcaklığın lineer ya da parabolik olarak kabul edilmesi durumunda da sonuçlarda önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu yüzden işlem kolaylığı düşünülerek bir boyutlu enerji denklemi kullanılarak BED tankının ısıl modellemesi kolaylıkla gerçekleştirilebilir.
5. BED tankının ısıl performansını arttırmak için gözenekliliği yüksek, kapsül çapını büyük, ITA giriş hızını yüksek ve ITA giriş sıcaklığını FDM'nin sıcaklığından mümkün olduğu kadar yüksek tutmak gerekmektedir.

6. Mikro seviye çalışmalar kapsamında yapılan doğrulama çalışmasından sonra sayısal analizlerin kapsül davranışını belirlemede uygun bir metot olduğu görülmüştür. Ticari CRYOGEL kapsül normal küre kapsüle göre daha yüksek performans göstermiştir. Aynı ITA hızında yapılan analizlerde CRYOGEL kapsül %20'ye kadar katılma süresini düşürmektedir. Buda tam katılma için gereken enerji tüketim miktarını azaltmaktadır. Bu yüzden literatürde kullanılan silindir ve küre kapsüllere göre iyi ısı performans gösteren şekli değiştirilmiş kapsüllerin etkisi araştırılabilir. Buz kapsüllerinin katılma süresinin düşürülmesi ile birim zamanda depolanan enerji miktarı artmaktadır.
7. CRYOGEL kapsülün normal küre kapsüle göre daha kısa sürede katılma sağlamasındaki en büyük etmen, CRYOGEL kapsül üzerinde bulunan girintilerin ısı geçiş yüzey alanını genişletmesi ve kapsül üzerindeki türbülans etkilerini artırmasıdır.
8. GİMSA'da kullanılan BED sistemi elektrik tüketim maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. 10 aylık inceleme yapılan periyotta BED sistemi; normal soğutma sisteminin tekli tarifiede çalıştırılmasında 20,732.38 *TL*, üçlü tarifiede çalıştırılmasında ise 25,604.50 *TL*'lik bir tasarruf sağlamıştır. Elde edilen tasarruf miktarının 10 aylık süreyi kapsadığı ve bu 10 yıl süre içerisinde sadece 3 ayın soğutma sistemlerinin yoğun kullanıldığı döneme geldiğini unutulmamalıdır. Yıllık baz sağladığı tasarruf miktarı 45,000 *TL* civarında olacaktır.
9. BED sistemlerini yaygınlaştırmak için elektrik dağıtım şirketleri soğutmaya bağlı elektrik tüketiminin yoğun olduğu binalara üçlü tarife kullanımını yasal zorunluluk haline getirebilir. Böylece BED sisteminin ülkemizdeki kullanımı yaygınlaştırılabilir.
10. Yıl içerisindeki elektrik tüketimindeki pik yük genellikle yaz aylarında öğle ve öğleden sonra saatleri civarında oluşmaktadır. Bu pik yükün en büyük nedeni soğutma sistemleridir. BED sistemleri sayesinde bu pik yük kaydırılarak, elektrik üretimi ve tüketimini dengelemeye destek olunabilir. Bu kapsamda BED kullanıcıları için özel tarife politikaları hazırlanabilir.
11. BED kullanım stratejilerinden soğutma yükünün tamamının depolandığı tam

depolama stratejisi en yüksek kâr miktarını ve en kısa geri ödeme süresini sağlamıştır. Ancak tam depolama stratejisinin en yüksek depolama hacmini gerektirdiği unutulmamalıdır. Bu yüzden binanın ilk tasarımında BED sistemi düşünülmezse, depolama tankı için gerekli olan yer bulunmayabilir.

