

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

**BUZDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ISI  
POMPASINDA ISI KAYNAĞI OLARAK  
KULLANILMASININ TERMODİNAMİK VE EKONOMİK  
AÇIDAN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan  
Merve BULUT**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Mart 2021  
KAYSERİ**



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

**BUZDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ISI  
POMPASINDA ISI KAYNAĞI OLARAK  
KULLANILMASININ TERMODİNAMİK VE EKONOMİK  
AÇIDAN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan  
Merve BULUT**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR**

**Mart 2021  
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.

MERVE BULUT

**“Buzda Enerji Depolama Sistemlerinin Isı Pompasında Isı Kaynağı Olarak Kullanılmasının Termodinamik ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi”** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Hazırlayan**

Merve BULUT

**Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR

**Makina Mühendisliği ABD Başkanı**

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

**Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR** danışmanlığında **Merve BULUT** tarafından hazırlanan “**Buzda Enerji Depolama Sistemlerinin Isı Pompasında Isı Kaynağı Olarak Kullanılmasının Termodinamik ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makina Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

/ / 2021

**JÜRİ:**

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR .....

Üye : Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP .....

Üye : Doç. Dr. Mevlüt ARSLAN .....

**ONAY:**

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

..... / ..... / .....

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

“Buzda Enerji Depolama Sistemlerinin Isı Pompasında Isı Kaynağı Olarak Kullanılmasının Termodinamik ve Ekonomik Açıdan İncelenmesi” başlıklı tez çalışmamda çalışmalarımı yönlendirmesinde, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar insani ilişkilerde de sonsuz desteğiyle gelişmeye katkıda bulunan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR’e verdiği maddi ve manevi tüm destekler için teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecimde bana destek olan her türlü yardımı esirgemeyen arkadaşlarım Yusuf YILMAZ ve Ebru GÜÇLÜ’ ye teşekkür ederim.

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, her zaman arkamda duran, maddi ve manevi destek veren aileme özellikle de sevgili annem, babam ve biricik kız kardeşime teşekkür ederim. Hayatımın her alanında olduğu gibi, tez çalışmamı hazırlarken de her aşamada bana destek olan sevgili eşim Emre BULUT ’a sonsuz teşekkür ederim.

Merve BULUT

Mart 2021, KAYSERİ

# **BUZDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ISI POMPASINDA ISI KAYNAĞI OLARAK KULLANILMASININ TERMODİNAMİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

**Merve BULUT**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi, Mart 2021  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Doğan ERDEMİR**

## **ÖZET**

Buzda enerji depolama (BED) sistemleri, gece tarifiesi saatlerinde buz üretilip, üretilen buzları elektrikriğin pahalı olduğu gündüz ve puant tarife dönemlerinde kullanarak soğutma yaparak binaların klima işletme maliyetlerini önemli ölçüde düşürebilmektedir. Ayrıca elektriği ısı olarak depolamanın en yaygın uygulamalarından biridir. BED sistemleri amacı gereği sadece yaz aylarında soğutma ihtiyacı olduğu zaman kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, sadece soğutma yüklerini depolamak için kullanılan BED sistemlerinin, ısıtma için kış aylarında bir ısı pompasının enerji kaynağı olarak kullanılabilirliği termodinamik ve ekonomik olarak incelenmiştir. BED entegre klima ve ısı pompası sistemi, İstanbul yer alan bir ofis binası için uygulanmıştır. İlk olarak sistem termodinamik açıdan incelenmiş ve ardından ekonomik açıdan değerlendirilmiştir.

Termodinamik analizler enerji ve ekserji hesaplamaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yaz dönemi tüm sistem için enerjetik ve ekserjetik COP değerleri sırasıyla 2,03 ve 0,86 olarak hesaplanırken, kış dönemi için bu değerler 3,70 ve 1,90 olarak hesaplanmıştır. Sistemdeki en yüksek ekserji yokoluşları enerji boşaltma periyodunda görülmüştür. BED sistemlerinden en yüksek fayda gece ve gündüz dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkın en yüksek olduğu durumlarda elde edilmektedir. Ekonomik çalışmalardan; 10 yılın sonunda BED sistemi ile soğutma yapıldığında 31,184,519 TL’lik bir tasarruf sağlanabileceği ve sistemin geri ödeme süresinin 3 yıl olduğu hesaplanmıştır. Isı pompası entegre BED sistemi ile hem ısıtma hem de soğutma yaptığımızda 10 yıl sonunda 15,728,890 TL’lik bir tasarruf sağlanacağı ve sistemin geri ödeme süresinin yaklaşık 5 yıl olduğu hesaplanmıştır. Sonuçlar BED sistemlerinin ısı pompası düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak kullanılmasında umut verici bulgular sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Buzda ısı enerji depolama, Buz depolama, Isı pompası, COP

# **THERMODYNAMIC AND ECONOMIC INVESTIGATION OF THE USE OF ICE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS AS THE HEAT SOURCE IN HEAT PUMP**

**Merve BULUT**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Master Thesis, March 2021**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Doğan ERDEMİR**

## **ABSTRACT**

Ice storage systems (ice-SS) can significantly reduce the operating costs of ACs using the buildings by producing ice during off-peak tariffs and using the produced ices during mid-peak and peak tariff periods when electricity is expensive. It is also one of the most common applications of storing electricity as heat. Ice-SS are generally used only when there is a need for cooling in the summer months. In this work, the use of ice-SS, which are used only to store cooling loads, as an energy source of a heat pump for heating in winter, has been investigated thermodynamically and economically. The proposed ice-SS integrated AC and heat pump system has been applied for an office building in Istanbul. First, the system was examined thermodynamically and then evaluated economically.

Thermodynamic analyses were carried out by energy and exergy calculations. While the energetic and exergetic COP values for the entire system in the summer period were calculated as 2.03 and 0.86, respectively, these values were calculated as 3.70 and 1.90 for the winter period. The highest exergy destructions were observed in the energy discharging period. Ice-SS was provided better performance when the difference between day and night outdoor temperatures was higher. At the end of economic studies, at the end of 10 years, it was calculated that the saving of 31,184,519 TL could be achieved and the payback period of the system was 3 years when the cooling was performed with the ice-SS. It was calculated that a savings of 15,728,890 TL could be achieved and the payback period of the system was approximately 5 years when both heating and cooling are performed with ice-SS integrated systems. Results have presented promising findings to use the ice-SS as the low-temperature energy source.

**Keywords:** Ice thermal energy storage, Ice storage, Heat pump, COP

## İÇİNDEKİLER

### BUZDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN ISI POMPASINDA ISI KAYNAĞI OLARAK KULLANILMASININ TERMODİNAMİK VE EKONOMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

|                              |      |
|------------------------------|------|
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK..... | ii   |
| YÖNERGEYE UYGUNLUK.....      | iii  |
| KABUL VE ONAY .....          | iv   |
| TEŞEKKÜR .....               | v    |
| ÖZET.....                    | vi   |
| ABSTRACT .....               | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....            | viii |
| KISALTMALAR .....            | xi   |
| SİMGELER .....               | xii  |
| TABLolar LİSTESİ.....        | xiii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....        | xv   |
| GİRİŞ .....                  | 1    |

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Araştırmanın Tanımı, Motivasyonu ve Amacı.....               | 3  |
| 1.2. Araştırmanın Önemi ve Gerekliliği.....                       | 4  |
| 1.3. Enerji Depolama Nedir? .....                                 | 6  |
| 1.3.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Prensipleri.....     | 7  |
| 1.4. Isıl Enerji Depolama .....                                   | 9  |
| 1.4.1. Isıl Enerji Depolamanın Temel Çalışma Prensipleri .....    | 10 |
| 1.4.2. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması ..... | 11 |
| 1.4.3. Isıl Enerji Depolamanın Türleri .....                      | 12 |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 1.4.3.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama .....    | 12        |
| 1.4.3.2. Gizli Isıl Enerji Depolama .....      | 13        |
| 1.4.3.3. Faz değiştiren malzemeler (FDM) ..... | 13        |
| <b>1.5. Soğuk Isıl Enerji Depolama .....</b>   | <b>15</b> |
| <b>1.6. Buzda Enerji Depolama (BED).....</b>   | <b>16</b> |
| 1.6.1. Statik BED Sistemleri .....             | 17        |
| 1.6.1.2. Kapsüllü BED sistemleri .....         | 18        |
| 1.6.2. Dinamik BED sistemleri .....            | 19        |
| 1.6.2.1. Buz Hasatı BED sistemleri .....       | 19        |
| 1.6.2.2. Buz amuru BED sistemleri.....        | 20        |
| <b>1.7. Literatür Taraması .....</b>           | <b>21</b> |

## 2. BÖLÜM

### YÖNTEM VE MATERYAL

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.1. Ofis Binasının ve Mahallin Tanıtımı .....</b>                  | <b>43</b> |
| <b>2.2. Çalışmada Kullanılan Mahalin Elektrik Tarife Bilgisi .....</b> | <b>46</b> |
| <b>2.3. Ofis Binasında Kullanılan BED Sisteminin Detayları .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>2.4. Termodinamik Analizler .....</b>                               | <b>53</b> |
| 2.4.1. Kütle Dengesi .....                                             | 54        |
| 2.4.2. Enerji Dengesi.....                                             | 54        |
| 2.4.3. Entropi Dengesi .....                                           | 55        |
| 2.4.4. Ekserji Dengesi .....                                           | 56        |
| 2.4.5. BED Sisteminin Termodinamik Analizi .....                       | 56        |

## 3. BÖLÜM

### BULGULAR ve TARTIşMA

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1. Termodinamik Analiz Sonuçları .....</b>                             | <b>65</b> |
| 3.1.1. Sistemin Termodinamik Açıdan Değerlendirilmesi .....                 | 65        |
| 3.1.2. Termodinamik Parametrik Çalışma Sonuçları.....                       | 69        |
| <b>3.2. Buz Depolama Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi .....</b> | <b>72</b> |

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1. Yaz Dönemi için BED Sisteminin Soğutma Amaçlı Kullanıldığı Durumda Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi .....           | 72        |
| 3.2.2. BED Sisteminin Isı Pompası Sistemine Entegre Edilmesi Durumunda Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi .....              | 76        |
| 3.2.3. BED Sisteminin Soğutma ve Isıtma Amaçlı Kullanımının Bütün Bir Yıl Üzerinden Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi ..... | 79        |
| <b>3.3. Sistemin Farklı BED Kullanım Stratejilerinin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi .....</b>                            | <b>81</b> |
| 3.3.1. BED Kullanım Stratejileri .....                                                                                      | 82        |
| 3.3.2. Farklı BED Stratejilerinin İlk Yatırım Maliyeti .....                                                                | 88        |

#### 4. BÖLÜM

#### SONUÇLAR ve ÖNERİLER

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>KAYNAKÇA .....</b> | <b>98</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>  | <b>106</b> |

## KISALTMALAR

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| BED   | : Buzda enerji depolama                 |
| BSD   | : Buzda soğukluk depolama               |
| ITES  | : Ice thermal energy storage            |
| ED    | : Enerji depolama                       |
| HX    | : Isı değıştirici                       |
| TED   | : Termal enerji depolama                |
| TES   | : Termal enerji depolama                |
| CTES  | : Ice thermal energy storage            |
| SED   | : Soğuk enerji depolama                 |
| PVC   | : Polivinil klorür                      |
| ITA   | : Isı transfer akışkanı                 |
| TD1K  | : Termodinamiğin birinci kanunu         |
| TD2K  | : Termodinamiğin ikinci kanunu          |
| KH    | : Kontrol hacmi                         |
| GED   | : Gizli enerji depolama                 |
| COP   | : Performans katsayısı                  |
| HTF   | : Heat transfer fluid                   |
| PHE   | : Plakalı ısı eşanjörü                  |
| ITSS  | : Buz termal depolama sistemi           |
| CIST  | : Kapalı buz depolama tankı             |
| OIST  | : Açık buz depolama tankı               |
| DRQAT | : Talep tepki hızlı değeriendirme aracı |
| HVAC  | : Isıtma, soğutma ve havalandırma       |
| PCM   | : Faz değıştiren malzeme                |
| FDM   | : Faz değıştiren malzeme                |

## SİMGELER

| Sembol            | Anlamı                          | Birimi                 |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|
| $m$               | Kütle                           | kg                     |
| $\dot{m}$         | Kütleli debi                    | kg/s                   |
| $\Delta T$        | Sıcaklık değişimi               | $^{\circ}\text{C}$ , K |
| $\rho$            | Yoğunluk                        | $\text{kg}/\text{m}^3$ |
| $c_p$             | Özgül ısı                       | J/kgK                  |
| $Q$               | Depolanan ısı                   | kW                     |
| $\dot{Q}_{kayıp}$ | Kayıbolan ısı                   | kW                     |
| $\dot{Q}$         | Isı kazancı                     | kW                     |
| $V$               | Hacim                           | $\text{m}^3$           |
| $W_{comp}$        | Kompresör gücü                  | kW                     |
| $T$               | Sıcaklık                        | $^{\circ}\text{C}$ , K |
| $T_0$             | Çevre sıcaklığı                 | $^{\circ}\text{C}$ , K |
| $T_E$             | Evaporatör sıcaklığı            | $^{\circ}\text{C}$ , K |
| $T_C$             | Kondenser sıcaklığı             | $^{\circ}\text{C}$ , K |
| $W_{pompa}$       | Pompa gücü                      | kW                     |
| $e$               | Birim kütle için enerji miktarı | kW/kg                  |
| $E$               | Enerji miktarı                  | kW                     |
| $s$               | Özgül entropi                   | kW/kg                  |
| $S$               | Entropi miktarı                 | kW                     |
| $ex$              | Özgül enerji                    | kW/kg                  |
| $E_x$             | Ekserji miktarı                 | kW                     |
| $h$               | Özgül entalpi                   | kW/kg                  |
| $I$               | Ekserji yıkımı                  | kW                     |
| COP               | Performans Katsayısı            | -                      |
| $t, t_{ch}$       | Zaman                           | saat                   |
| $\eta$            | Enerji verimi                   | -                      |
| $\Psi$            | Ekserji verimi                  | -                      |

## TABLOLAR LİSTESİ

|             |                                                                                         |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.1.  | Duyulur Isı Depolamada Kullanılan Bazı Malzemelerin 20°C'deki Isıl Kapasiteleri.....    | 12 |
| Tablo 1.2.  | FDM'lerin Depolama Türleri .....                                                        | 15 |
| Tablo 2.1.  | Ofis Binasının Saatlik Soğutma ve Isıtma Pik Yükleri .....                              | 44 |
| Tablo 2.2.  | İstanbul İline Ait 1929-2019 Yılları Arasındaki Meteorolojik Veriler[87]                | 45 |
| Tablo 2.3.  | Ofis Binasında Kullanılan Üçlü Tarife Elektrik Birim Fiyatları .....                    | 47 |
| Tablo 2.4.  | Yaz Modu-Buz Yapma Periyodu Denge Denklemleri .....                                     | 58 |
| Tablo 2.5.  | Yaz Modu-Buz Eritme Periyodu Denge Denklemleri.....                                     | 59 |
| Tablo 2.6.  | Yaz Modu-Normal Soğutma Periyodu Denge Denklemleri.....                                 | 60 |
| Tablo 2.7.  | Kış Modu-Buz Yapma Periyodu Denge Denklemleri .....                                     | 61 |
| Tablo 2.8.  | Kış Modu-Buz Eritme Periyodu Denge Denklemleri.....                                     | 62 |
| Tablo 2.9.  | Sistemin COP (Performans Katsayısı) ve Verim Denklemleri.....                           | 63 |
| Tablo 2.10. | Tüm sistemin yaz ve kış dönemleri için COP ve verim denklemleri .....                   | 64 |
| Tablo 3.1.  | Isı Pompası Entegre Sistemin Termodinamik Durumları ve Özellikleri....                  | 66 |
| Tablo 3.2.  | Bina için COP ve Verim Değerleri .....                                                  | 67 |
| Tablo 3.3.  | Farklı Dış Ortam Sıcaklıkları için COP Değerleri.....                                   | 69 |
| Tablo 3.4.  | Tüm Sistemin Farklı Dış Ortam Sıcaklıkları için COP Değerleri .....                     | 70 |
| Tablo 3.5.  | Soğutma Elektrik Tüketim Bedeli Hesabı .....                                            | 73 |
| Tablo 3.6.  | Binada Bulunan BED Sistemi Amortisman Süresi Tablosu.....                               | 74 |
| Tablo 3.7.  | Isıtma Sisteminin Üçlü Tarifedeki Elektrik Tüketim Bedeli .....                         | 77 |
| Tablo 3.8.  | Binada Kullanılan Doğalgaz ile Isıtma Tüketim Bedeli Hesabı.....                        | 78 |
| Tablo 3.9.  | Isıtma Elektrik Tüketim Bedeli Hesabı .....                                             | 79 |
| Tablo 3.10. | Ofis Binasında Isıtma Zararı ile BED Sistemi Amortisman Süresi Tablosu .....            | 80 |
| Tablo 3.11. | Çalışmada Kullanılan Stratejilerin Enerji Depolama Miktarları .....                     | 84 |
| Tablo 3.12. | Normal Soğutma ve 12 Farklı BED Stratejilerinin Saatlik Chiller Kullanımı .....         | 86 |
| Tablo 3.13. | Normal Soğutma ve 12 Farklı BED Stratejilerinin Saatlik Elektrik Tüketim Maliyeti ..... | 87 |
| Tablo 3.14. | Binada Kullanılan BED ve Sistem Ekipmanlarının İlk Yatırım Maliyeti ...                 | 89 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.15. Farklı BED Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetleri ..... | 90 |
| Tablo 3.16. Günlük, Haftalık ve Yıllık Elektrik Tüketim Maliyetleri .....       | 91 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Dünya'daki Elektrik Tüketiminin Yıllar İçinde Değişimi [4].....                                                              | 2  |
| Şekil 1.2. Enerji Depolama Metotlarının Sınıflandırılması .....                                                                         | 7  |
| Şekil 1.3. Soğuk Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Periyotları.....                                                                 | 8  |
| Şekil 1.4. Sıcak Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Periyotları .....                                                                | 8  |
| Şekil 1.5. Su için Duyulur ve Gizli Isı Değişimi Miktarları .....                                                                       | 13 |
| Şekil 1.6. Boru Üzerindeki Buzlanma BED Sistemlerinin Şematik Gösterimi [8] .....                                                       | 18 |
| Şekil 1.7. Kapsüllü BED Sistemlerinin Şematik Gösterimi.....                                                                            | 19 |
| Şekil 1.8. Buz Hasatı BED Sisteminin Şematik Gösterimi.....                                                                             | 20 |
| Şekil 1.9. Buz Çamuru BED Sisteminin Şematik Gösterimi .....                                                                            | 21 |
| Şekil 2.1. BED Sisteminin Saatlik Soğutma Yüğü Miktarlarının Gösterimi.....                                                             | 46 |
| Şekil 2.2. BED Sisteminin Saatlik Isıtma Yüğü Miktarlarının Gösterimi .....                                                             | 46 |
| Şekil 2.3. Binada Kullanılan Elektrığın Birim Fiyatının Grafikselsel Gösterimi a) Üçlü<br>Tarife b) Tekli Tarife .....                  | 47 |
| Şekil 2.4. Soğutma Sisteminin Yaz Mevsimi için Buz Yapma Modundaki Şematik<br>Gösterimi.....                                            | 49 |
| Şekil 2.5. Soğutma Sisteminin Yaz Mevsimi için Buz Eritme Modundaki Şematik<br>Gösterimi.....                                           | 50 |
| Şekil 2.6. Soğutma Sisteminin Yaz Mevsimi için Normal Soğutma Modundaki Şematik<br>Gösterimi.....                                       | 51 |
| Şekil 2.7. Soğutma Sisteminin Kış Mevsimi için Buz Yapma Modundaki Şematik<br>Gösterimi.....                                            | 52 |
| Şekil 2.8. Soğutma Sisteminin Kış Mevsimi için Buz Eritme Modundaki Şematik<br>Gösterimi.....                                           | 53 |
| Şekil 3.1. Farklı Dış Ortam Sıcaklıklarıyla COP'nin değişimi.....                                                                       | 71 |
| Şekil 3.2. Farklı Dış Ortam Sıcaklıklarıyla ekserjetik COP değişimi.....                                                                | 71 |
| Şekil 3.3. Ofis Binasında Bulunan BED Sistemi için Yatırımın Geri Ödeme Süresi ve<br>10 Yıl Boyunca Elde Edilecek Kâr Miktarı .....     | 75 |
| Şekil 3.4. Binada Isıtma Dezavantajlı BED Sistemi için Yatırımın Geri Ödeme Süresi<br>ve 10 Yıl Boyunca Elde Edilecek Kâr Miktarı ..... | 81 |