12. Kısmi depolama stratejileri uygulamalarda en çok karşılaşılan BED kullanım stratejileridir. BED sistemleride depolanan enerji miktarı kadar depolanan enerjinin nasıl kullanılacağı da önemlidir. Kısmi depolama stratejilerinde depolanan enerji mümkün olduğu kadar elektriğin pahalı olduğu pik saatlerde kullanılmalıdır. Böylece elde edilecek olan kâr miktarı artar.
13. Kısmi depolama stratejileri içerisinde, elektrik tüketiminin pik saatlerindeki soğutma yükünün depolandığı pik saatler için kısmi depolama stratejisi en yüksek kâr miktarını ve geri ödeme süresini sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Yan, C., Shi, W., Li, X., and Zhao, Y., 2016. Optimal design and application of a compound cold storage system combining seasonal ice storage and chilled water storage, **Applied Energy**, **171**:1–11.
2. Cao, X., Dai, X., and Liu, J., 2016. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, **Energy and Buildings**, **125**:198–213.
3. Global Energy Statistical Yearbook 2017, Electricity Domestic Consumption Data, (Web sayfası: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>), (Erişim tarihi: Ağustos 2017).
4. Web sayfası: <https://www.epias.com.tr/wp-content/uploads/2016/08/31.-Hafta-07.08.2016-Haftal%C4%B1k-Rapor.pdf>, Erişim Tarihi: 25.12.2016.
5. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr>.
6. İbrahim Dinçer and Rosen, M.A., 2011. Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons, Ltd., Publication, second edition.
7. Federal Energy Management Program, 2000. Thermal Energy Storage for Space Cooling, number PNNL-13607 in DOE/EE-0241.
8. Evapco Cooling Systems. Websayfası: http://www.evapco.eu/de/products/thermal_ice_storage, Erişim tarihi: Haziran 2017.
9. MacPhee, D., 2008. Performance Investigation of Various Cold Thermal Energy Storages, Master's thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology.
10. CRYOGEL, Ice Ball Thermal Storage, online: <http://www.cryogel.com/>.
11. Web sayfası: <http://www.taikisha-group.com/service/strathermi.html>, Erişim Tarihi: 31/07/2017.

12. Ismail, K. and Henriquez, J., 2002. Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system, **Applied Thermal Engineering**, **22**(15):1705 – 1716.
13. Sehar, F., Rahman, S., and Pipattanasomporn, M., 2012. Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings, **Energy and Buildings**, **51**:255–262.
14. Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H., and Mahlia, T., 2012. Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications, **Energy and Buildings**, **50**:347 – 354.
15. Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H., and Mahlia, T., 2012. Thermodynamic evaluation of utilizing different ice thermal energy storage systems for cooling application in office buildings in Malaysia, **Energy and Buildings**, **53**:117 – 126.
16. Güngör, A., 2012. Buz Depolama Teknolojileri ve İklimlendirme Sistemlerinde Uygulama Potansiyeli ve Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi, **Tesisat Mühendisliği**, **1**(130):5–20.
17. Biyanto, T.R., Alhikami, A.F., Nugroho, G., Hantoro, R., Bayuaji, R., Firmanto, H., Waluyo, J., and Sonhaji, A.I., 2015. Thermal Energy Storage Optimization in Shopping Center Buildings, **Journal of Engineering and Technological Sciences**, **47**(5):549–567.
18. Rosen, M.A., Dincer, I., and Pedinelli, N., 2000. Thermodynamic Performance of Ice Thermal Energy Storage Systems, **Journal of Energy Resources Technology**, **122**(4):205–211.
19. D, M. and I, D., 2009. Heat Transfer and Thermodynamic Analyses of Some Typical Encapsulated Ice Geometries During Discharging Process, **ASME. J. Heat Transfer**, **131**(8):082301–082301–15.

20. Acar, C. and Dincer, I., 2016. Energy and exergy analyses of a residential cold thermal energy storage system, **International Journal of Exergy (IJEX)**, **19**(4):441–458.
21. MacPhee, D., Dincer, I., and Beyene, A., 2012. Numerical simulation and exergetic performance assessment of charging process in encapsulated ice thermal energy storage system, **Energy**, **41**(1):491 – 498, 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, {ECOS} 2010.
22. MacPhee, D. and Dincer, I., 2009. Thermal modeling of a packed bed thermal energy storage system during charging, **Applied Thermal Engineering**, **29**(4):695 – 705.
23. Karthikeyan, S. and Velraj, R., 2012. Numerical investigation of packed bed storage unit filled with {PCM} encapsulated spherical containers – A comparison between various mathematical models, **International Journal of Thermal Sciences**, **60**:153 – 160.
24. Amin, N., Bruno, F., and Belusko, M., 2014. Effective thermal conductivity for melting in {PCM} encapsulated in a sphere, **Applied Energy**, **122**:280 – 287.
25. Erek, A. and Dincer, I., 2008. An approach to entropy analysis of a latent heat storage module, **International Journal of Thermal Sciences**, **47**(8):1077 – 1085.
26. Regin, A.F., Solanki, S., and Saini, J., 2009. An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using {PCM} capsules: Numerical investigation, **Renewable Energy**, **34**(7):1765 – 1773.
27. Ryu, H.W., Hong, S.A., Shin, B.C., and Kim, S.D., 1991. Heat transfer characteristics of cool-thermal storage systems, **Energy**, **16**(4):727–737.
28. Kousksou, T., Bédécarrats, J.P., Dumas, J.P., and Mimet, A., 2005. Dynamic modelling of the storage of an encapsulated ice tank, **Applied Thermal Engineering**, **25**(10):1534 – 1548.

29. Ismail, K., Henríquez, J., and da Silva, T., 2003. A parametric study on ice formation inside a spherical capsule, **International Journal of Thermal Sciences**, **42**(9):881 – 887.
30. Beghi, A., Cecchinato, L., Rampazzo, M., and Simmini, F., 2014. Energy efficient control of {HVAC} systems with ice cold thermal energy storage, **Journal of Process Control**, **24**(6):773 – 781, energy Efficient Buildings Special Issue.
31. Lemort, V., 2006. A numerical comparison of control strategies applied to an existing ice storage system, **Energy Conversion and Management**, **47**(20):3619 – 3631, heat Transfer in Components and Systems for Sustainable Energy Technologies: Heat-SET 2005, 5–7 April 2005, Grenoble, France.
32. ElGhnam, R.I., Abdelaziz, R.A., Sakr, M.H., and Abdelrhman, H.E., 2012. An experimental study of freezing and melting of water inside spherical capsules used in thermal energy storage systems, **Ain Shams Engineering Journal**, **3**(1):33 – 48.
33. Navidbakhsh, M., Shirazi, A., and Sanaye, S., 2013. Four E analysis and multi-objective optimization of an ice storage system incorporating {PCM} as the partial cold storage for air-conditioning applications, **Applied Thermal Engineering**, **58**(1–2):30 – 41.
34. Han, Y., Shen, B., Hu, H., and Fan, F., 2014. Optimizing the Performance of Ice-storage Systems in Electricity Load Management Through a Credit Mechanism: An Analytical Work for Jiangsu, China, **Energy Procedia**, **61**:2876 – 2879.
35. Wu, C.T. and Tsai, Y.H., 2015. Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality operation, **International Journal of Hospitality Management**, **46**:46 – 54.

36. Cho, K. and Choi, S., 2000. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **43**(17):3183 – 3196.
37. Chaichana, C., Charters, W.W., and Aye, L., 2001. An ice thermal storage computer model, **Applied Thermal Engineering**, **21**(17):1769 – 1778.
38. Erek, A. and Dincer, I., 2009. Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **52**(3–4):851 – 859.
39. Pu, J., Liu, G., and Feng, X., 2012. Cumulative exergy analysis of ice thermal storage air conditioning system, **Applied Energy**, **93**:564 – 569, (1) Green Energy; (2)Special Section from papers presented at the 2nd International Energy 2030 Conf.
40. Lee, W.S., Chen, Y.T., and Wu, T.H., 2009. Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm, **Applied Energy**, **86**:1589–1595.
41. Candanedo, J., Dehkordi, V., and Stylianou, M., 2013. Model-based predictive control of an ice storage device in a building cooling system, **Applied Energy**, **111**:1032 – 1045.
42. Chan, A.L., Chow, T.T., Fong, S.K., and Lin, J.Z., 2006. Performance evaluation of district cooling plant with ice storage, **Energy**, **31**(14):2750 – 2762.
43. Chen, S. and Yue, J., 1991. A Simplified Analysis for Cold Storage in Porous Capsules With Solidification, **ASME. J. Energy Resour. Technol.**, **113**(2):108–116.
44. Chen, S. and Yue, J., 1991. Thermal performance of cool storage in packed capsules for air conditioning, **Heat Recovery Systems & CHP**, **11**(6):551–561.