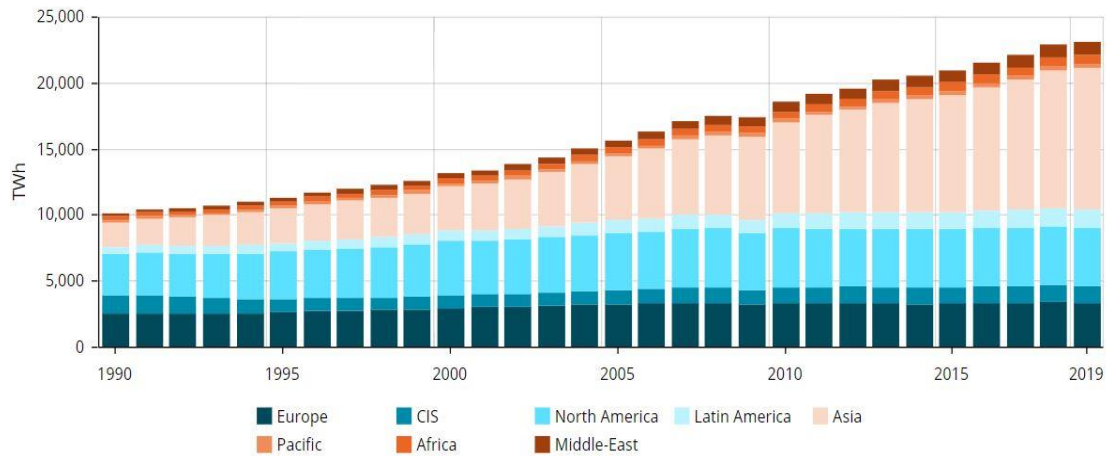
|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.5. Çalışmada Kullanılan BED Kullanım Stratejilerinin Saatlik Soğutma Grubu Yükleri.....                                         | 83 |
| Şekil 3.6. Çalışmada Kullanılan BED Kullanım Stratejilerinin Saatlik Soğutma Grubu Kullanımı.....                                       | 83 |
| Şekil 3.7. Farklı BED Kullanım Stratejilerinin Tasarruf Yüzde Grafiği .....                                                             | 85 |
| Şekil 3.8. BED Farklı Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetleri ve Ekstra Yatırım Tutarları.....                               | 91 |
| Şekil 3.9. Günlük, Haftalık ve Yıllık Elektrik Tüketim Maliyetleri .....                                                                | 92 |
| Şekil 3.10. Farklı BED Kullanım Stratejileri için Geri Ödeme Süreleri ve 10 Yılın Sonundaki Kâr Miktarı.....                            | 92 |
| Şekil 3.11. Farklı BED Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetlerinin ve 10 Yılın Sonunda Kâr Miktarının Karşılaştırılması ..... | 93 |

## GİRİŞ

Enerji tüketiminin küresel ölçekte sürekli olarak artması ve hidrokarbon esaslı enerji kaynaklarının sınırlı rezervleri, günümüzde ciddi enerji arz ve güvenliği problemlerine neden olmakta ve küresel ısınma, karbon salınımı gibi olumsuz çevresel etkilere yol açmaktadır [1]. Dünyadaki toplam enerji tüketiminin 2005 ile 2030 arasında %50 artması beklenmektedir [2]. Enerji tüketimindeki artış ile birlikte karbon salınımı da önemli ölçüde artacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanımıyla enerji talebini etkin bir şekilde yönetmek ve enerji arzını artırmak için ileri teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması önemlidir. Yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen faydalı çıktılardan artırılmasında ve var olan geleneksel sistemlerin daha etkin kullanılmasında enerji depolama sistemlerinin büyük potansiyeli vardır. Bu yüzden enerji depolama sistemlerinin enerji sistemlerine entegrasyonu önemli bir konudur.

Binalar dünya genelinde tüketilen enerjinin %30-40'ından sorumludur [3]. Binalarda tüketilen enerjinin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma amaçlı kullanıldığı için, binalar ve binalarda kullanılan ısıtma ve soğutma sistemleri en büyük enerji tükettiricilerinden biridir. Dünyadaki enerji tüketiminin 1990 ile 2019 yılları arasındaki değişimi Şekil 1.1.'de görülmektedir. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere, enerji tüketimi yıllar içerisinde ciddi bir miktarda artış göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 1.1.'den Amerika ve Avrupa için elektrik tüketimi 2010 yılından sonra çok değişmezken, Orta Doğu, Afrika ve Asya için ciddi bir artış görülmektedir. Enerji tüketimindeki artışa paralel olarak, son 10 yılda binalardaki elektrik tüketimi de büyük bir artış göstermiştir. Bu artışa; aşırı nüfus, binaların içinde uzun zaman geçirme, iç mekân hava kalitesinin artırma talepleri ve küresel ısınma neden olmuştur. Nüfus artışı, sosyal yaşam kalitesinin artması, fosil yakıtların azalması ve olumsuz çevresel etkenlerden dolayı, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve enerjiyi verimli kullanmaya olan ilgiler artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları doğaları gereği kararlı olmayan enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların etkin ve verimli kullanılması, kullanımda sürekliliğin sağlanması enerji depolama sistemleri ile mümkün olmaktadır. Ayrıca enerji maliyetlerini düşürmek için en etkili uygulamalardan biridir. Enerji depolama sistemleri sayesinde enerjinin ihtiyaç olduğu dönemle enerjinin üretildiği dönem arasındaki zaman uyumsuzluğu problemini çözer ve enerji kaynağından sürekli olarak yararlanmaya olanak sağlar. Başka bir deyişle, enerji arz ve talep profillerini dengelemeye yardımcı olur.



Şekil 1.1. Dünya'daki Elektrik Tüketiminin Yıllar İçinde Değişimi [4]

Bu tez çalışmasında, ilk olarak, enerji ve günümüz dünyasında giderek artan önemi hakkında bilgiler verilmektedir. Ardından enerji depolama ve termal enerji depolama sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kapsamlı bir literatür taramasından sonra bu tez çalışmasının amaç ve hedefleri tanıtılmıştır. Bölüm 1, enerji depolama sistemleri ve bunların önemli faydalarını, temel ilkeleri ve farklı ısı enerji depolama (IED) yöntemlerini ve soğuk IED'in avantajlarını içeren tanımları ve çeşitlerini ele almaktadır ve önceki çalışmalara genel bir bakış sunmaktadır. Bölüm 2, buzda enerji depolama (BED) sistemi ve mahal tanıtımı, çalışmada kullanılan mahalın elektrik tarife bilgisi ve son olarak sistemin termodinamik analiz yaklaşımı verilmiştir. Bölüm 3'te çalışmadan elde edilen bulgular neden ve sonuç ilişkileri içerisinde tartışılmıştır. Son olarak bölüm 4'te sistemin sonuçları ve öneriler sıralanmıştır.

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

#### 1.1. Araştırmanın Tanımı, Motivasyonu ve Amacı

Soğutma sistemleri günümüzde önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sebeple soğutma sistemleri kullanılan binalarda yüksek işletme maliyete neden olmaktadır. Buzda enerji depolama (BED) sistemi bu maliyeti düşürmek için kullanılabilecek etkin yöntemlerden biridir. Ancak BED sistemleri sadece soğutmanın ihtiyaç olduğu yaz aylarında kullanılmakta diğer aylar ise çalıştırılmamaktadır. Bu çalışmada, BED sistemlerinden elde edilen faydayı arttırmak için, BED sistemlerinin ısı pompası için enerji kaynağı olarak kullanılması araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında; İstanbul'da bir ofis binasının soğutma yükünün tamamamını depolamak için tasarlanan bir BED sisteminin, kışın ısı pompasının soğuk enerji kaynağı olarak kullanılması termodinamik ve ekonomik olarak incelenmiştir. BED sistemleri yaz aylarında soğutma grubu kullanımlarını gündüz saatlerinden gece saatlerine kaydırıldığından daha yüksek COP ile sistem kullanımına izin verebilmektedir. Isı pompası sistemlerinde ise düşük ısı kaynağı sıcaklığı daha yüksek COP sağlamaktadır. BED sistemlerinde BED sisteminin ısı depolama sıcaklığı (0 °C) dikkate alındığı zaman, yüksek COP ile ısı pompası kullanım potansiyeli sunmaktadır. Ancak diğer bir yandan, BED entegre ısı pompası sistemi hem buz yapmak hem de ısıtma için buz eritme sırasında çalışacağından bir dezavantajda beraberinde getirmektedir. Bu potansiyel avantaj ve dezavantajların kıyaslanması bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu kapsamda bu tez çalışmasında ilk olarak BED entegre klima ve ısı pompası sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. Ardından, sistem termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları

üzerinden değerlendirilmiştir. Sistemin ekonomik etkilerini incelemek için sadece soğutma amaçlı BED kullanımı, soğutma ve ısıtma amaçlı BED kullanımı durumları ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Sistemin geri ödeme süreleri, 10 yılın sonunda elde edilebilecek potansiyel kâr miktarı belirlenmiştir.

Ayrıca farklı BED kullanım stratejilerinin ekonomik performans üzerindeki etkisi ve farklı çalışma koşullarının COP üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 1.2. Araştırmanın Önemi ve Gerekliliği

Litetürde, enerji kaynaklarından daha yüksek verim ve daha az maliyet ile yararlanmak için çok sayıda yöntem tanıtılmıştır. Bu yöntemlerden ısı enerji depolama sistemleri en önemli ve etkili yöntemlerden biridir. Enerji depolama sistemleri aynı zamanda enerji arz ve talebi arasındaki tutarsızlığı gidermektedir ve enerji kullanımının yüksek ve pahalı olduğu dönemleri, pik dışı dönemlere kaydırmaya yardımcı olmaktadır. İyi bir ısı enerji depolama sistemi, depolanan enerjinin mümkün olan en az tersinmezlik ile kullanılmasına izin verirken, ısı kayıplarını en aza indirip ve enerji tasarrufunu maksimize etmelidir.

Isıl enerji depolama (IED), çoğunlukla ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılır ve bir depolama malzemesinin ısıtılması/soğutulması, eritilmesi/katılaştırılması ya da sıvılaştırıp/buharlaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Başka bir deyişle, enerji yükleme sırasında yapılan işleminin tam tersi gerçekleştirildiği zaman depolanan enerji kullanılabilir. Bu depolama işlemleri arasındaki seçim; gerçekleştirilecek depolama süresine, ekonomik koşullara, çalışma koşullarına ve diğer parametrelere bağlıdır.

Temel olarak, duyulur ısı enerji depolama ve gizli ısı enerji depolama olmak üzere iki tür IED sistemi vardır. Bu enerji depolama türlerinden hangisinin kullanılacağı, depolama malzemesi olarak hangi maddenin kullanılacağı; genellikle uygulamanın türüne ve sıcaklığına bağlıdır. Gizli ısı enerji depolama, duyulur enerji depolamaya göre sağladığı hacim avantajından dolayı uygulamada daha fazla tercih edilmektedir. Gizli ısı enerji depolama malzemelerin faz değişimine bağlıdır. Örnek olarak suyun buza dönüşümü ile enerji soğuk bir ortamda depolanabilir ve soğutmaya ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Gizli ısı enerji depolamanın sağladığı bu yüksek enerji depolama kapasitesi sayesinde

buz depolamalı soğutma sistemleri, su soğutmalı sistemlere göre çok büyük avantaja sahiptir.

Günümüzde soğutma insanlar için önemli bir ihtiyaçtır ve küresel ısınmanın da etkisiyle soğutma sistemlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Buna bağlı olarak, gün geçtikçe elektrik talebi de artmaktadır. Özellikle yaz aylarında soğutma sistemleri tam kapasite çalıştığı için büyük miktarda elektrik tüketmektedir. 4 Ağustos 2018 tarihinde Türkiye genelinde 977.530.860 kWh elektrik tüketimi ile tüm zamanların en yüksek günlük elektrik tüketimi gerçekleştirilmiştir [5]. Yüksek dış hava sıcaklığı, insanların ısı konfor sağlaması açısından klima sistemlerini kullanmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla günlük elektrik tüketiminin en yüksek olduğu yaz aylarının en sıcak günlerine denk gelmesi klima kullanımı arttığı için şaşırtıcı değildir, sonuç olarak ya soğutma ihtiyaçları için tüketilen bu elektrik tüketimini azaltmak ya da tüketimin düşük olduğu bir zamana kaydırmak gerekmektedir.

Elektrik tüketiminin gün içindeki dağılımına bakıldığında, saatlik olarak elektrik tüketiminin dengeli bir dağılım göstermediğini görebiliriz. Soğuk enerji depolama sistemleri sayesinde soğutma sistemlerine bağlı elektrik tüketiminin bir kısmını, elektrik kullanımının fazla olmadığı saatlere kaydırmak mümkün olmaktadır. Bu sayede elektrik tüketimi gün içerisinde daha dengeli dağılım göstermektedir. Böylelikle elektrik üretim tesislerinden daha dengeli ve verimli bir şekilde yararlanılabilmektedir. Çünkü elektrik üretim tesisleri, elektrik kullanımının en yoğun olduğu dönemlerde tüketimi karşılayamamaktadır. Bu tüketimi karşılayabilmek için üretim tesisleri verimsiz işletilmektedir veya ithal edilen elektrik miktarı artmaktadır. Bu artışlar ekonomik açıdan olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu olumsuz durumların etkisini, soğuk enerji depolama sistemleri sayesinde, soğutma sistemlerinden kaynaklı elektrik tüketimini yoğun olmayan saatlere kaydırılarak azaltılması sağlanmaktadır.

Kapalı alanların (alışveriş merkezleri, havalimanları, ofis binaları vb.) soğutma yükünün yüksek olması ve soğutma sistemlerine uzun süre ihtiyaç duyulması nedeniyle, soğutma maliyetleri yüksektir. Bu yüksek soğutma maliyeti ciddi bir işletme maliyeti oluşturmaktadır. Soğuk enerji depolama sistemleri, bu tür yaşam alanlarında, insanların soğutma ihtiyaçlarını karşılarken işletme maliyetini düşürmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Soğuk enerji depolama, elektrik birim fiyatı düşük olduğunda soğuk

enerji deposunda bir malzeme soğutularak (hal değişimi yaptırılarak) sonra, bu malzeme soğuk enerjiyi kullanmak için ters faz değişimine tabi tutularak, bir ortamın soğutulması enerji depolama ile gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, soğutma ihtiyaçları karşılanırken hem tepe yükü hem de maliyet azaltılmış olmaktadır. Buzda enerji depolama (BED), en yaygın gizli ve soğuk enerji depolama türüdür. Buzda enerji depolama sisteminde gece elektrik birim fiyatı düşükken buz üretilmektedir ve bir depolama tankında bekletilmektedir. Daha sonra depolanan buz, elektrik yükünün pik seviyelerde olduğu ve birim fiyatının yüksek olduğu bir zamanda eritilerek mekân soğutulmaktadır.

### 1.3.Enerji Depolama Nedir?

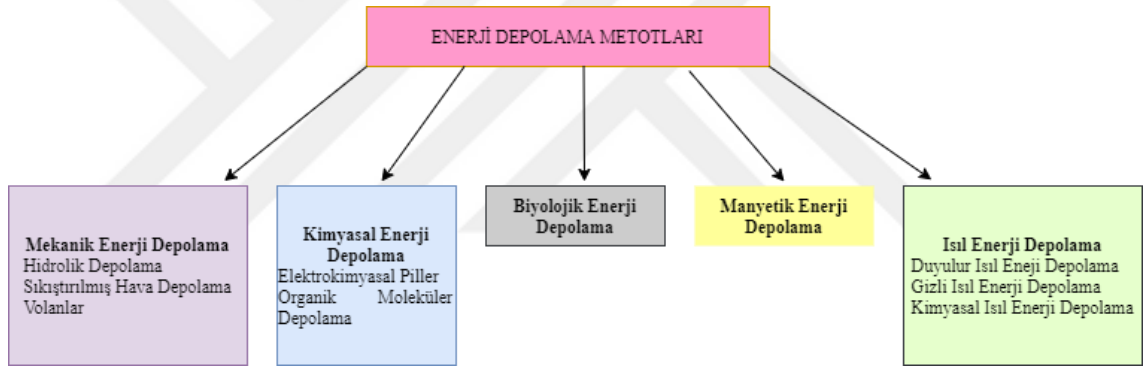
Enerji depolama; enerjinin, enerji kaynağının aktif olmadığı ya da pahalı olduğu zamanlarda kullanmak üzere geçici süreliğine depolanması, enerji kaynağının aktif ya da ucuz olduğu zamanlarda depolama ortamı içinde depolanması olarak tanımlanmaktadır [1]. Enerji kaynağının depolama ortamı, ne zaman depolandığı ve kullanıldığı enerji depolama sistemleri için oldukça önemlidir. Enerji depolama, yenilenebilir enerji kaynakları gibi enerji kaynağının sürekli aktif olmadığı ya da aktif olduğu saatlerin değişkenlik gösterdiği durumlarda enerji kaynağından sürekli yararlanmak için ve enerjinin kaynağından yararlanmanın pahalı olduğu saatlerdeki kullanım miktarını enerji kaynağından yararlanmanın ucuz olduğu saatlere kaydırmak için kullanılabilecek en önemli yöntemlerden biridir. Ayrıca enerji kaynağının aktif olduğu zaman ile enerjinin ihtiyaç olduğu zaman arasındaki çakışma problemini çözmek için enerji depolama kullanılmaktadır. Örneğin güneş enerjisinden gece ve kışın yararlanmak için güneş enerjisinin depolanması gerekmektedir. Enerji depolama sistemleri sağladığı avantajlarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır.

Enerji depolamanın sağladığı bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir [6].

- Fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltır
- Enerjinin üretim periyoduyla kullanıldığı periyot arasındaki çakışma problemini çözer
- Enerji tüketim maliyetlerini düşürür
- Enerji kaynaklarından sürekli olarak yararlanmaya olanak sağlar

- Sistem elemanlarının kapasitelerini düşürmeye olanak sağlar
- İlk yatırım ve bakım maliyetlerini düşürür
- Sistem ekipmanlarının verimlerini yükseltir
- Enerji arz talep dengesini sağlamaya yardımcı olur
- İşletme şartlarının esnekliğini artırır
- Karbon salınımını azaltmaya yardımcı olur

Enerji depolamanın, Şekil 1.1'den görüldüğü üzere, çok sayıda yöntemi vardır. Bu yöntemlerin ve alt dallarının da kendi içerisinde çok sayıda çeşitleri bulunmaktadır.



Şekil 1.2. Enerji Depolama Metotlarının Sınıflandırılması

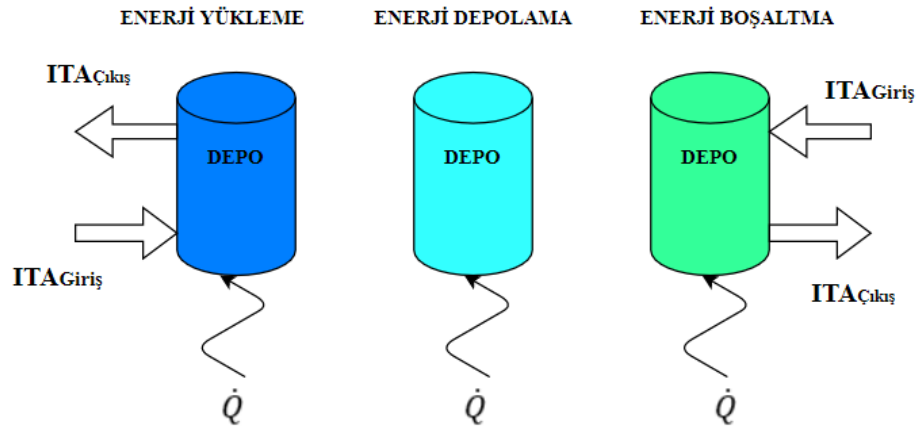
### 1.3.1. Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Prensibi

Tipik bir enerji depolama sistemi üç çalışma periyodundan oluşmaktadır. Bunlar;

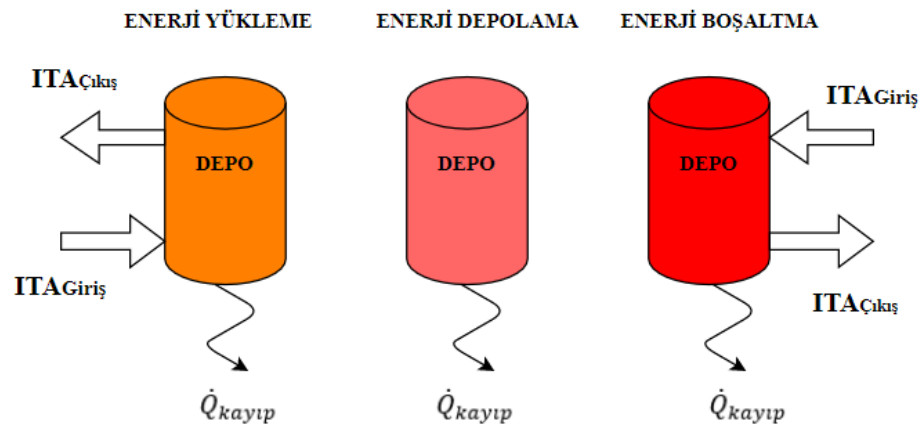
- Enerji yükleme periyodu
- Depolama, bekletme periyodu
- Enerji boşaltma periyodu

Enerji yükleme periyodunda, enerji kaynağından kaynağından elde edilen enerji dönüştürülerek ya da direk olan ilk formunda bir depolama ortamı içerisine yüklenir. Enerji yükleme periyodu enerji kaynağının aktif ya da ucuz olduğu dönemlerde gerçekleştirilmektedir. Daha sonra yüklenen bu enerji ihtiyaç olacağı zaman bir depolama tankı, taşıyıcısı ya da deposu içerisinde bekletilir. Bu periyot enerji depolama periyodu

olarak adlandırılır. Depolama periyodunda kayıpların mümkün olduğunca az olması istenir. Depolanan enerji, enerji boşaltma periyodunda kullanılarak enerji ihtiyacı karşılanır. Enerji boşaltma periyodu enerji kaynağının aktif olmadığı ya da pahalı olduğu dönemlerde gerçekleştirilir. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te sırasıyla soğuk ve sıcak enerji depolama sistemlerinin çalışma periyotları şematik olarak görülmektedir. Çoğu enerji depolama sisteminde bir ısı transferi akışkanı (ITA) enerji yüklemek ve boşaltmak için depolama ortamında dolaştırılmaktadır. IED'nin türüne göre ITA direk depolama ortamı olarak kullanılabilceği gibi, bir ısı değiştiricide sistemde kullanılabilir. Depolama ortamının sıcaklığı ortam sıcaklığından yüksek olduğu durumda kayıplar ısı kaybı olarak gerçekleşirken, soğutma kapasitelerinin depolanmasında, başka bir deyişle depolama ortamının sıcaklığı ortam sıcaklığından düşük olduğu durumlarda, kayıplar ısı kazancı olarak gerçekleşir.