45. Calvet, N., Py, X., Olivès, R., Bédécarrats, J.P., Dumas, J.P., and Jay, F., 2013. Enhanced performances of macro-encapsulated phase change materials (PCMs) by intensification of the internal effective thermal conductivity, **Energy**, **55**:956 – 964.
46. Ariffin, M.K., Osman, K., and Senawi, M.Y., 2009. Simulation of spherical encapsulated ice of thermal energy storage system during freezing, in 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1873–1876.
47. Zhao, W., Neti, S., and Oztekin, A., 2013. Heat transfer analysis of encapsulated phase change materials, **Applied Thermal Engineering**, **50**(1):143 – 151.
48. Carbonell, D., Philippen, D., Haller, M., and Frank, E., 2014. Development and Validation of a Mathematical Model for Ice Storages with Heat Exchangers that can be De-iced, **Energy Procedia**, **57**:2342–2351.
49. Dott, R., Winteler, C., Afjei, T., and Hafner, B., 2016. Key Facts for High Efficient Solar Ice Storage Heat Pump Systems, in *Clima2016*, volume 3.
50. Chen, S.L., Chen, C.L., Tin, C.C., Lee, T.S., and Ke, M.C., 2000. An experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank, **Experimental Thermal and Fluid Science**, **23**(3–4):133 – 144.
51. Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., and Letan, R., 2007. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **50**(9–10):1790 – 1804.
52. Verma, P., Varun, and Singal, S., 2008. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **12**(4):999 – 1031.
53. Regin, A.F., Solanki, S., and Saini, J., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using {PCM} capsules: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **12**(9):2438 – 2458.

54. Ismail, K. and Jr, R.S., 1999. A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage, **Applied Thermal Engineering**, **19**(7):757 – 788.
55. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., and Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, **Applied Thermal Engineering**, **23**(3):251 – 283.
56. Mongibello, L. and Graditi, G., 2016. Cold Storage for a Single-Family House in Italy, **Energies**, **10**(9):1–16.
57. Ettouney, H., El-Dessouky, H., and Al-Ali, A., 2004. Heat transfer during phase change of paraffin wax stored in spherical shells, **Journal of Solar Energy Engineering**, **127**:357–365.
58. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information, **Energy and Buildings**, **40**(3):394 – 398.
59. Santamouris, M., 2016. Cooling the buildings – past, present and future, **Energy and Buildings**, **128**:617 – 638.
60. Habeebullah, B., 2007. Economic feasibility of thermal energy storage systems, **Energy and Buildings**, **39**(3):355 – 363.
61. Websayfası: [http://www.baltimoreaircoil.com/english/products/ice-thermal-storage air-conditioning/experience](http://www.baltimoreaircoil.com/english/products/ice-thermal-storage-air-conditioning/experience), (Erişim tarihi: Temmuz 2017.).
62. Baltimore Aircoil Company, Websayfası: <http://www.baltimoreaircoil.com>, Erişim tarihi: Haziran 2017.
63. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., and DeWitt, D.P., 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc, 7th edition.
64. BlueBox Cooling Systems, Web sayfası: <http://www.blueboxcooling.com>, Erişim tarihi: 11/07/2017.

65. Çengel; Michael A. Boles, Y.A., 2008. Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, Güven Bilimsel Yayıncılık, 5 edition.
66. Bejan, A., Dincer, I., Lorente, S., Miguel, A.F., and Reis, A.H., 2004. Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies, Springer Science+Business Media, LLC.
67. ANSYS® Academic Research, Release 18.0, Help System, Solidification and Melting Analysis Guide, ANSYS, Inc.



EKLER

İki Boyutlu Isı Geçişi Denkleminin Radyal Yöndeki Sıcaklığın Lineer Değiştiği Kabul Edilmesi Durumundaki Çözümü

$$T_c(z) = c_1 e^{\lambda_1 x} + c_2 e^{\lambda_2 x} + c_3 \quad (6.1)$$

Bu denklemdeki $c_1, c_2, c_3, \lambda_1, \lambda_2$ ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$c_1 = \frac{A(B - \epsilon c_p u_\infty C)}{2 B D} \quad (6.2)$$

$$c_2 = \frac{A (B + \epsilon \rho c_p u_\infty C)}{2 B D} \quad (6.3)$$

$$c_3 = \frac{3((T_{FDM} - 2/3T_\infty)R + kR_T T_{FDM})RA_{yatak}H + 6kT_\infty}{RA_{yatak}(3kR_T + R)H + 6k} \quad (6.4)$$

$$\lambda_1 = \frac{C F}{2E} \quad (6.5)$$

$$\lambda_2 = \frac{C - F}{2E} \quad (6.6)$$

$$A = T_g H A_{yatak} R^2 + 3T_g H A_{yatak} R k R_T + 6T_g k - 6kT_\infty - 3H A_{yatak} T_{FDM} R k R_T - 3H A_{yatak} T_{FDM} R^2 + 2H A_{yatak} R^2 T_\infty \quad (6.7)$$