Şekil 1.3. Soğuk Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Periyotları



Şekil 1.4. Sıcak Enerji Depolama Sistemlerinin Çalışma Periyotları

#### 1.4. Isıl Enerji Depolama

Isıl enerji depolama, bir enerji kaynağının ısı enerjisine dönüştürülerek geçici olarak bir ortamda depolanmasıdır. Depolanan enerji hem ısı enerjisi olarak hem de başka bir enerji türüne dönüştürülüp kullanılabilir. Isıl enerji depolama sistemleri özellikle ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında büyük potansiyele sahiptir ve önemli avantajlar sunmaktadır. Isıl enerji depolama, enerji kaynağının aktif olduğu dönem ile enerji talep periyodu arasındaki uyumsuzluğu gideren hem ısıtma hem de soğutma için çözümler veren bir sistemdir. IED'ler; konut, sanayi, tarım ve ulaşım gibi her sektörde sektörlerinde uygulama şansı bulup, elektrik enerjisi ve kömür, doğal gaz, petrol gibi fosil yakıtlardan tasarruf sağlayarak, enerji verimliliğini önemli ölçüde arttırabilmektedir. Rüzgâr, güneş ve jeotermal gibi yenilebilir enerji kaynaklarının aktif olduğu dönemleri uzatmak ya da üretim kapasitesindeki kısa süreli dengesizlikleri gidermek için önemli yöntemlerden biridir.

IED 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.

Isı enerjisi depolaması, kullanım süresine göre kısa süreli depolama (günlük, saatlik, vb.) ve uzun süreli depolama (mevsimsel, yıllık, vb.) olmak üzere ikiye ayrılır. Kullanım amacına ve depolama ortamının sıcaklık seviyesine göre sıcak depolama ve soğuk depolama olarak ikiye ayrılır. Uzun dönem depolama ile hedeflenen, yazın sıcaklığı depolayıp kışın kullanmak veya kışın soğukluğunu depolayıp yazın kullanmaktır. Isıl depolamanın yapılabilmesi için bir santralin atık ısısı, güneş enerjisi ve jeotermal enerji vb. ısı kaynağına ihtiyaç vardır.

Çok sayıda enerji ve enerji depolama türü olsada çoğu ülkede ve sektörde enerji; ısı olarak üretilmekte ve aktarılmaktadır. Ayrıca bir sistemden hem tüm kayıplar ısı olarak gerçekleşmektedir. Bu sebepten dolayı hem enerji dönüşümü açısından hem de yukarıda saydığımız faydalarından dolayı ısıl enerji depolama sistemleri önem arz etmektedir.

#### 1.4.1. Isıl Enerji Depolamanın Temel Çalışma Prensipleri

Isıl enerji depolama sistemlerinin temel çalışma prensibi diğer enerji depolama sistemleri aynı olup üç temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3). Bunlar;

- Enerji yükleme periyodu
- Depolama, bekletme periyodu
- Enerji boşaltma periyodu

Yukarıda sıralanan enerji depolama periyotlarının şematik olarak gösterimi, ısıtma ve soğutma uygulamaları için Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'de sırasıyla gösterilmektedir. IED sistemlerinde enerjinin yüklenilmesi ve boşaltılması esnasında bir ısı transferi akışkanı (ITA) kullanılmaktadır. Bu ısı transferi akışkanı enerji kaynağındaki enerjiyi depolama ortamına taşır. Taşıdığı enerjiyi depo içerisindeki depolama malzemesine aktarır. ITA'ların su, hava, etilen-glikol, antifriz vb. gibi türleri bulunmaktadır.

Enerji yükleme periyodunda enerji kaynağından alınan enerji ITA aracılığıyla ya da ITA olmadan depolama malzemesine iletilir. Depolama (bekleme) periyodunda ise ITA'nın depolama ortamı ve ısı kaynağıyla bir etkileşimi yoktur. Bazı sistemlerde ITA depolama ünitesinde tutulduğu gibi bazı sistemlerde depolama ortamından tahliye edilmektedir. Bu periyotta, enerji yükleme periyodunda şarj edilen enerji minimum kayıp ile kullanılacağı zamana kadar bekletilir. Enerji boşaltma periyodunda, yüklenen ve depolanan enerji ITA aracılığıyla ya da direk olarak kullanılabilir.

Örnek olarak; oğuk enerji depolama sistemlerinde enerji kaynağı elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi, enerji yükleme periyodunda soğutma gruplarında düşük sıcaklıkta ısı enerjisine dönüştürülür ve bir depolama tankı içerisindeki depolama ortamının ya soğutulmasını ya da katılaşmasını sağlar (soğutulmuş sulu ya da buzda enerji depolama). Bu işlem sırasında bir ITA kullanılır. ITA olarak genellikle etilen-glikol çözeltileri kullanılır. Enerji yükleme periyodu elektriğin ucuz olduğu gece tarifesinde (4-8 saat) yapılmaktadır. Daha sonra depolama periyodunda yüklenen enerji gündüz tarifesinde (8-12 saat) kullanılacağı zamana kadar tank içerisinde minimum kayıpla bekletilir. Son olarak enerji boşaltma periyodunda, elektriğin pahalı olduğu pik saatlerde (4-8 saat) depolanan enerji kullanılır.

#### 1.4.2. Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması

Isıl enerji depolama sistemlerinin çok sayıda sınıflandırma şekilleri vardır. Ancak bu şekiller içerisinde en yaygın olarak kullanılan ısı enerjisinin türüne göre olan;

- Duyulur ısıl enerji depolama: depolama malzemesinin sıcaklık değişimi ile yapılan enerji depolama
- Gizli ısıl enerji depolama: depolama malzemesinin faz değişimi sırasında açığa çıkan ve gerekli olan ısı enerjisi değişimi ile yapılan enerji depolama
- Kimyasal ısıl enerji depolama: kimyasal reaksiyonların endotermik ya da ekzotermik olması durumu ile alakalıdır. Bir endotermik reaksiyon sırasında enerji yüklenir ve daha sonra bu reaksiyonun aksi yönünde ekzotermik bir reaksiyon ile de enerji boşaltılır. Ya da direk olarak yakıt olarak kullanılabilecek kimyasallar ( $H_2$ ,  $NH_3$ , etc.).

Isıl enerjinin diğer bir sınıflandırma şekli enerji depolama süresi ile alakalıdır.

- Kısa süreli depolama: günlük ve saatlik depolamaları ifade eder. Güneş enerjili sıcak su depolama, soğutma yükü depolama vb.
- Uzun süreli depolama: haftalık, aylık, mevsimlik, yıllık vb. uzun sürede büyük kapasitede depolamayı ifade eder. Kaya yataklarında depolama, çakıl yataklarında depolama ve büyük güneş havuzu sistemleri gibi sistemler uzun süreli ısıl enerji depolamaya örnek verilebilir.

Depolama sıcaklığı ile alakalı sınıflandırma;

- Düşük ve orta sıcaklıkta ısıl enerji depolama: 30-90 °C sıcaklık aralığında yapılan ısıl enerji depolamadır.
- Yüksek sıcaklıkta ısıl enerji depolama: 100 °C ve üzerindeki yapılan ısıl enerji depolama sistemlerini ifade eder.
- Soğuk enerji depolama: 10 °C ve altında soğuk kapasitenin depolanması için yapılan ısıl enerji depolama sistemleridir.

### 1.4.3. Isıl Enerji Depolamanın Türleri

Bu bölümde, ısııl enerji depolama sistemleri ve çalışma prensipleri tanıtılmıştır.

#### 1.4.3.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama

Duyulur ısııl enerji depolamada enerji, su, hava, yağ, kaya yatakları, tuğlalar, kum veya toprak gibi bir depolama ortamının sıcaklığının değiştirilmesiyle depolanır. Temel olarak, nihai ve ilk depolama koşulları arasındaki 12 sıcaklık değişimine bağlıdır. Bu malzemeler, depolama sürecinde karşılaşılan sıcaklık aralığında fazla hiçbir değişikliğe uğramaz. Bir malzeme kütleğinde depolanan ısı miktarı şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = mC_p\Delta T = \rho C_p V \Delta T \quad (1)$$

Burada  $C_p$  depolama malzemesinin özgül ısısı,  $V$  hacmi ve  $\rho$  yoğunluğu ve  $\Delta T$  sıcaklık değişimini temsil etmektedir. Denklem 1'den görülebileceği gibi, duyulur ısııl enerji depolama için uygun depolama ortamının seçilmesinde en önemli parametreler yoğunluk ve özgül ısıdır. Mümkün olan en küçük hacimde daha fazla enerji depolamak için depolama ortamı olarak yüksek özgül ısısı ve yoğunluğu olan malzemeler tercih edilmelidir. Duyulur ısııl enerji depolama sistemlerinde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri aşağıdaki Tablo 1.1'de verilmiştir.

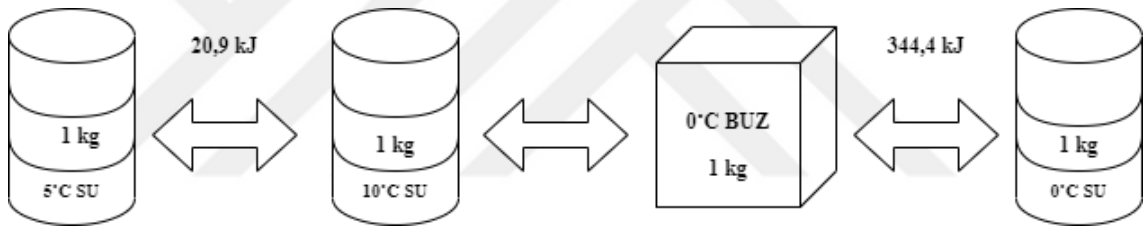
Tablo 1.1. Duyulur Isı Depolamada Kullanılan Bazı Malzemelerin 20°C'deki Isıl Kapasiteleri

| Malzeme        | Yoğunluk<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Özgül Isı<br>(J/kgK) | Volümetrik Isıl Kapasite<br>(x10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> .K) |
|----------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Kil            | 1456                             | 879                  | 1,28                                                               |
| Tuğla          | 1800                             | 837                  | 1,51                                                               |
| Kumtaşı        | 2200                             | 712                  | 1,57                                                               |
| Odun           | 700                              | 2390                 | 1,67                                                               |
| Beton          | 2000                             | 880                  | 1,76                                                               |
| Cam            | 2710                             | 837                  | 2,27                                                               |
| Alüminyum      | 2710                             | 896                  | 2,43                                                               |
| Demir          | 7900                             | 452                  | 3,57                                                               |
| Çelik          | 7840                             | 896                  | 2,43                                                               |
| Çakıllı toprak | 2050                             | 1840                 | 3,77                                                               |
| Manyetit       | 5177                             | 752                  | 3,89                                                               |
| Su             | 988                              | 4182                 | 4,1                                                                |

Duyulur ısı enerji depolamada yukarıda sıralanan türler dışında yeraltı su kaynaklarına ısı enerji depolama ve güneş havuzu sistemleri de bulunmaktadır. Hangi duyulur ısı enerji depolamanın kullanılacağı, depolamanın yapılacağı ortamın fiziksel şartlarına, iklimsel koşullarına, kullanılması planlanan depolama ortamının türü ve depolanan enerjinin nasıl kullanılacağına bağlıdır.

#### 1.4.3.2. Gizli Isı Enerji Depolama

Bir madde bir fazdan diğerine değiştiğinde meydana gelen ısı transferine gizli ısı denir. Gizli ısı değişimi, genellikle belirli bir ortam için hissedilir ısı değişiminden çok daha yüksektir ve bu, özgül ısıyla ilgilidir. Su örnek olarak alınırsa, su buza dönüştüğünde gereken termal enerji miktarı ile sıcaklığını beş santigrat derece değiştirmek için gereken termal enerji miktarı arasındaki fark Şekil 1.4'te gösterildiği gibi yaklaşık 16 kattır.



Şekil 1.5. Su için Duyulur ve Gizli Isı Değişimi Miktarları

GED sistemlerinde kullanılan depolama maddesine faz değiştiren malzeme (FDM) adı verilmektedir. Yaygın olarak kullanılan FDM'lere su/buz, tuz çözeltileri, bazı polimerler ve ötektik tuzlar örnek verilebilir. GED sistemleri kullanılan FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıklarına göre düşük sıcaklıklı ve yüksek sıcaklık GED sistemleri olarak ikiye ayrılır.

Gizli TED için enerji yoğunlukları duyulur TED için olanları aştığından, normalde daha küçük ve daha hafif depolama cihazları ve daha düşük depolama kayıpları ortaya çıkar. Böylece uzun süreler ve yüksek depolama kapasiteleri için gizli TED sistemi tercih edilmektedir.

#### 1.4.3.3. Faz değiştiren malzemeler (FDM)

Bir malzeme eridiğinde veya buharlaştığında ısıyı emer; bir katıya (kristalleşerek) veya bir sıvıya (yoğunlaşır) dönüştüğünde, bu ısıyı serbest bırakır. Bu faz değişimi FDM'lerde ısıyı depolamak için kullanılır. Gizli ısının soğurulması veya salınmasıyla sabit bir

sıcaklıktaki termodinamik faz değişimleri arasında TES için en uygun olanlar katı-sıvı ve katı-katı geçişleridir. FDM'ler, yaklaşık  $-114^{\circ}\text{C}$  ila  $+885^{\circ}\text{C}$  /  $173^{\circ}\text{F}$  ila  $1625^{\circ}\text{F}$  arasında değişen çeşitli sıcaklıklarda kullanılabilir.

Antik çağlardan beri, su buzunu ve ötektik tuzlar FDM olarak kullanılmıştır. TES için bir FDM'nin belki de en eski uygulaması 1800'lerin sonlarında İngiliz demiryolu araçları için koltuk ısıtıcılarının kullanılmasıydı. Soğuk kış günlerinde  $44.4^{\circ}\text{C}$  'de eriyen ve donan bir FDM, sodyum tiyosülfat pentahidrat kullanıldı. FDM'lerin diğer erken uygulamaları, kamyon ve demiryolu taşımacılığı uygulamalarında soğuk depolama için kullanılan "ötektik plakaları" içeriyordu. FDM'lerin bir diğer önemli uygulaması da uzay teknolojisi ile ilişkilidir ve NASA, uzay araçlarının elektrik ekipmanlarının ısı kontrolünü sağlamak için FDM uygulamaları üzerine birçok projeye sahiptir.

**FDM'lerin gereksinimleri:**  $0-120^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığındaki FDM, alan ısıtma, kullanım sıcak suyu üretimi, ısı pompası destekli alan ısıtma, sera ısıtma, güneş enerjisiyle soğutma vb. gibi çeşitli düşük sıcaklık uygulamaları için ilgi çekicidir. Aksi takdirde,  $120^{\circ}\text{C}$ 'den yüksek bir sıcaklığa sahip gizli FDM, nükleer tesislerde ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, en uygun seviyede sistemi tasarlamak için, FDM'lerin erime ve donma özellikleri, termal döngüye girme yetenekleri ve yapı malzemeleriyle uyumlulukları hakkında iyi bir bilgiye sahip olmak gerekir.

**FDM'lerin karakterizasyonu:** Bir FDM'nin birçok özelliği istenir. Hiçbir malzeme tüm arzuları karşılayamayacağından, belirli bir uygulama için bir FDM seçimi, çeşitli adayların özelliklerinin dikkatli bir şekilde incelenmesini, göreceli avantajlarının ve eksikliklerinin tartışılmasını ve bazı durumlarda belirli bir derecede uzlaşmayı gerektirir. Bununla birlikte, endüstriyel sınıf ürünlerin özelliklerinin, safsızlıkların, bileşim varyasyonlarının (karışımlar, damıtma kesimleri) ve zincir uzunluğu dağılımının (polimerler durumunda) varlığı nedeniyle bildirilen değerlerden büyük ölçüde farklı olabileceği unutulmamalıdır. Mümkün olduğunda, seçimler tam olarak formüle edilmiş ürünlerin test edilmiş değerlerine dayanmalıdır.

**FDM'lerin zorlukları:** FDM'lerin sağladığı büyük avantajlarının yanında, depolama sıcaklığına uygun depolama yapacak materyali bulmak, uzun süreli depolamada ısı davranışlardaki belirsizlik, çevreye olan ısı kaybı ve depolama hacminin miktarı gibi bazı önemli sorunları da mevcuttur.

**FDM'lerin uygulamaları:** Isıtma ve soğutma uygulamalarına göre FDM'lerin depolama türleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. FDM'lerin Depolama Türleri

| FDM Erime Noktası | Kullanım Alanları                        |
|-------------------|------------------------------------------|
| 0-5 °C            | Soğutma Uygulamaları                     |
| 5-15 °C           | Soğuk Depolama                           |
| Oda Sıcaklığında  | Kapalı Hacim                             |
| 20-35 °C          | Isıtma Uygulamaları                      |
| 20-35 °C          | Güneş Enerjili Isıtma Sistemi            |
| 40-60 °C          | Güneş Enerjili Isıtma Sistemi            |
| 60-95 °C          | Kapsül İçi                               |
| 25 °C ve üstü     | Isıtma Sistemleri                        |
| 100-175 °C        | Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri |

**FDM'lerin değerlendirilmesi:** FDM'lerin uygunluğunun değerlendirilmesi için donma ya da katılaşma, aşırı soğutma, çekirdeklenme, ısıl çevrim, kapsülleştirme ve uygunluk gibi kriterler kullanılmaktadır.

### 1.5. Soğuk Isıl Enerji Depolama

Soğuk ısı enerjisi depolama genellikle, soğutma kapasitesinin, mahal veya işleme sisteminin nominal sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda uygun bir ortamda depolanması için gerçekleştirilmektedir. Soğuk ısı enerjisi depolama kullanımının temel amacı, soğutma sistemlerinde kullanılan elektrik enerjisini yoğun saatlerde pahalı tarifelerden yoğun olmayan saatlerde ucuz tarifelere kaydırarak, klima işletme maliyetlerini düşürmektir. Soğuk enerji depolama sistemlerinin iki önemli avantajı bulunmaktadır. Bunlardan ilki soğutma için gerekli olan elektrik maliyetlerini düşürmesi, ikinci ise mahallerin soğutma pik yükünü azaltarak soğutma sistemi kapasitelerini düşürmesidir. Diğer avantajlarından biride, bazı sistem yapılandırmaları ilk yatırım maliyetlerini azaltabilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde "Federal Enerji Yönetimi Programı", STED sayesinde yılda 50 milyon dolar tasarruf ettiğini açıkladı. Aşağıda listelenen durumlardan biri veya daha fazlası mevcutsa, o yer için bir soğuk termal depolama sistemi kullanmak cazip kabul edilebilir [7].

- Elektrik enerjisi fiyatları gün içerisinde ciddi bir şekilde değişiyorsa

- Elektrik kullanım fiyatlarının pahalı olması
- Ortalama soğutma yükünün, pik soğutma yükünden ciddi miktarda az olması durumunda
- Soğuk depolama sistemlerini kurmak için teşviklerin olması
- Kapasite artışı gereken bir soğutma sisteminin var olması
- Yeni bir mahalin yapılıyor olması
- Eski soğutma sisteminin yerine yeni soğutma sisteminin kurulacak olması

Soğuk ısııl enerji depolama sistemlerinin çalışma prensibi enerji depolama sistemleri ile aynıdır. Yani enerji yükleme, depolama ve boşaltma periyotları olmak üzere üç çalışma periyodundan oluşur. Bu sürelerin uygulanması, soğuk ısııl enerji depolama türü, malzemesi ve miktarına göre değişir. Soğuk ısııl enerji depolama sistemlerinde, glikol, su ve ötektik tuzlar genellikle depolama malzemesi olarak kullanılır. Su, çeşitli pratik ve termodinamik nedenlerden ötürü tercih edilen depolama malzemesidir; bunların arasında, kullanıma hazır olması, görece zararsızlığı ve depolama ve kullanım için çok çeşitli ekipmanlarla uyumluluğu vardır. Soğuk enerji depolandığında, depolama sürecini duyulur veya gizli yapma kararı, daha önce açıklanan tasarım kriterlerine göre verilmelidir.

### **1.6. Buzda Enerji Depolama (BED)**

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 mahallerde genellikle tercih edilmektedir. BED sistemlerinin çalışma prensibi; enerji depolama ve ısııl enerji depolama sistemlerinin çalışma prensipleri ile aynıdır. BED sistemlerinde, enerji yükleme periyodunda buz elde edilir. Daha sonra bu buzlar bir depolama tankı içerisinde kullanılıncaya kadar bekletilir (depolama periyotu). 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

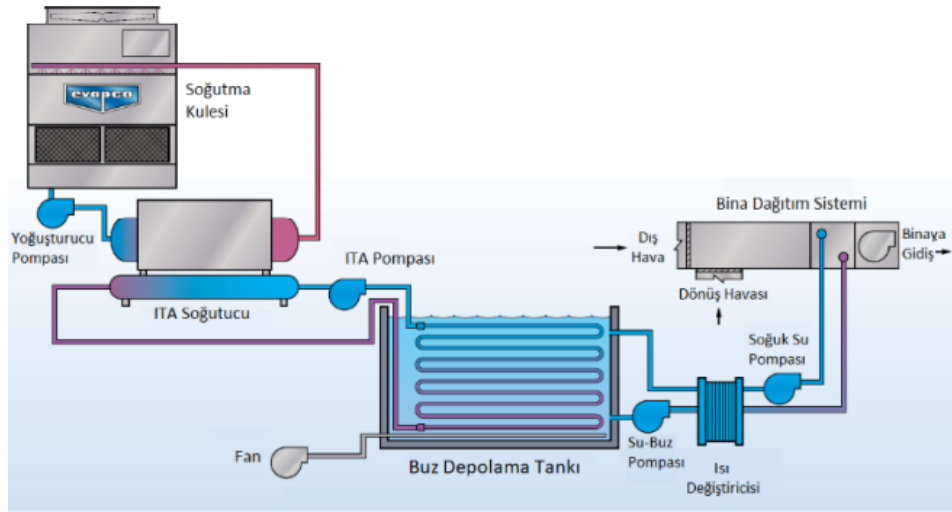
ve pik saatlerde ise enerji boşaltma işlemi yapılır. Böylece BED sistemleriyle bir mahali soğutma için gerekli olan elektrik tüketim maliyetleri düşürülebilir. Bu sayede hem soğutma daha ucuz bir şekilde sağlanmış olur hem de elektrik kullanımının pik yükünü azaltmaya katkı sağlamış olur. BED sistemleri, buzun depolama tankına nasıl geldiğine göre statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

### **1.6.1. Statik BED Sistemleri**

Statik BED sistemleri, literatürdeki BED sistemleri arasındaki en eski yöntemdir. Statik sistemlerde buz, ısı transfer akışkanı (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.

#### **1.6.1.1. Boru Üzerinde Buzlanma Sistemleri**

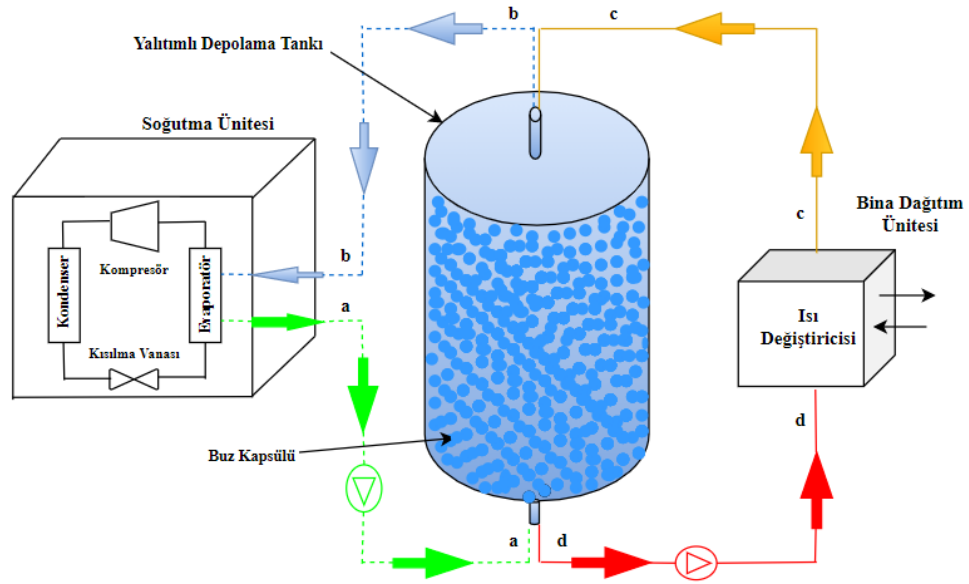
Bu statik BED türünde suyun katılaşması boru üzerinde gerçekleşir. Şekil 1.5'te boru üzerinde katılaşmanın olduğu BED sisteminin şematik görünümü verilmiştir. Bu sistemde, buz depolama aşamasında ITA kullanılır. Enerji tankı içerisinde su ve boru demetleri bulunmaktadır. Bu boruların içinden ise ITA akmaktadır. 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 buzlanma sistemleri hem büyük kapasiteli hem de küçük kapasiteli sistemlerde çok fazla tercih edilmektedir.



Şekil 1.6. Boru Üzerindeki Buzlanma BED Sistemlerinin Şematik Gösterimi [8]

#### 1.6.1.2. Kapsüllü BED sistemleri

Kapsüllenmiş buzda enerji depolama sistemi bir tür statik sistemlerdir. Bu sistem, plastik kapsüller (düşük maliyeti, uçuculuğu ve yüksek dayanıklılığı nedeniyle genellikle PVC'den yapılmış) içinde kapsüllenmiş deiyonize suyu dondurmak için genellikle bir glikol çözeltisi olan bir tuzlu su çözeltisini kullanır. Kapsüller genellikle küresel bir şekilde yapılır, ancak dikdörtgen prizma, silindirik ve dairesel şekiller dahil olmak üzere başka geometriler de mümkündür. Bu kapsüller büyük bir depolama tankında (gözenekli ortam) bulunur ve glikol çözeltisi, sıcaklığını suyun donma noktasının altına düşürmek için soğutma ünitesi ile soğutulur. Gece boyunca, ısı transfer sıvısı kapsüllenmiş suyu dondurur ve gün boyunca yük (bina) ile depolama tankı arasında bir ısı transfer ortamı olarak kullanılabilir. Isı transfer sıvısı, binadan ısıyı alır ve onu buz kapsüllerine iletir. Depolama tankındaki kapsül sayısı, depolanacak enerji miktarına bağlıdır. Kapsüllenmiş buz sistemlerinin bir görünümü Şekil 1.6'da gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere kapsüllü BED sistemleri; depolama tankı, soğutma ünitesi, buz kapsülleri, ısı değiştiricisi ve pompadan oluşmaktadır.



Şekil 1.7. Kapsüllü BED Sistemlerinin Şematik Gösterimi

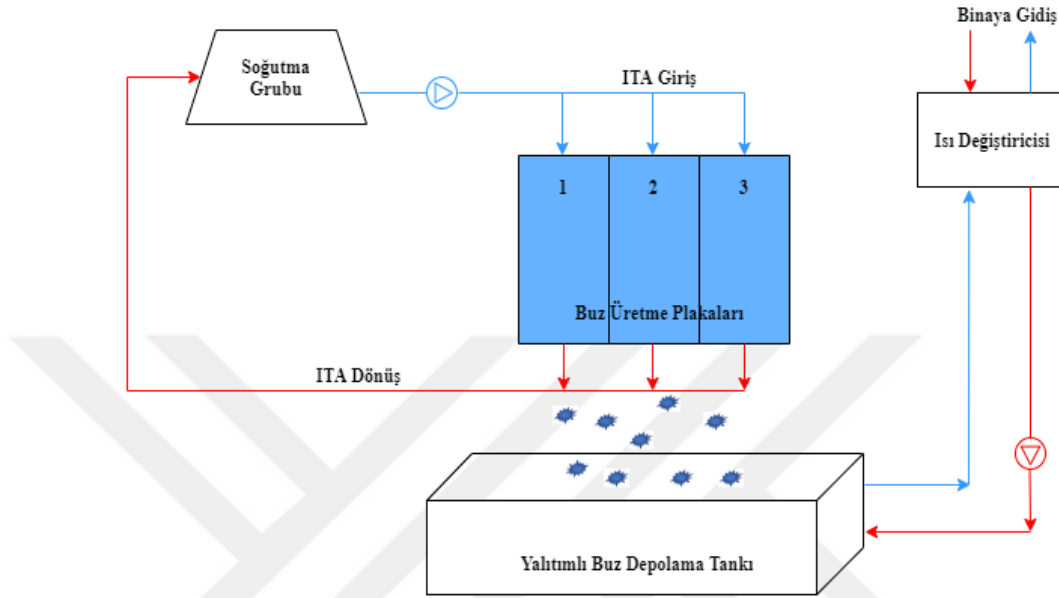
### 1.6.2. Dinamik BED sistemleri

Dinamik BED sistemlerinde buz, depolama tankının dışında buz yapma yüzeyinde elde edilir ve depolama tankına gönderilir. Dinamik BED sistemlerinde ITA ve su-buz birbirine karışmaktadır. Statik BED sistemleri, dinamik BED sistemlerine göre ısı performans açısından daha düşük durumda olmasına rağmen uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilmektedir. Çünkü dinamik BED sistemleri daha karmaşık yapıda sisteme sahiptir. Bu karmaşıklık sistemin hem ilk yatırım maliyetlerini hem de bakım ve servis masraflarını da arttırmaktadır.

#### 1.6.2.1. Buz Hasatı 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  $5^{\circ}\text{C}$  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 1.7'de görülmektedir. Buz hasatı

BED sisteminin düşey plaka üzerinde buz elde etmenin yanında boru üzerinde de buz elde etmenin olduğu sistemlerde vardır.



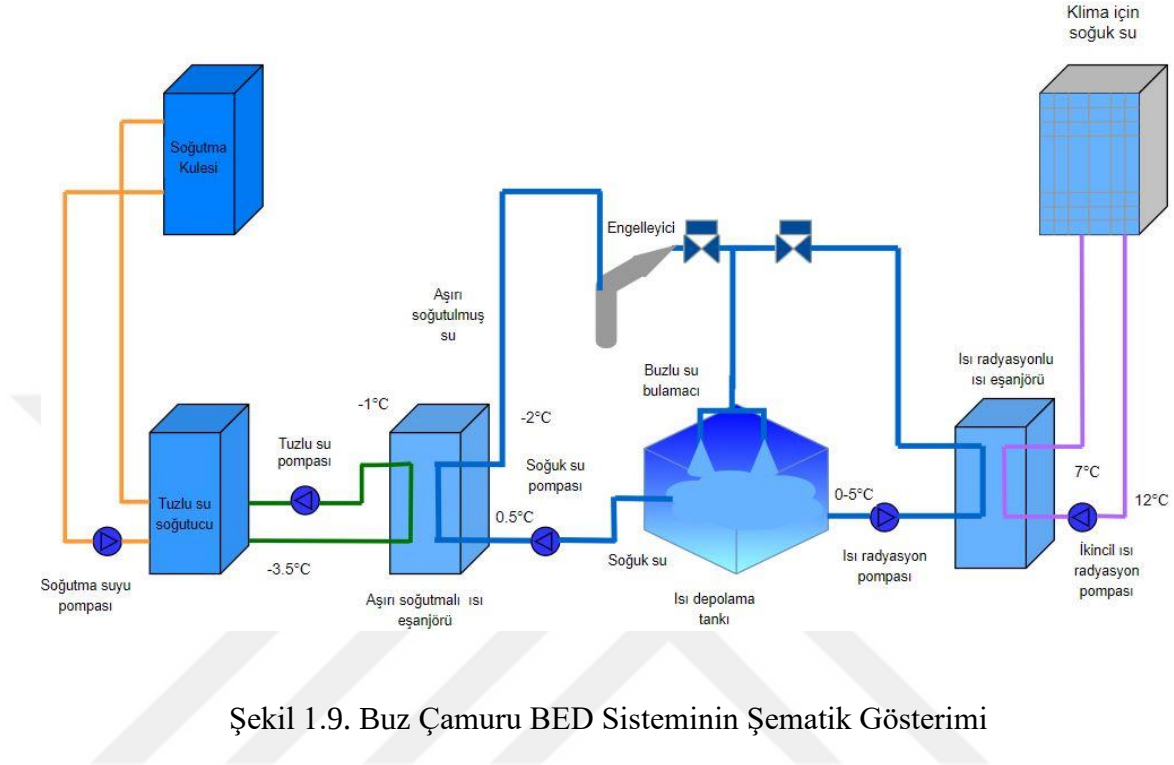
Şekil 1.8. Buz Hasatı BED Sisteminin Şematik Gösterimi

#### 1.6.2.2. Buz çamuru BED sistemleri

Buz çamuru çok yönlü bir soğutma ortamıdır. 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 1.8'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 BED sistemleri düşük sıcaklık, kolay modifikasyon, yüksek enerji verimliliği vb. gibi olumlu özelliklerine rağmen statik sistemler kadar yaygın değildir. Çünkü statik sistemlere göre ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Sistem ve ekipmanları

kompleks bir yapıya sahiptir. Bu yüzden tercih edilme yerleri depolama kapasitesinin yüksek olduğu yerlerdir [9].



### 1.7. Literatür Taraması

BED sistemleri sağladığı ekonomik tasarrufun yanında, diğer avantajlarından dolayı çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Erek ve Dinçer [6], küre kapsüllü buz depolama sisteminin enerji yükleme ve boşaltma sırasında, akış yönündeki ısı transferi karakteristiği incelenmiştir. ITA'nın giriş sıcaklığı ve ortalama ısı geçiş 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 bulmuştur. ITA akış boyunca azalmıştır. Bu yüzden, sistemin ısı geçiş analizi yapılırken sabit ve ortalama bir ısı transfer katsayısı almanın doğru bir değerlendirme olmayacağı vurgulanmıştır.

Cho ve Choi [10], içerisinde parafin bulunan bir kürenin donma ve erime sırasındaki ısı karakteristiğini incelemiştir. Parafinin donma noktası altında katılaşma 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.

ElGhnam ve arkadaşları [11], küre buz kapsülleri için katılaşma ve erime durumlarının irdelemesini deneysel olarak yapmışlardır. Farklı küre kapsül çapları ve malzemeleri denenmiştir. Isı transferi akışkanı olarak %35 glikol-etilen kullanılmıştır. Tek bir kapsül için içinde su bulunduran kapsül malzemesi, kapsül çapı, ITA hızı, ITA sıcaklığı ve etkisi araştırılmıştır. Kapsül malzemesi olarak PVC ideal malzeme, kapsül çapının küçük, ITA hızının yüksek, ITA soğuk olması gerektiği belirtilmiştir.

Ismail ve Henriquez [12], içerisinde su olan küredeki katılaşma durumunu sonlu farklar 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.

Kousksou ve arkadaşları [13], 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 dikey ve yatay pozisyonu için de inlemede bulunmuşlardır. Çalışmanın sonucunda dikey tankların daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Çünkü dikey tankta doğal taşınımından kaynaklanan hareketlerin yönü, zorlanmış taşınımın hareketlerinin yönü ile aynıdır.

Ryu ve arkadaşları [14], içerisinde %2 sodyum sülfat dekahidrit bulunan kürelerin kullanıldığı soğuk enerji depolama sisteminin incelemesini yapmışlardır. Çalışmalarında yatay ve dikey durumdaki depolama tankının ısı performans; ısı geçişi oranı, COP ve FDM'nin donma noktası altı sıcaklıkta katılaşma açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, tankın dikey durumda kalması daha iyi ısı performans gösterdiği belirlenmiştir.

Erek ve Dinçer [15], 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 geçiş miktarının arttığı belirlenmiştir. Ancak Reynold sayısının ısı geçişi üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Boru çapının artması entropi artışı artırırken, boru boyunun entropi artışı üzerinde önemli bir etkisi bulunmadığı bulunmuştur.

Amin ve arkadaşları [16], içerisinde su bulunan kapsüllü kaldırma kuvveti içeren bir sistem incelemesini yapmışlardır. Çalışmada enerji yükleme durumu dikkate alınmıştır. Isı transferi akışkanı olarak %40 glikol-etilen kullanılmıştır. Çalışma deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve sayısal modelleme sonucu kaldırma kuvvetlerini içeren bir model geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda kaldırma kuvvetleri etkisinin donma modellemesinde çok önemli bir etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir.

Karthikeyan ve Velraj [17], 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.

MacPhee ve Dinçer [18], kapsüllü buz depolama sistemleri için gözenekli ortamlarda ısı geçişi temel ifadelerini kullanarak, sistemin ısı geçişi ve termodinamik açıdan irdelemişlerdir. 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 sistemi termodinamik açıdan değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda bir boyutlu ve iki boyutlu ısı geçişi analizinin arasında çok ciddi bir fark olmadığını vurgulamışlardır.

MacPhee ve arkadaşları [19], kapsüllü buz depolama sistemindeki 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 sonuçlarda sistemde ekserji verimini kullanmanın daha avantajlı olacağı görülmüştür. Ayrıca küresel kapsülün daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır. Daha kısa sürede buzlaşmayı sağlamak için ITA giriş sıcaklığının daha düşük olması ve giriş hızının daha hızlı olması gerektiği belirtilmiştir.

Acar ve Dinçer [20], bir mekânda kullanılan buz çamuru BED sistemi için enerji ve ekserji analizleri yapmışlardır. Çalışmalarında sistemin termodinamik analizlerini saatlik soğutma yüküne göre yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda COP değerini 2.45, ekserji yok oluşunu 64 kW ve ekserji verimini ise 547 olarak bulmuşlardır.

Ismail ve Henriquez [21], içerisinde su olan küre kapsüllerin bulunduğu ve içerisinden ısı transfer akışkanını %30 etilen-glikol akan BED sistemi tankını irdelemek için bir sayısal model ortaya koymuşlardır. Sistemin geometrik özelliklerinin ve işletme şartlarının sistem performansı üzerindeki etkisini buz yapma durumu için irdelemişlerdir. Sonucunda -3'den -9'ye kadar ITA giriş sıcaklığı enerji yükleme süresini önemli ölçüde etkilemekte iken -9'dan -15'e kadar ciddi bir değişiklik olmamaktadır. Ayrıca kapsül malzemesini ısı iletim katsayısının enerji yükleme süresi üzerindeki önemli etkisi bulunmaktadır. Isı iletim katsayısı 1 W/mK'den sonra artması ile enerji yükleme süresi önemli ölçüde değişmemektedir.

Zalba ve arkadaşları [22], 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 irdelemişlerdir. Çalışmada FDM olarak kullanılan ve kullanılabilecek tüm malzemelerin fiziksel özellikleri, avantaj ve dezavantajları tablolar halinde verilmiştir. Toplamda 150'den fazla FDM türü listelenmiş ve irdelenmiştir. Ayrıca gizli ısı enerji depolama sistemlerinin ısı geçişi analizlerinde kullanılan metotlar özetlenmiştir.

Regin ve arkadaşları [23], kapsüllü gizli ısı depolama sistemlerinin ısı geçişi karakteristiği ile alakalı kapsamlı derleme-değerlendirme çalışması yapmışlardır. Çalışmada çeşitli kapsül tüpleri ve kapsüllerin tutulduğu tanklar ile alakalı ısı geçişi analizi yöntemleri irdelenmiştir. Çalışmasının son kısmında ısı geçişi analiz yöntemleri ile alakalı literatürde kullanılan yöntemler bir tabloda verilmiştir.