$$B = 4R^2 H A_{yatak} k + (R u_\infty c_p \rho \epsilon)^2 + 3R k R_T (u_\infty c_p \rho \epsilon)^2 + 12R H A_{yatak} k^2 R_T + 24k^2 \quad (6.8)$$

$$C = \left[(3\epsilon \rho c_p u_\infty R k R_T)^2 + 6R k R_T (\epsilon \rho c_p u_\infty R^2)^2 + (\epsilon \rho c_p u_\infty R^2)^2 + 72k^3 R R_T + 4H A_{yatak} R^4 k + 36H A_{yatak} k (R k R_T)^2 + 24k^2 R^2 + 24H A_{yatak} R^3 k^2 R_T \right]^{1/2} \quad (6.9)$$

$$D = HA_{yatak}R^2 + 3HA_{yatak}RkR_T + 6k \quad (6.10)$$

$$E = Rk(3kR_T + R) \quad (6.11)$$

$$F = 3\epsilon\rho c_p u_\infty RkR_T + \epsilon\rho c_p u_\infty R^2 \quad (6.12)$$

İki Boyutlu Isı Geçişi Denkleminin Radyal Yöndeki Sıcaklığın Parabolik Değiştiği Kabul Edilmesi Durumundaki Çözümü

$$T_c(z) = c_4 e^{\lambda_3 z} + c_5 e^{\lambda_4 z} + c_6 \quad (6.13)$$

Bu denklemdeki c_4, c_5, c_6, λ_1 ve λ_2 ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$c_4 = \frac{A(B - \epsilon c_p u_\infty C)}{2 B D} \quad (6.14)$$

$$c_5 = \frac{A (B + \epsilon\rho c_p u_\infty C)}{2 B D} \quad (6.15)$$

$$\lambda_3 = \frac{C F}{2E} \quad (6.16)$$

$$\lambda_4 = \frac{C - F}{2E} \quad (6.17)$$

$$c_6 = \frac{2A_{yatak}H(T_{FDM} - 0.5T_\infty)R^2 + 4HA_{yatak}T_{FDM}RkR_T + 8kT_\infty}{8k + 4HA_{yatak}RkR_T + HAR^2} \quad (6.18)$$

$$A = T_g HA_{yatak}R^2 + 4T_g HA_{yatak}RkR_T + 8T_g k - 8kT_\infty - 4HA_{yatak}T_{FDM}RkR_T - 2HA_{yatak}T_{FDM}R^2 + HA_{yatak}R^2T_\infty \quad (6.19)$$

$$B = 4R^2 HA_{yatak}k + (Ru_\infty c_p \rho \epsilon)^2 + 4RkR_T(u_\infty c_p \rho \epsilon)^2 + 16RHA_{yatak}k^2R_T + 32k^2 \quad (6.20)$$

$$C = \left[(4\epsilon\rho c_p u_\infty RkR_T)^2 + 8RkR_T(\epsilon\rho c_p u_\infty R^2)^2 + (\epsilon\rho c_p u_\infty R^2)^2 \right. \\ \left. + 128k^3RR_T + 4HA_{yatak}R^4k + 64HA_{yatak}k(RkR_T)^2 \right. \\ \left. + 32k^2R^2 + 32HA_{yatak}R^3k^2R_T \right]^{1/2} \quad (6.21)$$

$$D = HA_{yatak}R^2 + 4HA_{yatak}RkR_T + 8k \quad (6.22)$$

$$E = Rk(4kR_T + R) \quad (6.23)$$

$$F = 4\epsilon\rho c_p u_\infty RkR_T + \epsilon\rho c_p u_\infty R^2 \quad (6.24)$$

Bir Boyutlu Isı Geçişi Denkleminin Radyal Yöndeki Sıcaklığın Lineer Değiştiği Kabul Edilmesi Durumundaki Çözümü

$$T_c(z) = (c_7 e^{\lambda_5 z} - c_7 + T_g) e^{-\lambda_5 z} \quad (6.25)$$

$$c_7 = \frac{6kT_\infty + 3HA_{yatak}T_{FDM}RkR_T + 3HA_{yatak}T_{FDM}R^2 - 2HA_{yatak}R^2T_\infty}{6k + 3HA_{yatak}RkR_T + HA_{yatak}R^2} \quad (6.26)$$

$$\lambda_5 = \frac{6k + 3HA_{yatak}RkR_T + HA_{yatak}R^2}{R\epsilon\rho c_p u_\infty (3kR_T + R)} \quad (6.27)$$