Verma ve arkadaşları [24], 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, hangi şartlar altında kullanıldığı ve nasıl doğrulandığı ile alakalı bir tablo hazırlanmıştır.

Assis ve arkadaşları [25], bir küre içerisindeki erimeyi sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Kürenin içerisinde FDM olarak parafin-wax kullanılmıştır. Çalışmada küre çapını 40, 60 ve 80 mm olarak alınmıştır. Ayrıca küre yüzey sıcaklığı olarak ise 2 ila 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.

Calvet ve arkadaşları [26], 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’tür. Ayrıca bu çalışma COMSOL programı ile sayısal modellenmiştir. Sayısal modelleme deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Chen ve arkadaşları [27], 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.

Ziviani ve arkadaşları [28], buz depolama sistemleri için geliştirilmiş kural tabanlı bir kontrol stratejisinin geliştirme ve değerlendirme çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışma, kullanım süresi enerjisi ve talep masraflarını dikkate alarak aylık elektrik maliyetini en aza indiren optimal bir kontrol cihazının performansından ilham alan geliştirilmiş kural tabanlı bir kontrol stratejisinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesini anlatmaktadır.

Genelleştirilmiş kural tabanlı denetleyici, en uygun denetleyicinin yanı sıra, çeşitli ekipman soğutma kapasiteleri, TED boyutları, jeografik konumlar ve konut kullanım oranları için ticari binalar için orijinal olarak geliştirilen TED için sezgisel kontrol stratejileriyle karşılaştırılır. Çalışmanın sonucunda, genelleştirilmiş kural tabanlı denetleyicinin, test edilen tüm vakalar için %20 ve en uygun maliyetin %10'u içinde test edilen vakaların %53'ünde optimal kontrolörün performansını gösterebileceğini göstermektedir.

Bi ve arkadaşları [29], açık ve kapalı buz depolama tankları ile birlikte iç ve dış buz eritme işlemleri ile buz eritme sisteminin deneysel olarak incelemişlerdir. Kapalı (CIST) ve açık (OIST) bir buz depolama tankına sahip yeni bir buz depolama deney sistemi, dış buz eritme işlemlerinin deneysel olarak çalışıldığı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, harici ve dahili buz erime kombinasyonları üzerinde kullanılan matematiksel modelleri, hangi şartlar altında kullanıldığı ve nasıl doğrulandığı ile alakalı bir tablo hazırlanmıştır.

Sepehri ve Nelson [30], batı ABD'deki buz termal enerji depolamasının enerji ve emisyon analizini araştırmışlardır. Enerji depolama sistemleri, elektrik sektörüne, mevcut olduğunda yenilenebilir elektriğin daha iyi bir şekilde avantajını sağlamak ve zirveleri, elektrik fiyatlarının ve talebin düşük olduğu zamanlara kaydırmak suretiyle talepleri yumuşatmak gibi çeşitli faydalar sağlamaktadır. Bu çalışma sonucunda buz termal enerji depolaması için, bu faydaların, normal soğutma işlemlerine kıyasla birincil enerji tüketiminde net düşüşler sağladığı bile gösterilmiştir.

MacPhee ve Dinçer [31], bazı buz TED sistemlerinin performans değerlendirme çalışmaları yapmışlardır. Bu yazıda, alan soğutma amaçlı dört ana tipte buz saklama tekniğinin, yani buz bulamaç sistemlerinin, serpantin buz sistemlerinin (hem iç hem de dış eriyik) ve kapsüllenmiş buz sistemlerinin performans değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar, enerji analizlerinin tek başına sistem davranışına ilişkin çok yararlı bir görüş sağlamadığını göstermektedir, çünkü tüm süreçlerdeki kayıpların büyük çoğunluğu sistem geri dönüşsüzlüklerinden kaynaklanan entropi oluşumunun bir sonucudur.

Zhua ve arkadaşları [32], soğutulmuş su depolama ve buz depolamayı birleştiren bir bileşik soğuk termal depolama sisteminin ekonomik fizibilitesinin incelenmesini yapmışlardır. Bu çalışmada, soğutulmuş su ısı depolamayı ve buz ısı depolamayı birleştiren bir bileşik serin termal depolama sistemi incelenmiş ve hem soğutucu

kapasitesi seçimi hem de bileşik sistemin tasarım günü işletme maliyeti için matematiksel modeller optimize edilmiş olarak oluşturulmuştur. Sonuçlar bileşik sistem için bu optimize koşulların pratik amaçlar için ekonomik olarak uygun olduğunu göstermiştir.

Henze ve arkadaşları [33], buz depolama kontrollerinin analizi için simülasyon ortamı oluşturup değerlendirme yapmışlardır. Bu çalışmada, bir dizi ortak buz depolama sisteminin çeşitli kontrollerinin performansının değerlendirilmesi için bir simülasyon ortamının geliştirilmesi anlatılmaktadır. Bileşenler, üreticinin verilerine polinom uyumu kullanılarak modellenmiştir. Soğutucu olmayan elektriksel yüklerin optik kontrol üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Raees ve arkadaşları [34], ticari HVAC sistemleri için buz termal depolamanın enerji performans analizini araştırmışlardır. Rapor, buz termal depolamanın uygulanmasını ve bunun enerji tüketimi, talep ve toplam enerji maliyeti üzerindeki etkisini araştırıyor. Florida'nın merkezinde bulunan ofis binası için enerji tüketimini ve talebini simüle etmek için chiller modeli ile birlikte enerji simülasyon yazılımı kullanılmaktadır. Ayrıca, çalışma buz depolama uygulamalarında elde edilen maliyet tasarrufunu göstermek için bir vaka çalışması sunmaktadır. Sonuçlar, enerji tüketiminin buz termal depolama kullanılarak artabildiğini göstermektedir.

Adref ve Eames [35], küresel termal (buz) depolama elemanlarının doldurulması ve boşaltılması ile ilgili deneyler yapmışlardır. Bu çalışma için 4.07, 3.5 ve 3.135 cm yarıçapına sahip üç cam küre seçilmiştir. Testler sırasında bir ısı transfer akışkanı (ITA) olarak 4.5 ila 128 ° C (erime sırasında) ve 9.5 ila 4.48°C (donma sırasında) arasında değişen bir sıcaklık aralığında akan bir su-glikol çözeltisi kullanıldı. Şarj etme (dondurma) işlemi sırasında aynı amaçlar için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yükleme ve boşaltma oranlarının, boyutsuz süreye göre, depolama kapasitesinin en az %90'ı kadar sabit olduğunu göstermiştir.

Kamar ve arkadaşları [36], bir klimanın enerji tasarrufu potansiyeli- buz termal depolama (AC-ITS) sistemi üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, Universiti Teknologi Malaysia, Johor'da bulunan Perpustakaan Raja Zarith Sofia (PRZS) binasında kurulu mevcut bir AC sistemi ile karşılaştırıldığında işletme maliyetinde yıllık tasarrufu tahmin etmek için kavramsal bir AC-ITS sistemi üzerinde bir analiz yapılmıştır. İlk önce, Taşıyıcı Soğutma Yüğü Yöntemi'ne göre binanın soğutma yükleri belirlenmiştir. Mevcut

AC sisteminin tahmini yıllık işletme maliyeti yaklaşık 437,877 RM'dir. ITS-AC sistemini kullanarak, yılda yaklaşık %68,5'lik bir tasarruf sağlayan, yılda yaklaşık 299,901 RM potansiyel tasarruf sağlanabilir.

Doğan ve arkadaşları [37], klima sistemlerinde buz depolama yönteminin üçlü elektrik tarifesine göre ekonomik analiz yapmışlardır. Elektrik idaresinin üçlü tarife olarak bilinen “Puant” tarifesine geçmesi ile birlikte buz ve su depolama sistemleri ekonomik hale gelmiştir. Buz veya su depolama sistemleriyle ilgili bilgilere daha çok önem verilerek bu tip sistemlerin kullanılabilirliğini yaygınlaştırmak gerekmektedir. Puant tarifi bu sistemlerin kullanılabilirliğini artırmak için yapılan en önemli teşviklerdendir. Bu yazıda su ve buz bankaları ile ilgili kısa bilgiler verildikten sonra, Antalya/Side mevkiindeki bir otele ait soğutma ihtiyacının, kısmen buz bankası metoduyla karşılanması halinde, ortaya çıkan ekstra maliyetler ve buz bankasının kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Lin ve arkadaşları [38], buz depolama klima sistemleri için optimal enerjiyi azaltmak için inceleme yapmışlardır. Bu makale, bir buz depolama klima sisteminin optimal enerji dağıtımını çözmek için bir karma algoritma önermektedir. Kullanım süresi (TOU) oranı altında soğutma yüklemesi dahil olmak üzere tüm kısıtlamaları yerine getirirken günlük maliyeti genel maliyeti en aza indirmektir. Gerçek bir iklimlendirme sistemine dayanarak, soğutulmuş suyun dönüş sıcaklığı, soğutulmuş suyun tedarik sıcaklığı, buz depolama suyunun dönüş sıcaklığı ve buz depolama suyunun tedarik sıcaklığı gibi veriler ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, günlük maliyet ve genel maliyetin en aza indirildiği görülmüştür.

Eames ve Adref [39], termal (buz) depolama sistemlerinde kullanılan türdeki küresel muhafazalarda suyun donması ve eritilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Bu yazıda, klima sistemlerinde kullanılan termal (buz) depolama sistemlerinin yataklarında bulunan tipteki küresel elemanlarda bulunan suyun donma ve erime işlemlerinin karakterizasyonunu amaçlayan deneysel bir çalışmanın sonuçları açıklanmakta ve değerlendirilmektedir. Sonuçlar, bir küredeki buz kütlesinin donma veya erime işlemleri sırasında herhangi bir zamanda tahmin edilmesini sağlayan yarı-denklemleri içermektedir.

Sehar ve arkadaşları [40], buz depolamanın ofis binalarındaki elektrik enerjisi tüketimine etkisini incelemişlerdir. Depolama ve buz depolama sistemleri için tüketim, yüksek iklim

koşullarına bağlıdır. Bu araştırma, farklı iklim bölgelerinde büyük ve orta ölçekli ofis binaları için geleneksel depolama ve buz depolama soğutma sistemlerinin soğutucu enerji tüketimini analiz etmektedir. Büyük ve orta ölçekli ofis binalarını modellemek ve simüle etmek için Talep Tepki Hızlı Değerlendirme Aracı (DRQAT) kullanılmıştır. Sonuçlar chiller enerjisinin olduğunu gösteriyor. Sıcak yazların yaşandığı iklim bölgelerinin yanı sıra küçük gün ve düşük sıcaklık değişimleri de daha yüksek chiller enerjisi göstermektedir.

Drees ve Braun [41], alan kısıtlamalı buz depolama tanklarının modellenmesi analiz etmişlerdir. Bu yazıda, alan kısıtlı buz depolama tanklarının ısı performansını öngörebilecek fiziksel parametrelere dayalı bir modelin geliştirilmesi ve doğrulanması açıklanmaktadır. Jekel ve arkadaşlarının çalışmalarına dayanan model (1993). Varsayımların ve çalışma koşullarının doldurma ve boşaltma sırasındaki tank performansına etkisini incelemek için kullanılmıştır.

Li ve Fang [42], istiflenmiş dikdörtgen kapsüller için buz depolamasının dinamik şarj performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu makale, yığılı dikdörtgen kapsüller için buz depolamasının şarj performansını tahmin etmek için kullanılan matematiksel bir modelin ayrıntılarını sunmaktadır. Model, kapsüllenmiş buz depolamasının özelliklerini etkileyen süper soğutma suyu fenomeninin detayını dikkate almaktadır. Su aşırı soğutma derecesinin ve soğutma sıvısı kütle akış hızının şarj performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sayısal sonuçlar, buzun depolanması için gereken sürenin, aşırı soğuma derecesi azalırken, önemli ölçüde kısaltıldığını gösterir.

Schibuola [43], bir ofis binasında buz depolama performansının deneysel çalışma yapılmıştır. Soğuk bina tesisatı kullanılarak şartlandırılmış binalardaki elektrik maliyetlerinin etkin bir şekilde azaltılması, tesisin tasarımını yaparken tesisin gerçek çalışma koşullarının ayrıntılı tahminine ve en iyi şekilde yönetilmesine bağlıdır. Nihai sonucu belirleyen sebeplerin çokluğu nedeniyle, bunu başarmak çok zordur. Bu çalışmada, bir buz depolama soğutma sistemi ile donatılmış bir banka servis merkezi tesisinin bir izleme testi sunulmaktadır. Ölçülen veriler tasarım aşaması beklentilerinden belirgin farklılıklar göstermektedir.

Sehar [44], farklı iklim bölgelerinde büyük ve orta büyüklükteki ofis binalarında buz depolamanın elektrik enerjisi tüketimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmanın

amacı, farklı iklim bölgelerinde büyük ve orta ölçekli ofis binaları için geleneksel depolama ve buz depolama soğutma sistemlerinin soğutucu enerji tüketimini analiz etmektir. Araştırma aynı zamanda buz depolama sistemlerinin bir sonucu olarak en yüksek enerji tasarrufunu da ölçmektedir. Sonuçlar, gündüz ve gece soğutucu çalışması nedeniyle buz depolama sistemlerinin geleneksel depolamasız sistemlerden daha yüksek soğutucu enerji tüketimine sahip olduğunu göstermektedir.

Seryani ve arkadaşları [45], Tahran'da bir organizasyon binası için buz termal depolama sistemlerinin teknik ve ekonomik inceleme çalışması yapmışlardır. Soğuk yükün, yüksek elektrik tüketim saatlerinden düşük tüketim saatlerine tamamen ve kısmen aktarılmasıyla, buz termal depolama sistemleri, çekme yükünün azaltılmasına, elektrik maliyetinin hesaplanmasından kaynaklanan maliyetlerin tasarrufuna ve azalmasına neden olur. Çalışmada, Tahran'da 10800 m<sup>2</sup> altyapıya, 8400 m<sup>2</sup> havalandırılmalı alana ve 1000 kW soğuk kapasiteye sahip bir organizasyon binası örneklem alanı olarak seçilmiştir. Bu bina için iki çalışma süresinde (10 ve 11 saat) buz depolama sisteminin teknik ve ekonomik olarak hesaplanması yapmışlardır.

Liang ve arkadaşları [46], yeni bir buz depolama klima sisteminin çalışma modları ve enerji analizleri yapmışlardır. Sıcaklık ve nemden bağımsız kontrol fikrine dayanarak, buz muhafaza iklimlendirme sistemini ve kılcal radyasyon iklimlendirmesini birleştiren yeni bir iklimlendirme sistemi sunulmaktadır. Klima sistemi güç yükü tepe yükü kayması, enerji tüketimini azaltmak ve iyi termal konfor sağlamak ile karakterizedir. Örnek olarak Hangzhou bölgesindeki bir ofis binasını ele alan deney, bina yükünü hesaplayarak, iklimlendirme planlarını tasarlayarak ve soğuk depolama stratejisi yaparak geliştirildi. Geleneksel iklimlendirme sistemi ile karşılaştırmak için enerji tüketimi analiz edilmiştir. Sonuçlar, buz depolama klima sisteminin enerji tasarrufunda avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Kiatsiriroat ve arkadaşları [47], doğrudan temaslı bir buz termal enerji depolaması için ısı transferi analizi yapmışlardır. Araştırmada çalışması doğrudan temaslı bir buharlaştırıcının ısı transfer özelliklerini incelemektedir. Doğrudan su ile ısı değişimi için soğuk iki fazlı bir soğutucu (R12 veya R22) bir depolama tankında tutulan suya enjekte edilir. Su sıcaklığı donma noktasına düşürülür ve buz oluşabilir. Topak modeli su sıcaklığını tahmin etmek için kullanılır ve bu modelin su sıcaklığını oldukça iyi tahmin

edebileceği bulunmuştur. Çalışmanın sonucunda, Stanton numarası, Stephan numarası, Prandtl numarası ve basınç oranı gibi boyutsuz parametreleri ilişkilendiren bir korelasyon da geliştirilmiştir.

Arcuri ve arkadaşları [48], Brezilya şehirlerindeki ticari binalar için buz termal enerji depolamanın (BTED) değerlendirilmesini incelemişlerdir. Çalışmada, Brezilya'daki buz termal enerji depolamasının tekno-ekonomik yönlerini, bina soğutma yükünü yoğun olmayan zamana kaydırmak için kullanılabilecek bir teknoloji olarak analiz etmektedir. BTED, yeni kurulum ve güçlendirme için iki farklı işletme stratejisi ve iki tip chiller kullanarak beş şehirde ve beş ticari arketipte değerlendirilir. Sonuçlar ITES'in ticari binalardaki en yüksek talebi etkili bir şekilde şekillendirebileceğini, bina sahipleri için ekonomik kazanımlar yaratabileceğini, ancak bazı durumlarda da zarar verebileceğini göstermiştir.

Han ve arkadaşları [49], bir kredi mekanizması aracılığıyla elektrik yükü yönetiminde buz depolama sistemlerinin performansının optimize edilmesi: Jiangsu, Çin için analitik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, yeni bir kredi temelli teşvik programı ve Çin'in Jiangsu kentinde mevcut teşvik düzenlemesi altında buz depolama sistemlerinin yük değiştirmedeki potansiyel etkilerini karşılaştıran bir analiz sunmaktadır. Çalışma, Jiangsu'da buz depolama sistemlerinin nasıl teşvik edildiğini değiştirerek, yük değiştirme sonuçlarının iyileştirilebileceğini gösteriyor.

Chen ve arkadaşları [50], dinamik programlama metodu kullanarak bir buz depolama klima sisteminin optimizasyonunu araştırmışlardır. Bu çalışmada, minimum depolama ömrü maliyetini ve buz depolama tankının verimliliğini dikkate alınmıştır. Sayısal program kullanılarak yapılan simülasyon analizi ile optimum chiller ve buz depolama tankı kapasitesi elde etmek için sistem optimizasyonu ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, soğutucu önceliği ve buz önceliği kontrol stratejileri kapsamında yaşam döngüsü maliyeti ve geri ödeme süresi ile ilgili bazı tasarım kılavuzlarını araştırmak için kullanılmıştır.

Abdullah ve arkadaşları [51], binalar için hibrit santrifüj-BTD sistemine dayalı tarife değişikliği ve buz termal depolama (BTD) kullanımı nedeniyle elektrik maliyeti tasarrufu karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada, Güney Doğu Asya bölgesinde bulunan bir üniversitenin bölgesel soğutma sistemi ile ilgili örnek olay incelemesi sunulmaktadır.

Elektrik analizi için ve toplam elektrik ücretlerini minimize etmek için birkaç bölge soğutma programı incelenmiştir. Binalarda buz termal depolama sistemleri olan ve olmayan santrifüj uygulamaları için tasarlanan birkaç senaryo incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, talep yükünün C2 tarifi ve C3 tarifesindeki toplam elektrik yüküne katkısının önemi anlaşılmıştır. Maksimum talep için en yüksek ücrete sahip olan C3 tarifi uygulanırken maksimum talebi azaltmak için çaba gösterildi. Bu proje, 2011 yılı için mevcut verilere dayanarak uygulanacak en iyi seçeneğin C3 tarifi olduğunu göstermiştir.

Rismanchi ve arkadaşları [52], Malezya'da ofis binalarında soğutma uygulamaları için farklı buz termal enerji depolama sistemlerinin kullanılmasının termodinamik açıdan irdemişlerdir. İstatistiksel veriler, ülkedeki AC enerji kullanımının neredeyse dörtte birinin ofis binalarından kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle, soğuk termal enerji depolama (STED) tekniğinin kullanılması, enerji talebini önemli ölçüde azaltabilir. Çalışmada, Malezya'da bir ofis binası için beş farklı STED sisteminin uygulanmasının makroskopik bir termodinamik analizi sunulmuştur. Çalışmanın sonucunda, tüm sistemlerin, buz hasadı için %93, en fazla %98 kapsüllenmiş teknik için minimum %98 ile enerji açısından verimli olduğunu göstermektedir.

Liu ve arkadaşları [53], buz termal depolama klima sisteminin kümülatif ekserji analizini incelemişlerdir. Kümülatif ekserji analiz yöntemine dayanarak, buz termal depolama (BTD) klima sisteminin güç kaynağına dahil edilmesinin etkisi analiz edilir. Sadece iklimlendirme sisteminin kümülatif ekserjisi değil aynı zamanda aynı tepe düzenleme ünitesinin ürettiği gücü tüketen işlemlerin de olduğu düşünülmektedir. Çalışmanın sonucunda, en yüksek üretici birim tarafından sağlanan gücü tüketen tüm işlemlerin toplam kümülatif ekserji tüketiminin, ITS sistemi uygulandıkça arttığını göstermektedir.