Bir Boyutlu Isı Geçişi Denkleminin Radyal Yöndeki Sıcaklığın Parabolik Değiştiği Kabul Edilmesi Durumundaki Çözümü

$$T_c(z) = (c_8 e^{\lambda_6 z} - c_8 + T_g) e^{-\lambda_6 z} \quad (6.28)$$

$$c_8 = \frac{8kT_\infty + 4HA_{yatak}T_{FDM}RkR_T + 2HA_{yatak}T_{FDM}R^2 - HA_{yatak}R^2T_\infty}{8k + 4HA_{yatak}RkR_T + HA_{yatak}R^2} \quad (6.29)$$

$$\lambda_6 = \frac{8k + 4HA_{yatak}RkR_T + HA_{yatak}R^2}{R\epsilon\rho c_p u_\infty (4kR_T + R)} \quad (6.30)$$

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Doğan Erdemir
 Uyuğu : Türkiye (T.C.)
 Doğum Tarihi ve Yeri : 26 Mart 1987, Kayseri
 Medeni Durumu : Evli
 Tel : +90 352 207 66 66 - 32111
 Fax : +90 352 437 57 84
 email : erdemir@erciyes.edu.tr
 Yazışma Adresi : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
 Makine Mühendisliği Bölümü 38039 Melikgazi/Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	ERÜ. Makine Mühendisliği Bölümü	2010
Yüksek Lisans	ERÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
Haziran 2010 - Şubat 2011	Kuvvet Makine	ARGE Sorumlusu
Şubat 2011 - Devam Ediyor	ERÜ. Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
Mayıs 2013 - Mayıs 2014	MEDİSEM Medikal	ARGE Mühendisi
Mayıs 2014 - Mayıs 2015	ERD Teknoloji	ARGE Mühendisi
Mayıs 2015 - Devam Ediyor	Zeytin Mühendislik	Proje Yürütücüsü

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

A. TEZ ÇALIŞMASINDAN YAPILAN BİLİMSEL YAYINLAR

1. Erdemir D., Altuntop N., Al-Bayati A.J., "A CFD Based Thermo-Hydraulic Performance Analyses of Different Spherical Capsules Using in Ice Thermal Storage System", 3. International Conference on Engineering and Natural Sciences, Budapest, MACARISTAN, 3-7 Mayıs 2017, pp.1-6.
2. Erdemir D., Altuntop N., "A Review on The Economic Impact of Ice Thermal Energy Storage System", 7. International 100% Renewable Energy Conference (IRENEC2017), İSTANBUL, TÜRKİYE, 18-20 Mayıs 2017, pp.86-93.
3. Erdemir D., Altuntop N., "Effect of Encapsulated Ice Thermal Storage System on the Cooling Cost for a Hypermarket", 9. International Exergy, Energy and Environment Symposium, Split, HIRVATISTAN, 14-17 Mayıs 2017, pp.1073-1079. (Bu çalışma "International Journal of Energy Research" dergisinin özel sayısı için seçilmiştir.)
4. Erdemir D., Altuntop N., "Thermodynamic and Economic Analysis of Ice Thermal Energy Storage System in a Shopping Center", 8th International Ege Energy Symposium (IEESE), AFYON, TÜRKİYE, 11-13 Mayıs 2016, pp.269-276.
5. Erdemir D., Altuntop N., "Effect of Ice Thermal Energy Storage System on Cooling Cost in a Shopping Center", 12th International HVAC+R & Sanitary Technology Symposium, İSTANBUL, TÜRKİYE, 31 Mart - 2 Nisan 2016, vol.1, no.1, pp.334-340.
6. Erdemir D., Altuntop N., "Thermodynamic, Heat Transfer and Fluid Flow Analyses of Encapsulated Ice Thermal Storage System Used in A Shopping Center. ISBN:978-605-83575-0-1", 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016), Sarajevo, BOSNA HERSEK, 24-28 Mayıs 2016, pp.2915-2922.