Erdemir ve Altuntop [54], kapsüllü BED sistemlerinde tank içerisinde kademeli porozite kullanmanın etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, tank içerisinde kademeli porozite kullanmanın etkisi analitik olarak araştırılmıştır. Çalışmada, 2m çapında ve 8m yüksekliğinde bir buz depolama tankı ve bu tankın iç kısımlarını açık gözenekli poroz ortam olarak modellemişlerdir. Tek katmalı, iki katmalı ve üç katmanlı porozite kullanmanın etkisi incelenmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kademeli porozite kullanmanın sistemin ısı performansını arttırdığını belirlenmişlerdir.

Erdemir [55], kapsüllü BED sistemlerinde geometrik olarak modifiye edilmiş kapsüllerin ısı performansını enerji boşaltma periyodu için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, geometrik olarak modifiye edilmiş yedi küresel kapsül incelenmiş ve sıradan küresel kapsülle karşılaştırılmıştır. Sayısal analizler için FLUENT 17.1 kodu kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, geometrik olarak modifiye edilmiş kapsüllerin, eşit kapsül hacminde sıradan bir küresel kapsülden daha yüksek termal performans sağladığı bulunmuştur.

Erdemir [56], kapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin sıcak su tankları içerisindeki konumlarının ısı enerji depolama performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Parafin kapsüllerin tank tabanından 0, 20, 40, 60 ve 80 cm mesafede yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, parafin kapsüllerinin tank içerisinde sıcak su bölgesinin başladığı konumdan itibaren yerleştirilmesi ile tanktan elde edilen sıcak su miktarının arttırdığı gözlenmiştir.

Gao ve arkadaşları [57], karbondioksit brayton döngüsü, düşük sıcaklıkta termal depolama ve soğuk enerji depolamaya dayalı yeni bir fiziksel enerji depolama sisteminin kapsamlı bir parametrik, enerji ve ekserji analizini incelemişlerdir. Su, termal depolama için çalışma ortamı olarak seçilmiş ve buz bulamacı, soğuk enerji depolaması için çalışma ortamı olarak seçilmiştir. Bu düşük sıcaklıkta karbondioksit enerji depolama sisteminin çalışma süreçleri ayrıntılı olarak tanıtıldı ve ilgili termodinamik model oluşturulmuştur. Birkaç önemli parametrenin sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek için parametrik analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, temel çalışma koşulundaki sistem için güç verimliliğinin %55,7, ekserji verimliliğinin %52,87, ısı enerji kullanım verimliliğinin %83,3 ve soğuk enerji kullanım verimliliğinin %89,5 olduğunu göstermiştir. İlgili araştırma, çalışma sıvısı olarak karbondioksit ile düşük sıcaklıkta enerji depolama sisteminin termodinamik performansını anlamak için önemli bir rehberlik sağladı.

Erdemir ve Altuntop [58], kapsüllü buz termal depolama sisteminin bir hipermarket için soğutma maliyetine etkisi araştırılmıştır. Hipermarket Ankara'da bulunmaktadır. Hipermarketin günlük en yüksek soğutma yükü 8332 kWh'dir. Soğutma maliyetini düşürmek için, kapsüllenmiş BED hipermarket klima sistemine entegre edilmiştir. Buz termal depolama sistemi kullanım stratejileri, sistemin ekonomik performansı üzerinde

büyük etkiye sahiptir. Çalışma da 10 yılın sonunda en yüksek kâr 1.400.000 USD'dir ve tam depolama stratejisinde görülmektedir. 10 yılın sonunda en düşük kar 185.000 USD'dir ve %10 kısmi depolamada görülmektedir. Çalışma sonucunda, artan depolama kapasitesi ile soğutma maliyetinin düştüğü görülmüştür.

Ezan ve Erek [59], serpantin üzerinde buzlu gizli enerji depolama sisteminin deneysel ve sayısal incelemiştir. Hazırlanan sarmal borulu gizli enerji deposundaki zamana bağlı soğu enerjisi değişimleri farklı debiler (20, 30, 40, 50 l/dk) için deneysel çalışmayla gözlenmiştir. Sistem için en uygun çalışma debisi ve giriş sıcaklığının belirlenmesi için ise, sistem ayrıca sayısal olarak da modellenmiştir. Entalpi yöntemi temel alınarak oluşturulan iki boyutlu matematiksel model, düşük Reynolds sayıları için deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Deneysel çalışmalar ve sayısal hesaplamalar sonucunda, akışkan giriş sıcaklığının depolanan enerjiyi arttırmada, hacimsel debiye göre daha etkili olduğu ve hacimsel debi artışının soğu enerjisini azalan bir eğilimle arttırdığı gözlenmiştir.

Wu ve arkadaşları [60], Taipei' deki çok işlevli bir ofis binası, soğutma maliyetini hasat yapılan bir buz termik enerji depolama sistemi uygulanmıştır. Sistem, yoğun olmayan soğutma talebini karşılamak için kısmi depolama yaklaşımını kullanırken, yoğun saat soğutma yükü hafifletilirken soğutulmuş su, önceki gece inşa edilmiştir. İki vidalı soğutucu, uygulama için aynı anda depolama için buz üretilirken soğutma grubunun soğutma suyuna soğuk su beslemesine olanak sağlamak için birbiriyle entegre olacaktır.

Çetin ve arkadaşları [61], ısııl enerji depolama ünitesi için buz kalınlığı ölçme yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, bir termal enerji depolama birimindeki katılaşma cephesini belirlemek için bir ölçüm yöntemi geliştirmektir. Bir faz değiştirme malzemesinin (PCM) elektriksel iletkenliği, katılaşma / eritme işleminde çarpıcı bir şekilde değişir ve önerilen ölçüm yöntemi, PCM'nin elektriksel iletkenliğinin gözlemlenmesine dayanır. Bu sistem ortamı, çoklu düğümler aracılığıyla gözlemlmek için bir mikroişlemci ve bir çoklayıcı birimi kullanmaktadır. Deneysel sonuçlar, bu yöntemin doğruluğunun, geleneksel fotoğrafçılık yöntemine kıyasla yaklaşık %3 olduğunu göstermektedir.

Li ve arkadaşları [62], ev tipi fotovoltaiik enerji sistemi ile çalışan statik buz soğutma iklimlendirme sisteminin performans analizini yapmışlardır. Ev tipi fotovoltaiik enerji

sistemi (HD PES) tarafından çalıştırılan statik buz soğutma klima sistemi (SIRACS) önerilmiş ve enerji dönüşümünün yanı sıra iletim performansı, teorik hesaplama ile deneysel test birleştirilerek araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, sistemin tipik olarak %11.76'lık bir ortalama fotoelektrik dönüşüm ve %52.76 kg'lık bir buz üretimi ile üç tipik hava koşulunda (güneşli, bulutlu ve hafif yağmurlu) stabil ve sürekli olarak çalıştırılabileceğini ortaya koymuştur. Bu sistem gece boyunca sürekli ve stabil bir şekilde 4 saat boyunca kullanıcıya hizmet verebilir. Bu nedenle, soğutma performansını iyileştirmek için bu makalede bazı optimizasyon stratejileri önerilmiştir.

Liu ve arkadaşları [63], plakalı bir eşanjörde buz bulamacının akışkan ve akışkanlık özelliklerinin araştırmışlardır. Katkı maddesi içermeyen buz bulamacı doğrudan temaslı gıda ve tıbbi koruyucu soğutma uygulamalarında olumlu bir rol oynamaktadır, çünkü şu an hepimiz şu anda katkı maddesi içermeyen buz bulamacının akış ve ısı transfer özellikleri hakkında yeterli araştırma yapılmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, bir plaka ısı eşanjörü aracılığıyla katkı maddeleri olmadan ağırlıkça %0 ila %20 buz bulamacının akış ve ısı transfer özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmaktadır. Çalışmanın sonucunda, buz bulamacının basınç düşüşünün, akış hızı 0.414'ten 1.1 m<sup>3</sup>/saat'e yükselirken yaklaşık 5.5-61.0 kPa olduğunu, soğutulmuş suyun yaklaşık 1.2-1.6 katı olduğunu göstermektedir.

Matsumoto ve arkadaşları [64], su-yag karışımı kullanan buz depolama sistemi buz oluşumu işleminde katkı maddesi etkisini araştırmışlardır. Bu yazıda, süspansiyon oluşturma işleminin özelliklerini netleştirmek için deneyler yapılmıştır. Aynı zamanda, bir yağ-su karışımından yapılan bir süspansiyonu (sulu buz) soğutma ve karıştırarak da çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, hem buz grubuna soğutma yapışmasına gerek kalmadan yüksek IPF'li bir süspansiyon oluşturmak için hem bir amino grubuna (-NH<sub>2</sub>) hem de bir silanol grubuna (-SiOH) sahip bir katkı maddesinin gerekli olduğu bulunmuştur. Dahası, süspansiyonda oluşan buz parçacıkları dağılmış ve granül olmuş ve birbirine yapışmamıştır.

Galanis ve arkadaşları [65], buz bulamacının pipe sıralarının yatay bir boruda ısı transferini incelemek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, etilen glikol su buz bulamacının, yatay bir ısıtılmalı tüpten kaynaklanan termal davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Buz bulamacının, sıcaklığa ve buz fraksiyonuna bağlı olarak etkili

özelliklere sahip bir Newton sıvısı gibi davrandığı varsayılmaktadır. 3D sabit durum modeli, sıvı-katı karışım için kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin yanı sıra konvektif ve difeksler arasındaki dengeyi karakterize eden buz parçacıkları için bir taşıma denklemini içermektedir. Buz parçacıkları ve taşıyıcı sıvı arasındaki ısı ve kütle değişimleri kaynak terimleri ile modellenmiştir.

Wijeyesunder ve arkadaşları [66], su ve soğutucu, Fluroinert FC-84 arasındaki doğrudan temaslı ısı transferi kullanılarak bir buz bulamaç üretim sistemi geliştirilmiştir. Soğutucu nozülün konumu, suyun donmasından dolayı tıkanmayı önlemek için önemli bir tasarım konusudur. Çalışmanın sonucunda, buz bulamaç tankının dibinde bulunan nozül ile yüzde 40'a kadar bir buz fraksiyonu elde edilmiştir ve jet suya doğru yönlendirilmiştir. Soğutma suyu damlaları ile su arasındaki ısı transfer katsayısını çıkarmak için iki basitleştirilmiş model geliştirilmiştir.

Pronk ve arkadaşları [67], depolama sırasında farklı buz bulamaçlarının zamana bağlı davranışlarını incelemişlerdir. Buz bulamacının ikincil soğutucu olarak en önemli avantajlarından biri, yük kaymasını ve en yüksek tıraşı sağlayan soğuk depolanma olasılığıdır. Soğuk hava depoları sırasında, buz kristalleri yıpratma, aglomerasyon ve Ostwald olgunlaşması gibi mekanizmalara maruz kalmaktadır, bu da kristal buğu dağılımında değişikliklere neden olmakta ve buz bulamaç sistemleri için basınç düşüşü ve ısı transferi özellikleri gibi diğer parametreleri etkiledikleri için büyük önem taşımaktadır. Sulu sodyum klorür, etilen glikol, etanol ve propilen glikol çözeltilerinde buz kristalleri ile depolama deneyleri, Ostwald olgunlaşmasının ortalama kristal boyutunda bir artışa neden olan en önemli mekanizma olduğunu göstermektedir.

Paya ve arkadaşları [68], ticari bir buz depolama tankının sıcaklıklarının ve performansının deneysel olarak incelenmiştir. Bu makale, toplam 172 kWh kapasiteye sahip dahili bir eriyik-buz-bobin tankı ile yapılan deney kurulumunun sonuçlarını sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yaklaşık 1855 l suya batırılmış ters akım spiral şekilli rulolara sahip bir tanktaki donma sürecini analiz etmektir. Farklı giriş ile deneysel bir kampanya gerçekleştirildi. Bu çalışma (i) chiller performansını, (ii) buz oluşum sürecini ve (iii) tesisin enerji tüketimini analiz etmektedir. 2.5°C ile 5.2°C arasındaki besleme sıcaklıkları yeterlidir. Tankı, herhangi bir çekirdekletirici madde kullanmadan şarj etmeniz gerekmektedir. En hızlı şarj testleri için en düşük enerji tüketimi elde edilmiştir.

Sanaye ve arkadaşları [69], iklimlendirme uygulamaları için bir buz termal enerji deposunun dört E analizini ve çok amaçlı optimizasyonunu incelemişlerdir. Klima (A / C) sistemlerinin en yüksek elektrik talebini azaltmanın bir yöntemi, A / C sistemiyle bir buz termal enerji depolaması (ITES) içermesidir. Bu yazıda A / C uygulamaları için bir ITES sistemi modellenmiştir ve enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel yönlerden analiz edilmiştir (4E analizi). Modellenen ITES'in performansı sistem aynı zamanda geleneksel bir sistemle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, ITES sistemindeki elektrik tüketiminin geleneksel olandan %10,9 daha düşük olduğunu gösterdi. Ayrıca, konvansiyonel sisteme kıyasla 0.659106 kg CO<sub>2</sub>'nin atmosfere yayılması engellenmiştir. ITES sistemini kullanmanın getirdiği ekstra sermaye maliyeti, 3.39 yıl içerisinde elektrik tüketimindeki tasarruflarla geri ödenmiştir.

Sanaye ve arkadaşları [70], tam ve kısmi çalışma modlarında klima uygulaması için buz termal enerji depolama sistemlerini (BTED) analiz etmişlerdir. Bir klima (AC) sisteminde elektrik tüketimini azaltmak için bir yöntem, buz termal enerji depolama sistemi kullanmaktır. ITES sistemleri tam ve kısmi çalışma modları (FOM ve POM) olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Çalışmada, ITES sistemli bir AC enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel (4E) açıdan iki tam ve kısmi yük işletme modunda modellenmiştir ve analiz edilmektedir. Çalışmanın sonucunda, BTED sisteminin, geleneksel sisteme göre tam ve kısmi çalışma modlarında karşılaştırılmıştır ve elektrik tüketiminde azalma (FOM için %11,83 ve POM için %10,23) göstermiştir.

Augusto ve arkadaşları [71], buz termal enerji depolama sistemi ile bölgesel soğutma dağıtım şebekesi için tasarım kriterlerinin belirlenmesi için sayısal model geliştirmişlerdir. Her bir enerji aktarma istasyonunda teorik sistem basınç düşüşü, sistem akış hızı ve akış hızı gereksinimlerinin tespit edildiği, buz termik enerji depolama sistemine sahip bölgesel soğutma sisteminin iki dağıtım ağı modeli sunulmuştur. Enerji kullanımını iyileştirmek ve ağda bir dağıtım pompasına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmak için değişken birincil akışlı pompalama sistemi düzenlemesi kullanılmıştır. Lineer olmayan denklem sistemleri çok değişkenli Newton-Raphson metodu kullanılarak çözülmüştür.

Krarti ve Hajiah [72], hem buz deposu hem de termal kütle kullanarak bina depolama sistemlerinin optimum kontrolleri - parametrik analiz yapmışlardır. Bu makale, toplam

işletme maliyetlerini (enerji ve talep maliyetleri de dahil olmak üzere) düşürürken aynı zamanda toplam işletme maliyetlerini azaltmak için aynı anda bina termal kapasitansı ve buz depolama sisteminin kullanılmasının etkinliğini etkileyen faktörleri araştırmak için bir dizi parametrik analizin sonuçlarını sunmaktadır. Bina termal kütlesi ve aktif termal enerji depolama sisteminin birleşik kullanımının, entegre binaların ticari binaları işlettiği düşünüldüğünde, toplam enerji maliyetlerinin %40'ına kadar tasarruf sağlayabildiği bulunmuştur.

Murphy ve arkadaşları [73], dinamik gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırma ortamında buz depolamasının optimizasyonu için kontrol sistemlerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın amacı, soğuk bir termal depolama buz bankasına talep tarafı yönetimi optimizasyon kontrolörü getirmenin faydalarını değerlendirmektir. Soğuk termal depolama yükü değiştirme kontrol cihazının öngörülen bir gün önceden gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırma ortamında çalışmasını simüle ederek hem ekonomik hem de şebeke yönetimi faydaları bulunmuştur.

Hong ve arkadaşları [74], veri analizleri ve ticari binalar için buz bazlı enerji depolama sisteminin optimizasyonu geliştirilmişlerdir. Buz bazlı termal enerji depolama (TED) sistemleri, ticari binalarda en yüksek soğutma talebini değiştirebilir ve işletme enerji maliyetlerini (kullanım süresi oranları ile) azaltabilir. Soğutma yükünün doğru tahmini ve bir buz tabanlı TED sisteminin şarj ve deşarjının yönetilmesi için en uygun kontrol stratejisi, sistem performansını iyileştirmek ve enerji maliyet tasarrufunu sağlamak için iki kritik unsurdur. Bu çalışma, bir alışveriş merkezindeki buz tabanlı TED sisteminin işleyişini bütünsel olarak anlamak için veri odaklı analitik ve modellemeyi kullanarak, kurulu sayaçlardan ve sensörlerden gerçek ölçülen verileri kullanarak sistemin performansı hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, mevcut faaliyette önemli tasarruf potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Carbonell ve arkadaşları [75], bir buz deposu içeren birleşik güneş enerjisi ve ısı pompası sistemi için dinamik bir sistem simülasyonu sunulmuştur. Simüle edilen sistem İsviçre'deki Rapperswil-Jona'da bulunan bir pilot tesisteki bir yıllık ölçümlerle doğrulandı. Meteonorm hava durumu verileri içeren yıllık simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, Zürih iklimi için ölçülen hava durumu verileri kullanan simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Gerçek verilerle 13 yıllık sonuçların ortalaması,

Meteonorm verileriyle elde edilen sonuçlara kıyasla SPFSHP +%24 oranında bir artış göstermiştir.

Longzhe ve arkadaşları [76], bir yeraltı madeninde kalıcı bir sığınak odası için zorla dolaşan bir buz termal depolama sisteminin boşaltma performansını incelemişlerdir. Bu çalışma, 50 kişilik konaklama kapasitesine sahip kalıcı bir sığınma odası için tasarlanmış bir zorunlu dolaşım buz termal depolama sistemi (BTED) için uygun bir kontrol stratejisi geliştirmeyi amaçlamıştır. BTED'nin ısı transfer özellikleri teorik ve deneysel yaklaşımlarla incelenmiştir. Geçici boşaltma gücünü tahmin etmek için yarı kararlı, tek boyutlu bir matematik modeli ve asgari soğutma ihtiyacını karşılamak için bir kontrol stratejisi önerilmiştir.

Rahdar ve arkadaşları [77], ofis binalarındaki iklimlendirme sistemleri için PCM ve buz termik enerji depolama tankı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Klima (A / C) sistemlerinin belirgin şekilde artan talebi, son yıllarda yoğun saatlerde daha fazla güç tüketimine neden olmuştur. Bu yazıda, bir buhar sıkıştırma A / C sistemi iki hibrit sistem stratejisi ile analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ITES ve PCM sistemlerinin güç tüketiminin sırasıyla geleneksel sisteme göre %4,59 ve %7,58 daha düşük olduğunu göstermiştir.

Fan ve Long [78], buz depolama sisteminin elektrik sektörüne katkısı: karbondioksit emisyonlarının azaltılması için bir yöntem geliştirmişlerdir. Buz depolama sisteminin kullanılmasından kaynaklanan elektrik sektörünün CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki azalmayı hesaplamak için bir yöntem sunulmuştur. Doğu Çin elektrik şebekesi altındaki bir ofis binasındaki tipik bir buz depolama sistemi analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, buz depolama sisteminin kullanılmasıyla, elektrik şebekesinin yük faktörünün iyileştirilebileceğini ve böylece elektrik sektörünün CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabileceğini göstermiştir. Tipik buz depolama sistemi için depolama birimi başına CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması 0,557 kg / kWh'tir.

Grozdek [79], soğutucu enerjinin buz bankası veya buz bulamaç sistemlerinden yük kaydırılması ve depolanmasını araştırmıştır. Buz Bazlı Soğuk Isı Enerjisi Depolama (STED) sistemleri, son birkaç on yılda çok dikkat çekmiştir. Sebepler çoğunlukla ekonomik ve çevresel niteliktedir. Soğuk termal enerji depolaması olmayan geleneksel soğutma ve iklimlendirme sistemleri ile karşılaştırıldığında, STED'in uygulanması,

sentetik soğutucuların çıkışına katkıda bulunan ve elektrik şebekelerindeki azami yükleri azalttığı için çevre standartlarını ve enerji sistemlerinin genel verimliliğini artıracaktır.

Comodi ve arkadaşları [80], soğuk termal enerji depolaması için sıfırın altındaki faz değişim malzemelerinin deneysel ve sayısal karakterizasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada, sıfır altı PCM'lerin farklı kategorilerinin termal profillerini elde etmek için silindirik şekilli bir kaptaki deneysel bir donanım tasarlanmıştır. Deiyonize suyun (buz) deneysel ölçümü ilk olarak sayısal bir 1-D modelini kalibre etmek ve doğrulamak için kullanılmıştır. Sulu sodyum klorür, sulu etilen glikol ve dekan dahil olmak üzere üç tip sıfır altı PCM ayrıca test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, sulu alkolün deneylerle en iyi uyuma sahip olduğunu göstermiştir.

Tian ve arkadaşları [81], gömülü ısı boruları ile çalıştırılan portatif bir soğuk termal enerji depolama panelinin boşaltma işlemi ve performansı deneysel olarak incelenmiştir. Panelin soğuk enerji beslemesini kontrol etmenin etkili bir yolu, hava sıcaklığını ve hava hızını kontrol etmektir. Bununla birlikte, hava tarafındaki HP'lerin yerleşiminin yanı sıra sıcaklığa göre değişen hava özellikleri, panelin kontrolünde dolaylı olan enerji beslemesi üzerinde etkiye sahiptir. Bu nedenle, hava özellikleri ile soğuk enerji tedarik performansı arasındaki bağlantıyı göstermek için ortalama etkinlik-NTU yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, etkinlik-NTU tekniğinin, soğutma kapasitesinin giriş hava sıcaklığı ve hava hızı ile değişimini tanımlayabildiğini göstermektedir.

Meng ve arkadaşları [82], duyarlı ve gizli ısı termal enerji depolama tanklarının termal performans analizi yapmışlardır. Gizli ve Duyarlı Isı Termal Enerji Depolama (LHTES ve SHTES) LHTES-Tank ve SHTES-Tank'ın termal performansını sırasıyla parafin RT55 ve termal depolama ortamı olarak su ile analiz etmek için kontrastlı bir deney yapılmıştır. Deney, Isı Transfer Sıvısı (HTF) sıcaklıklarını 20 °C ile 80 C arasında değiştirerek 5 termal yükleme ve boşaltma döngüsünü içermektedir. Çalışmanın sonucunda, termal boşaltmanın LHTES Tank'taki termal yüklemekten daha zor olduğunu göstermektedir.

Rismanchi ve arkadaşları [83], soğuk termal enerji depolama (STED) sistemlerinin enerji, ekserji ve çevre analizi üzerine yapılan çalışmaları gözden geçirmiştir. Ayrıca bu sistemlerin çevresel etkileri ve ekonomik fizibilitesi de araştırılmıştır. Bununla birlikte, uygun bir STED tekniğinin seçilmesi, temel olarak ortam sıcaklığı profili, elektrik oranı

yapısı ve kullanıcının alışkanlığı gibi yerleştirilmiş parametrelere bağlıdır, bu da birçok bağımsız parametreye bağlı olduğundan oldukça zor ve karmaşık hale getirir. Bu nedenle, enerji ve ekserji analizinin daha iyi bir yargıya önemli ölçüde yardımcı olabileceği bulundu. İnceleme belgesi, dışsal verimlilik analizinin enerji verimliliği analizinden daha gerçekçi bir resim gösterebileceğini göstermiştir.

Rismanchi ve arkadaşları [84], ofis binası uygulamaları için buz termal depolama sistemlerinden yararlanmanın enerjik, ekonomik ve çevresel faydaları incelenmiştir. Malezya'daki iklimlendirme sistemleri, yaklaşık %57 pay ile ofis binalarındaki en büyük enerji tüketicileri olarak kabul edilmektedir. Çalışma, tam depolama ve yük dengeleme depolama stratejisi olmak üzere iki depolama stratejisi için 100-2000 ton soğutma (352 7034 kW) aralığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, 500 ve 1500 TR (1758 kW ve 5275 kW) toplam sistem kapasiteleri için 0,06 ABD Doları / kWh'lik özel yoğun olmayan tarife oranı dikkate alındığında, yıllık maliyet tasarrufunun 230.000 ila 700.000 ABD Doları ve tam depolama için 65.000 ila 190.000 ABD Doları arasında değiştiğini göstermektedir.

Rahdar ve arkadaşları [77], ofis binalarında iklimlendirme sistemleri için PCM ve buz termal enerji depolama tankı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma dışsal, ekonomik ve çevresel bakış açılarından modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada, bir buhar sıkıştırma A / C sistemi, hibrit sistemlerin iki stratejisi aracılığıyla analiz edilmiştir. İlk olarak, a.m. hibrit sisteminde bir buz termal enerji depolama (BED) sistemi kullanılmış ve daha sonra bir faz değişim malzemesi (PCM) tankı, tam depolama sistemi olarak (yükün) tepe noktasından tepe dışı moda kaydırılması için (sırayla) kullanılmıştır. Ekserji verimliliği ve toplam maliyet oranı objektif fonksiyonlar olarak ele alınmış ve ardından ITES, PCM ve geleneksel sistemler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, BED ve PCM sistemlerinin güç tüketiminin geleneksel sistemden sırasıyla %4,59 ve %7,58 daha düşük olduğunu göstermiştir.

Wang ve arkadaşları [85], farklı depolama stratejileri kullanarak öykünmüş bir klima sisteminde yeni bir soğuk termal depolama malzemesinin performansı araştırmışlardır. Bu çalışmada soğuk hava deposu performansını değerlendirmek için sıcaklık dağılımı, şarj etme ve boşaltma hızı ve kapasitesi temel indeksler olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, yük işletimi sağlayan bir tank şarj-soğutucu sırasında, bypass kullanmak

termal depolama etkinliği için elverişsizdir. Yük işletimi sağlayan bir tank boşaltma soğutma grubu sırasında, daha sonraki bir aşamada bypass ile başlayan chiller, sistem verimliliği için uygun bulunmuştur.

Yapılan literatür taramasından görüldüğü üzere, BED sistemleri klima sistemlerinin elektrik tüketim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Ayrıca termal yönden iyileştirilmiş BED sistemleri ekonomik yönden de olumlu etki sağlamaktadır. Her binanın çalışma saatleri, ihtiyaçları ve işletme koşulları farklı olduğundan, BED sistemleri farklı binalarda farklı ekonomik performans göstermektedir. BED sistemleri sadece soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için yaz dönemlerinde kısıtlı sürede kullanılmaktadır. Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, BED sisteminin, ısıtma ihtiyaçlarını karşılamada, ısı pompaların düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak kullanılması araştırılmıştır. Önerilen sistem, İstanbul'da yer alan bir ofis binasının soğutma ve ısıtma yüklerini karşılamak teorik olarak uygulanmış, sistem termodinamik ve ekonomik olarak değerlendirilmiştir.

## 2. BÖLÜM

### YÖNTEM VE MATERYAL

#### BUZ DEPOLAMA SİSTEMİNİN VE MAHALİN TANITIMI

Bu bölümde, tez çalışmasında incelenen ofis binası ve önerilen kapsüllü BED entegre klima ve ısı pompası sistemi tanıtılmış, termodinamik analizlerde kullanılan bağıntılar verilmiştir.

##### 2.1. Ofis Binasının ve Mahallin Tanıtımı

Bu tez çalışmasında kullanılan bina, İstanbul'da yer alan ısıtma, havalandırma ve iklimlendirmeyi içeren (HVAC) ve enerji tüketiminin yoğun olduğu bir ofis binasıdır. İncelenen bina, yer üstü on iki kat ve dört yeraltı otoparkı seviyesine sahip, 1.36 en boy oranında, 17.670 m<sup>2</sup> alana sahiptir. Ofisleri, bilgisayar odalarını, konferans salonlarını içerir ve yılda 300 gün, günde 12 saat (8-20) açıktır. Bina ile ilgili bilgiler, ısıtma ve soğutma verileri Eskin ve Türkmen [86]'ın çalışmasından elde edilmiştir. Doluluk, elektrik tüketimi ve soğutulmuş su tüketimi hafta içi / hafta sonu farkları gösterir; hafta içi tatil doluluk hafta sonu kullanımına benzer, ofis odaları kullanımda değil, bekçi odası meşguldür. Yeraltı seviyesi olan otopark aydınlatılmış, ancak ısıtma ve soğutma yapılmamıştır. Ayrıntılı bina enerji simülasyonları EnergyPlus bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, maslak olarak İstanbul'daki ofis binası (ticari bina) tercih edilmiştir. Çünkü binada soğutma yükü yüksektir ve ısıtma yükü fazla değildir. İstanbul nemli bir iklime sahip olması ve yaz dönemlerindeki dış hava sıcaklığı, BED sistemi için üçlü tarife kullanımının daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Ofis binasının saatlik soğutma yükü Tablo 2.1 ve Şekil 2.1 'de ve saatlik ısıtma yükü Tablo 2.2 ve Şekil 2.2'de verilmiştir. Bina 08:00 ile 20:00 saatleri arasında aktif olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.1 ve Şekil 2.1'den görüldüğü üzere ofis binasının pik soğutma yükü 1,465 kWh ve Tablo 2.1 ve Şekil 2.2'den görüldüğü üzere, ofis binasının pik ısıtma yükü 1412 kWh'tir. Binanın toplam soğutma yükü 13,636 kWh ve toplam ısıtma yükü ise 9972 kWh'tir.

Tablo 2.1. Ofis Binasının Saatlik Soğutma ve Isıtma Pik Yükleri

| Saat        | Saatlik Pik Soğutma Yükü<br>(kWh) | Saatlik Pik Isıtma Yükü<br>(kWh) |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 07:00-08:00 | 249                               | 1412                             |
| 08:00-09:00 | 545                               | 1236                             |
| 09:00-10:00 | 862                               | 1023                             |
| 10:00-11:00 | 1034                              | 905                              |
| 11:00-12:00 | 1229                              | 769                              |
| 12:00-13:00 | 1281                              | 735                              |
| 13:00-14:00 | 1463                              | 610                              |
| 14:00-15:00 | 1426                              | 636                              |
| 15:00-16:00 | 1465                              | 610                              |
| 16:00-17:00 | 1452                              | 618                              |
| 17:00-18:00 | 1401                              | 652                              |
| 18:00-19:00 | 1229                              | 766                              |
| TOPLAM      | 13636                             | 9972                             |

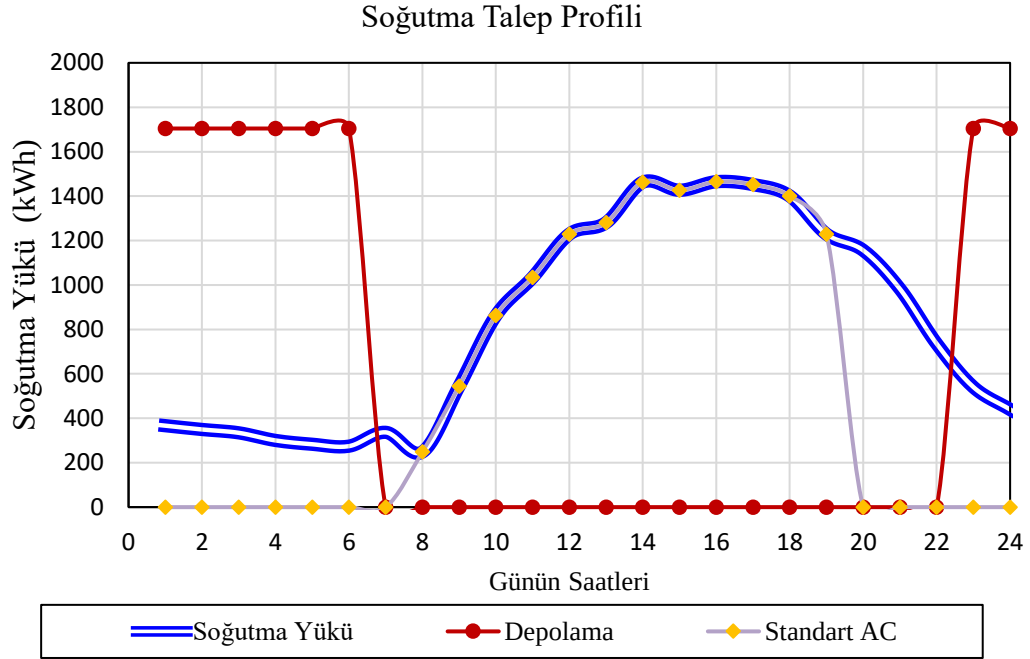
Not: Veriler kaynak [86]'ten elde edilmiştir.

İstanbul, kurak ve maki ikliminin tesiri altında bulunur. Bu yüzden, yazlar sıcak ve kurak, kışlar yağışlı ve ılık geçmektedir. İstanbul'a ait 1929 ile 2019 yılları arasındaki meteorolojik verilerin ortalama değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Tablo 2.2'den görüldüğü üzere, İstanbul'da yer alan binaların, bir yıl içerisinde yaklaşık 5-6 ay boyunca soğutmaya ihtiyacı bulunmaktadır. Bu süre mahallin kullanım şekline ve binada kullanılan cihaz ve ekipmanların sayısına ve insan sirkülasyonuna göre uzayabilmektedir.

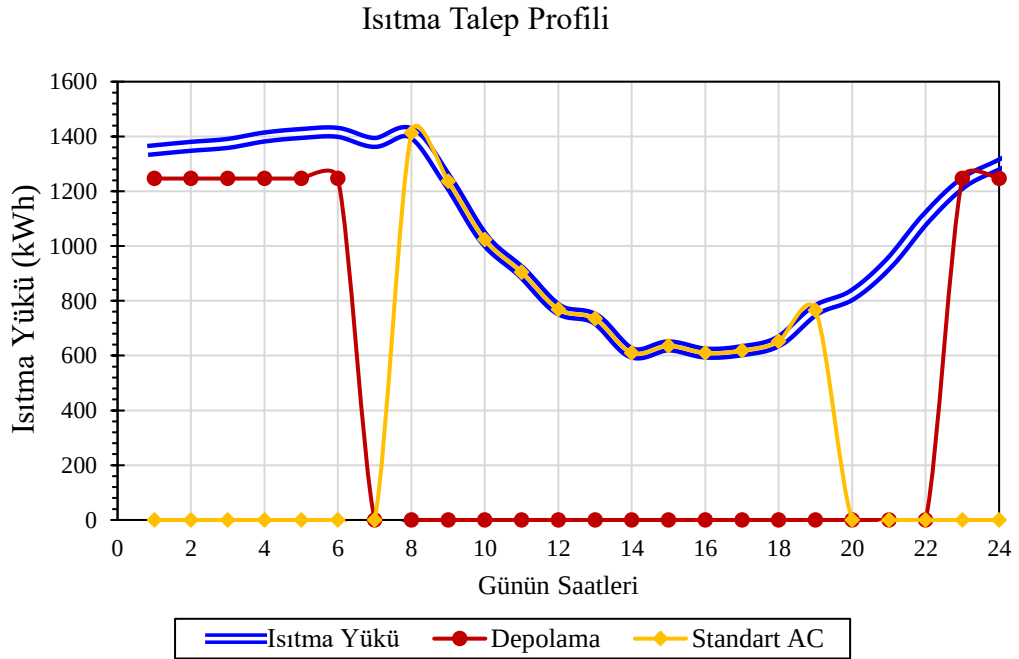
Tablo 2.2. İstanbul İline Ait 1929-2019 Yılları Arasındaki Meteorolojik Veriler [87]

| AYLAR                                             | O     | Ş     | M     | N    | M    | H    | T    | A    | E    | E    | K    | A     | YIL   |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| <b>Ortalama Sıcaklık (°C)</b>                     | 5.9   | 5.9   | 7.6   | 11.9 | 16.7 | 21.3 | 23.8 | 23.9 | 20.3 | 16.0 | 11.9 | 8.2   | 14.5  |
| <b>Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)</b>           | 8.8   | 9.3   | 11.6  | 16.7 | 21.7 | 26.3 | 28.7 | 28.9 | 25.2 | 20.3 | 15.5 | 11.2  | 18.7  |
| <b>Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)</b>            | 3.2   | 3.1   | 4.3   | 7.9  | 12.3 | 16.5 | 19.0 | 19.3 | 16.0 | 12.4 | 8.8  | 5.4   | 10.7  |
| <b>Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)</b>          | 2.4   | 3.2   | 4.4   | 6.1  | 8.3  | 10.2 | 10.9 | 10.1 | 8.1  | 5.5  | 3.6  | 2.5   | 75.3  |
| <b>Ortalama Yağışlı Gün Sayısı</b>                | 15.2  | 13.2  | 11.7  | 8.9  | 6.6  | 4.7  | 3.0  | 3.4  | 5.5  | 9.0  | 11.2 | 14.5  | 106.9 |
| <b>Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)</b> | 86.8  | 72.1  | 62.3  | 44.1 | 31.3 | 24.8 | 22.6 | 27.7 | 44.1 | 70.0 | 86.1 | 105.3 | 677.2 |
| <b>En Yüksek Sıcaklık (°C)</b>                    | 22.4  | 24.6  | 29.3  | 29.3 | 36.4 | 40.2 | 41.5 | 40.5 | 39.6 | 34.2 | 27.8 | 25.5  | 41.5  |
| <b>En Düşük Sıcaklık (°C)</b>                     | -13.9 | -16.1 | -11.1 | -2.0 | 1.4  | 7.1  | 10.5 | 10.2 | 6.0  | 2.2  | -7.2 | -11.5 | -16.1 |

Bu tez çalışmasında incelenen ofis binasının soğutma ve ısıtma yük değerleri ve depolama yapıldığı durumdaki yük dağılımları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 'de görülmektedir. Şekillerdeki mavi çizgi, kaynak [85]'den elde edilen binanın saatlik soğutma ve ısıtma yük dağılımlarını göstermektedir. Bina 08:00 ve 20:00 (12 saat açık) saatleri arasında çalıştığında soğutma ve ısıtma yapmakta, binanın çalışmadığı saatlerde ısıtma ve soğutma yapılmamaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de görüldüğü üzere soğutma ve ısıtma yükünü karşılamak için depolama pik olmayan saatlerde yapılmaktadır. Binanın açık olduğu 12 saatlik dönemdeki pik soğutma ve ısıtma yüklerinin tamamı depolanmaktadır.



Şekil 2.1. BED Sisteminin Saatlik Soğutma Yüğü Miktarlarının Gösterimi



Şekil 2.2. BED Sisteminin Saatlik Isıtma Yüğü Miktarlarının Gösterimi

## 2.2. Çalışmada Kullanılan Mahalin Elektrik Tarife Bilgisi

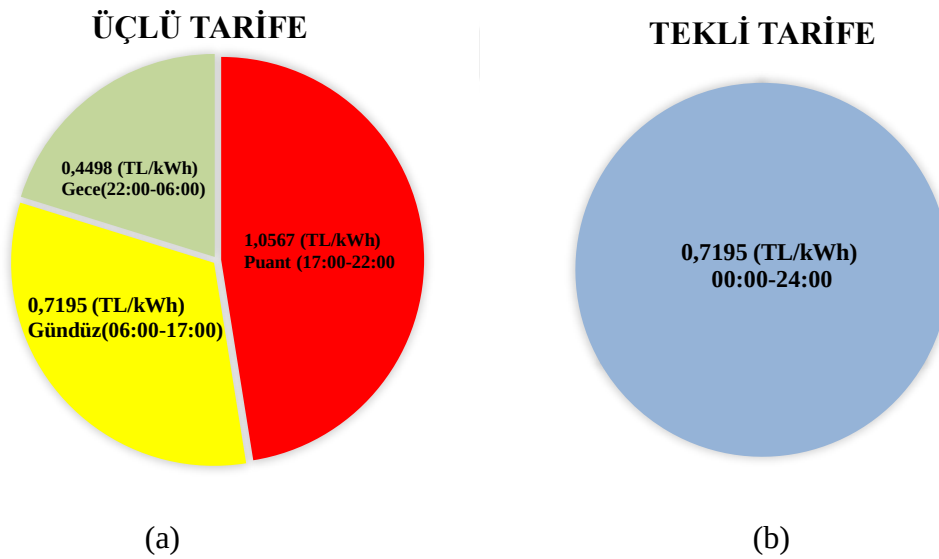
Soğutma sistemleri binalar için ciddi bir işletme ve ilk yatırım maliyeti oluşturmaktadır. Soğutmaya bağlı enerji tüketim maliyetlerini düşürmek ve soğutma sistemlerinden daha

yüksek verim ile yararlanmak için kullanılabilir en etkili yöntemlerden biri buzdaki enerji depolama (BED) sistemleridir. BED elektrik gün içerisindeki değişiminden yararlanarak soğutma maliyetlerini düşürür. Çalışmada, ofis binasında kullanılan elektrik tarifi, üçlü tarife olup, soğutma sisteminde kullanılmaktadır.