B. SCI, SSCI, AHCI İNDEKSLERİNE GİREN DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

1. Erdemir D., Altuntop N., "Effect of thermal stratification on energy and exergy in vertical mantled heat exchanger", INTERNATIONAL JOURNAL OF EXERGY, vol.20, pp.105-121, 2016.
2. Erdemir D., Altuntop N., "Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks", APPLIED THERMAL ENGINEERING, vol.100, pp.20-29, 2016.
3. A. T., Erdemir D., Özkan Ö.T., "An Investigation for Predicting to The Effect of Green Roof Utilization on Temperature Decreasing over the Roof Surface with Gene Expression Programming, In Press, Accepted Manuscript ", ENERGY AND BUILDINGS, vol.1, pp.1-10, 2017.
4. Erdemir D., A. T., "Prediction of temperature decreasing on a green roof by using artificial neural network", APPLIED THERMAL ENGINEERING, vol.112, pp.1317-1325, 2017.

C. ULUSLARARASI HAKEMLİ KONGRE/SEMPZYUMLARIN BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR

1. Erdemir D., Altuntop N., Al-Bayati A.J., "A CFD Based Thermo-Hydraulic Performance Analyses of Different Spherical Capsules Using in Ice Thermal Storage System", 3. International Conference on Engineering and Natural Sciences, Budapest, MACARISTAN, 3-7 Mayıs 2017, pp.1-6.
2. Erdemir D., Altuntop N., "Prediction of Temperature Decreasing on a Green Roof by Using ANN: Budapest Example", 3. International Conference on Engineering and Natural Sciences, Budapest, MACARISTAN, 3-7 Mayıs 2017, pp.1-7.
3. Erdemir D., Altuntop N., "An Experimental Investigation on Augmented Thermal Stratification with Obstacles ", 3. International Conference on

Engineering and Natural Sciences, Budapest, MACARISTAN, 3-7 Mayıs 2017, pp.1-8.

4. Erdemir D., Altuntop N., "Thermodynamic Analysis of Sensible Thermal Energy Storage into PET Bottles Filled with Water", 9. International Exergy, Energy and Environment Symposium, Split, HIRVATISTAN, 14-17 Mayıs 2017, pp.634-639. (Bu çalışma "International Journal of Exergy" dergisinin özel sayısı için seçilmiştir.)
5. Altuntop N., Erdemir D., "Development of Solar Energy Market, Industry and Utilization in Turkey", 7. International 100% Renewable Energy Conference (IRENEC2017), İSTANBUL, TÜRKİYE, 18-20 Mayıs 2017, pp.156-163.
6. Erdemir D., Altuntop N., "A Review on The Economic Impact of Ice Thermal Energy Storage System", 7. International 100% Renewable Energy Conference (IRENEC2017), İSTANBUL, TÜRKİYE, 18-20 Mayıs 2017, pp.86-93.
7. Erdemir D., Altuntop N., "Effect of Encapsulated Ice Thermal Storage System on the Cooling Cost for a Hypermarket", 9. International Exergy, Energy and Environment Symposium, Split, HIRVATISTAN, 14-17 Mayıs 2017, pp.1073-1079.
8. Erdemir D., Altuntop N., "Numerical Investigation on Determining the Effect of D/L Ratio on Thermal Performance of the Horizontal Mantled Hot Water Tank ", 3. International Conference on Engineering and Natural Sciences, Budapest, MACARISTAN, 3-7 Mayıs 2017, pp.1-7.
9. Ayata T., Erdemir D., Özkan Ö.T., "Artificial Neural Networks Versus Genetic Programming for Estimating Temperature Decrease in Green Roof", International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16), KİLİS, TÜRKİYE, 19-20 Mart 2016, vol.1, no.1, pp.2196-2202.
10. Erdemir D., Altuntop N., "Thermodynamic and Economic Analysis of Ice Thermal Energy Storage System in a Shopping Center", 8th International Ege Energy Symposium (IEESE), AFYON, TÜRKİYE, 11-13 Mayıs 2016, pp.269-276.

11. Erdemir D., Altuntop N., "Thermodynamic, Heat Transfer and Fluid Flow Analyses of Encapsulated Ice Thermal Storage System Used in A Shopping Center. ISBN:978-605-83575-0-1", 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016), Sarajevo, BOSNA HERSEK, 24-28 Mayıs 2016, pp.2915-2922.
12. Erdemir D., Altuntop N., "Effect of Ice Thermal Energy Storage System on Cooling Cost in a Shopping Center", 12th International HVAC+R & Sanitary Technology Symposium, İSTANBUL, TÜRKİYE, 31 Mart - 2 Nisan 2016, vol.1, no.1, pp.334-340.
13. Turgut B., Erdemir D., Altuntop N., "EXAMINATION OF MECHANICAL AND THERMAL VARIATIONS CAUSED BY THE IMPLANTOLOGY IN THE JAWBONE", 2th International Conference on Advanced in Mechanical Engineering, İSTANBUL, TÜRKİYE, 10-13 Mayıs 2016, vol.1, no.1, pp.788-795.
14. Ayata T., Erdemir D., "Investigation of Temperature Decreasing on Roof in Green Roof Systems with Artificial Neural Network – Comparison of Athens and İzmir", Global Conference on Global Warming, Athens, YUNANISTAN, 24-27 Mayıs 2015, pp.1-6.
15. Erdemir D., Altuntop N., "Numerical Investigation On Effect Of Inlet And Outlet Positions On Thermal Stratification In Vertical Hot Water Tank", CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, İSTANBUL, TÜRKİYE, 13-15 Mayıs 2015, vol.1, no.1, pp.747-751.
16. Ayata T., Erdemir D., "EFFECT OF GREEN ROOF SYSTEMS ON THE TEMPERATURE DECREASE OF ROOFS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS – ŞANLIURFA EXAMPLE", 2. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENT AND MORALITY, ADIYAMAN, TÜRKİYE, 24-26 Ekim 2014, vol.ISEM2014, no.140, pp.879-889.
17. Altuntop N., Erdemir D., "Developments Of Solar Energy Industry And Utilization In Turkey", 2. International 100% Renewable Energy Conference and Exhibition (IRENEC 2012), TÜRKİYE, 28-30 June 2012, pp.211-216.
18. Güneş S., Erdemir D., Özceyhan V., Altuntop N., "NUMERICAL

INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF A TUBE FITTED WITH REGULARLY SPACED TWISTED TAPE ELEMENTS", ASME Summer Heat Transfer Conference (SHTC), Rio Grande, PORTO RIKO, 8-12 Temmuz 2012, pp.61-69.

19. Güneş S., Erdemir D., Özceyhan V., Altuntop N., "Numerical Investigation Of Thermal Performance Of A Tube Fitted With Regularly Spaced Twisted Tape Elements", ASME Heat Transfer Coference 2012 (HT-2012), PORTO RIKO, 8-12 July 2012.
20. Altuntop N., Erdemir D., "Investigating The Development Of Solar Energy Systems Market In Turkey", International 100% Renewable Energy Confrance and Exhibition (IRENEC), TÜRKİYE, 6-8 Ekim 2011, pp.200-208.

D. ULUSAL HAKEMLİ KONGRE/SEMPOZYUMLARIN BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR

1. Erdemir D., Altuntop N., "Türkiye’de Güneş Enerjisinin Gelişimi Ve Bugünkü Durumu", VI. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, KAYSERİ, TÜRKİYE, 21-22 Ekim 2011, ss.235-246.
2. Altuntop N., Erdemir D., "Türkiye’de Güneş Enerjisi Isıl Sistemlerinin Mevcut Pazarı Ve Gelişiminin İncelenmesi", 5. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, MERSİN, TÜRKİYE, 7-5 Ekim 2011, ss.15-22.
3. Altuntop N., Erdemir D., "Türkiye’de Isıl Ve Elektrik Enerjisi Açısından Güneş Enerjisi Sektörünün Gelişimi Ve Bugünkü Durumu", 18. International Energy and Environment Fair and Confrance (ICCI 2012), TÜRKİYE, 25-27 Nisan 2012, pp.137-140.
4. Erdemir D., Altuntop N., "Düzlemsel Güneş Kolektörlerinin Panel Yapılarının Sıcak Su Üretimine Etkisinin İncelenmesi", 2. Anadolu Enerji Sempozyumu, DİYARBAKIR, TÜRKİYE, 2-4 Mayıs 2013, ss.183-190.
5. Erdemir D., Altuntop N., Pekdemir İ.Z., "Düşey Mantolu Sıcak Su Tanklarında Sıcaklık Tabakalaşmasının Engeller Aracılığı Ile

İyileştirilmesinin Sayısal Olarak İncelenmesi", 2. Anadolu Enerji Sempozyumu, DİYARBAKIR, TÜRKİYE, 2-4 Mayıs 2013, ss.356-368.

D. DİĞER DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

1. Altuntop N., Erdemir D., "Dünyada ve Türkiye’de Güneş Enerjisi ile İlgili Gelişmeler", Mühendis ve Makina, cilt.54, ss.69-77, 2013.