Tablo 2.3. Ofis Binasında Kullanılan Üçlü Tarife Elektrik Birim Fiyatları

| Tarife | Saat Aralığı | Birim Fiyat (TL/kWh) |
|--------|--------------|----------------------|
| Gündüz | 06:00-17:00  | 0,7195               |
| Puant  | 17:00-22:00  | 1,0567               |
| Gece   | 22:00-06:00  | 0,4498               |

Ofis binası için iki farklı elektrik tarifi için hesaplama yapıp karşılaştırılmıştır. Ofis binasının elektrik tarifelerinin gösterimi Tablo 2.3’de ve Şekil 2.3’de verilmiştir. Tekli tarife elektrik birim fiyatı ise 0,7102 TL/kWh’tir. Bu birim fiyat değerleri Ocak 2020 dönemine ait EPDK verilerinden elde edilmiştir [88].



Şekil 2.3. Binada Kullanılan Elektrik Birim Fiyatının Grafiksel Gösterimi a) Üçlü Tarife b) Tekli Tarife

Ülkemizde elektrik enerjisi satışlarında binaların kullanım şekline göre tekli veya üçlü tarife sistemi uygulanmaktadır. Ülkemizde elektrik enerjisi satışlarında uygulanmakta olan üçlü tarifeye göre satış sisteminde gün; 06:00-17:00 saatleri arasında gündüz, 17:00-22:00 saatleri arasında puant ve 22:00-06:00 saatleri arasında gece tarifi olarak üç zaman dilimine ayrılmıştır. Her zaman dilimine ait elektrik birim satış fiyatı TL/kWh olarak tespit edilmiştir. Elektrik enerjisine olan talebe göre belirlenen birim fiyatlar her üç zaman diliminde de birbirinden farklılıklar göstermektedir. En ucuz elektrik enerjisi

birim fiyatı gece tarifiesi döneminde olup, 17:00-22:00 arasındaki en pahalı fiyattan %75 – %85 civarında daha ucuzdur. Elektrik enerjisi birim fiyatlarındaki bu fark, BED sistemlerinin 22:00-06:00 arasında buz üretmeyi ve depolamayı, 17:00-22:00 arasında tüketmeyi ekonomik bir tercih haline getirmektedir.

### 2.3. Ofis Binasında Kullanılan BED Sisteminin Detayları

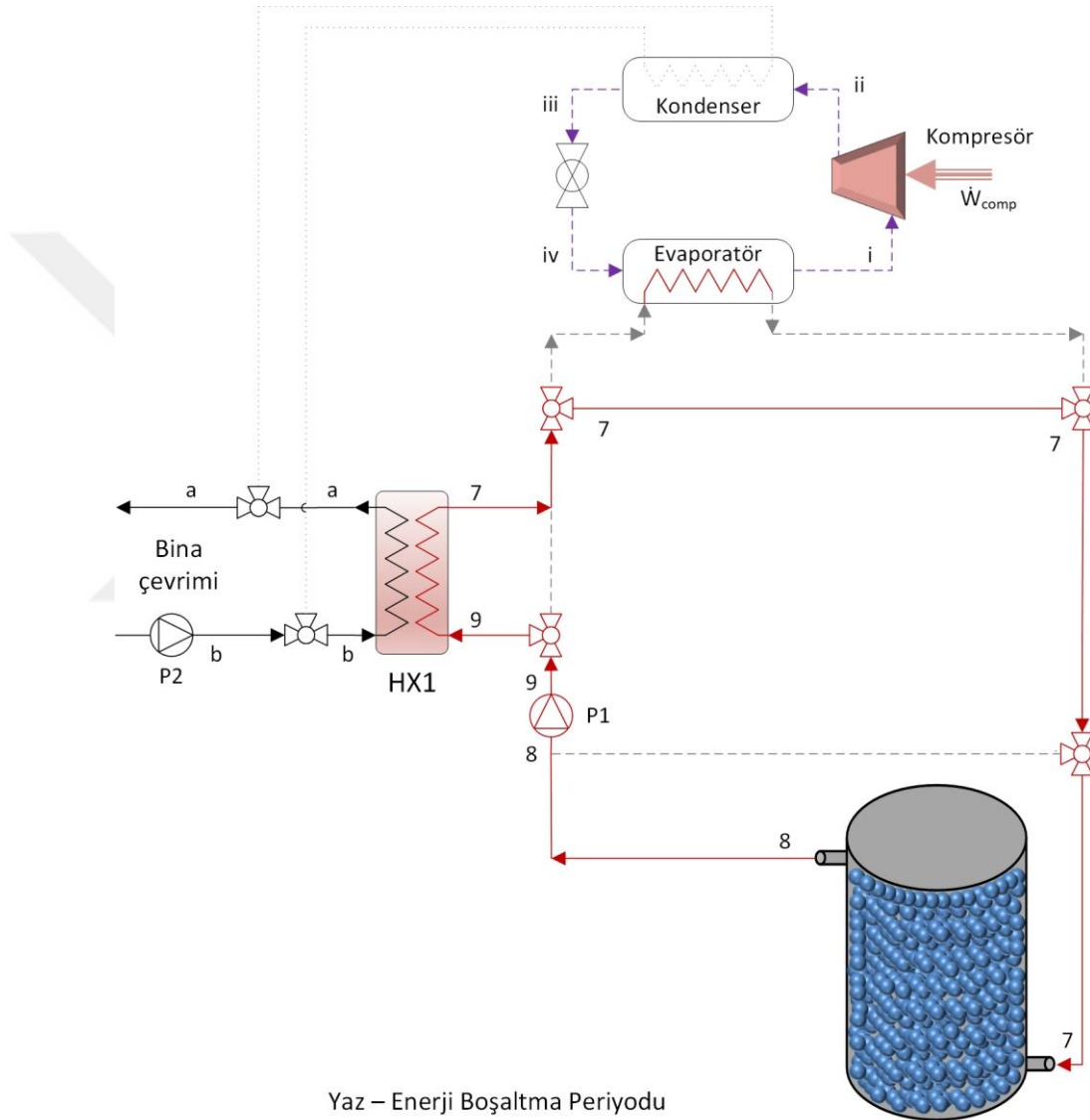
Çalışmada kullanılan BED sisteminin yaz mevsimi için buz yapma (enerji yükleme), buz eritme (enerji boşaltma) ve normal soğutma (bekleme, depolama) periyotlarındaki şematik görünümü Şekil 2.4, 2.5 ve 2.6’da sırasıyla gösterilmiştir. BED sisteminin kış mevsimi için buz yapma ve buz eritme periyotlarındaki tesisat şeması ve şematik görüntüsü Şekil 2.7 ve 2.8’de verilmiştir. Şekil 2.4- 2.8’den görüldüğü üzere; sistem genel olarak buz tankı, soğutma grubu (çiller), plakalı ısı değiştiricisi, pompa, tesisat ve tesisat elemanlarından oluşmaktadır. BED sistemi, genel olarak, 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.

Isı pompası entegre BED sisteminde tek fark ısı pompasının düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak depolanan buzun kullanılmasıdır. Isı pompası entegre BED sisteminde, ısıtmaya ihtiyaç duyulan dönemlerde düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından (buz) ısı çekerek, bu ısıyı yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına (bina) aktarmaktır. Isı pompalarında, kondenserde yüksek sıcaklıkta dışarı atılan ısıdan suyun ısıtılması sağlanır. Termodinamiğin II. yasası, ısının düşük sıcaklık seviyesinden yüksek sıcaklık seviyesine transferi için yardımcı bir enerji kaynağının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu enerji ihtiyacı bu sistemde kompresörden karşılanmaktadır. Sonuç olarak ısı pompası entegre BED sisteminin yukarıdaki fazladan maliyete ek olarak ısı pompası maliyeti de eklenmektedir.

BED sistemindeki bu fazladan maliyet dezavantaj olarak gözükse de ısı pompası entegre sistem, klima sistemlerinin kapasitesini, elektrik tüketim maliyetini ve bina için gerekli jeneratör, kablo kesiti vb. ekipmanların kapasitesini düşürerek ilk yatırım maliyetini azaltmaktadır. Sistemde farklı ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan fan coil, kazan ve boru hatları gibi yüksek ek maliyetlerin bulunmaması büyük avantaj sunmaktadır.



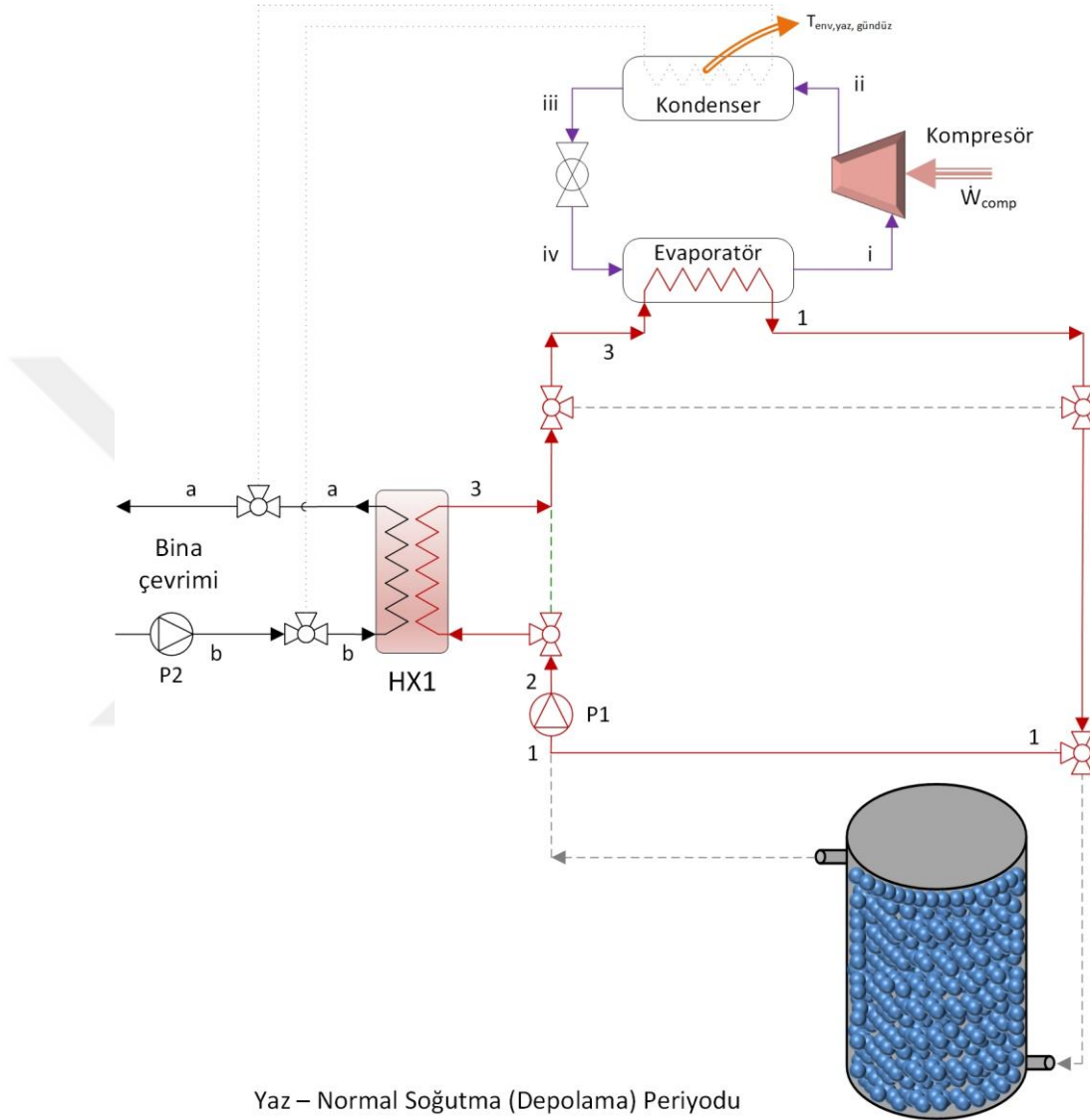
Şekil 2.4'ten görüldüğü üzere, buz yapma modunda  $-6^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutma grubu vasıtasıyla soğutulur ve ısı transfer akışkanı buz tankına gönderilir. Tanka giren ITES,  $-3^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısınır ve soğutma grubuna gönderilir. Soğutma grubunda tekrar  $-6^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar soğutulur ve tanka gider. Bu çevrim gece tarifiesi boyunca devam eder.



Şekil 2.5. Soğutma Sisteminin Yaz Mevsimi için Buz Eritme Modundaki Şematik Gösterimi

Buz eritme periyodunda (Şekil 2.5) sistemin soğutma grubu ile olan akış bağlantısı üç yollu vana ile kesilir. Bina soğutması için kullanılan ısı değişiricisine önceden üretilen buzlar eritilerek  $4^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta gönderilir. Burada, bina dağıtım merkezinden gelen su

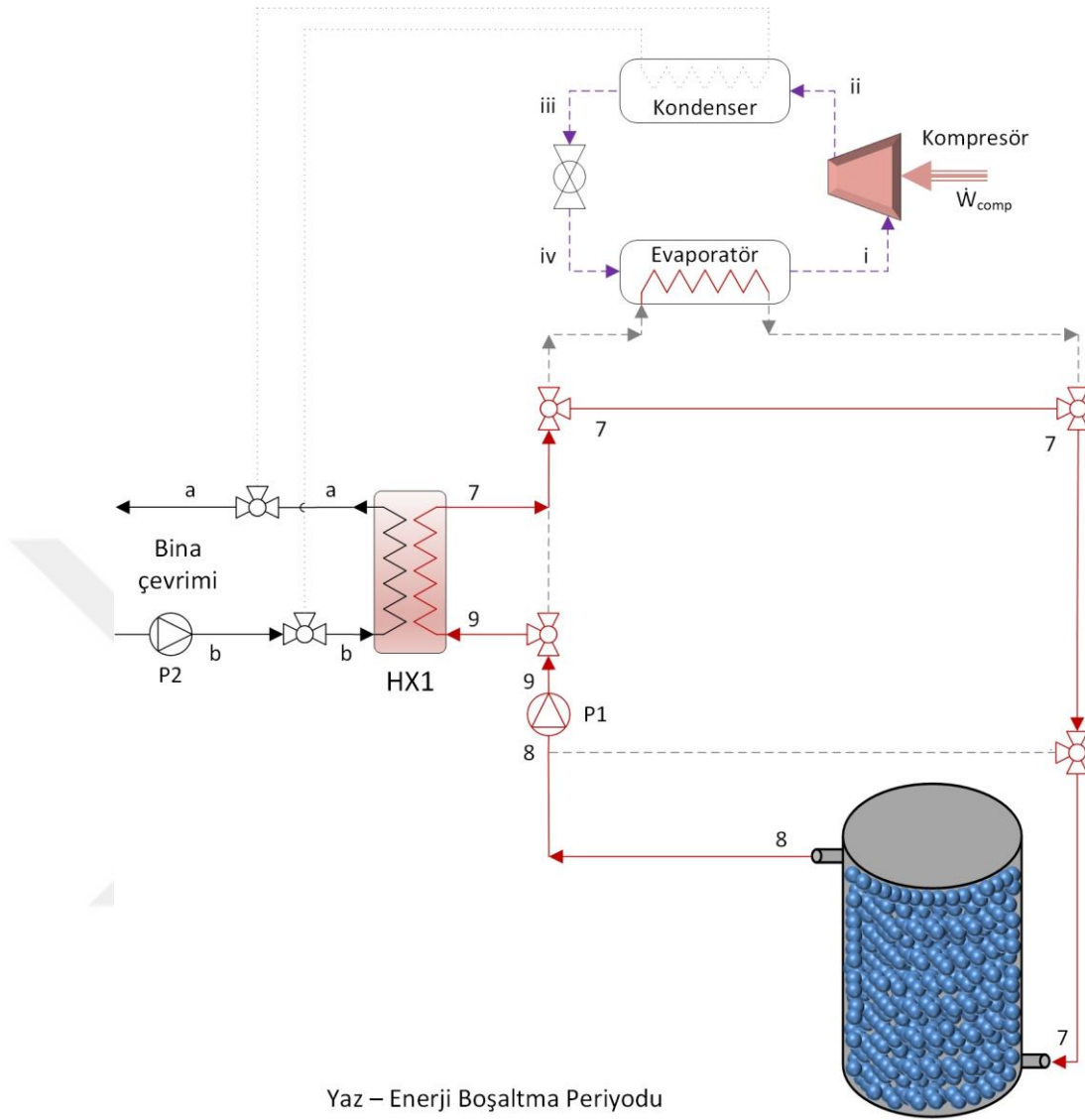
soğutulur. Isı transfer akışkanı ısı değiştiricisinden 10°C de çıkar ve buz tankına gönderilir. Bu çevrim elektriğin pahalı olduğu pik zamanlarda yapılmaktadır.



Şekil 2.6. Soğutma Sisteminin Yaz Mevsimi için Normal Soğutma Modundaki Şematik Gösterimi

Şekil 2.6'dan görüldüğü üzere, normal soğutma periyodunda depolanma tankı devre dışıdır. Soğutma sistemi normal bir klima sistemi gibi çalışır. Normal bina soğutmasında soğutma grubundan 4°C'de çıkan ITA plakalı ısı değiştiricisine gönderilir. Plakalı ısı değiştiricisinde 10°C sıcaklığa ısıtılan ısı transfer akışkanı soğutma grubuna geri gönderilir. Bu çalışma periyodu gündüz tarifesi boyunca devam eder.





Şekil 2.8. Soğutma Sisteminin Kış Mevsimi için Buz Eritme Modundaki Şematik Gösterimi

Buz eritme periyodunda (Şekil 2.8), ürettiğimiz buzları ısı pompasının ısı kaynağı olarak kullanıldığı için soğutma gurubunda evaporatöre ve binanın ısıtma hattına ısı sağlanmaktadır. Bu ısı geçişi ile su ısıtılmakta ve tekrar binaya gönderilmektedir. Çevrim bu şekilde devam eder.

#### 2.4. Termodinamik Analizler

Bu kısımda, önerilen ısıl enerji depolama sisteminin termodinamik analizlerinde kullanılan denklemler açıklanmıştır. Bir sistemi termodinamik açıdan incelemek için dört denge denklemleri sisteme uygulanmalıdır [89]:

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

#### 2.4.1. Kütle Dengesi

Kütlenin korunumu doğanın en temel ilkelerinden biridir. Kütle de enerji gibi korunum yasalarına uyar; başka bir deyişle kütle vardan yok edilemeyeceğini veya yoktan var edilemeyeceğini açıklar. Bununla birlikte kütlenin bir diğerine dönüşeceğini ifade eder. KH (kontrol hacmi) veya açık sistem için kütlenin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir [90]:

$$\begin{aligned} & \text{(Kontrol Hacmine Giren Toplam Kütle)} - \text{(Kontrol Hacmine Çıkan Toplam Kütle)} \\ & = \text{(Kontrol Hacmi İçinde Toplam Kütle değişimi)} \end{aligned}$$

Bu ifade aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dm_{KH}}{dt} = \sum \dot{m}_{giriş} - \sum \dot{m}_{çıkış} \quad (2.1)$$

Burada  $m$  ve  $\dot{m}$  sırasıyla kütle ve kütleli debiyi ifade etmektedir. Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmediği için  $\sum \dot{m}_{giriş} = \sum \dot{m}_{çıkış}$  olur.

#### 2.4.2. Enerji Dengesi

Bir sistemin enerji analizi, sistemi tanımak için çok önemlidir. Enerji analizi ile sisteme giren ve çıkan ısı, enerji ve iş etkileşimi ile belirlenir ve termodinamiğin birinci yasası (TD1K) uygulanarak veya enerjinin korunumu ilkesi, enerji dengesi aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir:

$$\text{Giren enerji} - (\text{Çıkan enerji} + \text{Isı kazancı}) = \text{Sistemdeki toplam enerji değişimi} \quad (2.2)$$

$$\dot{E}_g - (\dot{E}_ç + \dot{Q}_{kayıp}) = \Delta \dot{E} \quad (2.3)$$

### 2.4.3. Entropi Dengesi

Entropi, sistemle ilgili bir özelliktir. Enerjinin tersine, entropi miktarı korunan bir özellik değildir, yani entropinin korunumu ilkesi diye bir kavramdan da söz edilemez.

Termodinamikte önemli sonuçlara yol açan bu korunmama durumu Clausius eşitsizliği ile açıklanmaktadır. Clausius eşitsizliği,  $\delta Q/R$  termodinamik bir çevrim üzerinde integral sıfıra eşit veya sıfırdan küçük olduğunu söyler. Bu eşitsizlik tersinir veya tersinmez tüm çevrimler için geçerlidir. Yani entropi tersinmezliğin bir ölçüsüdür. Tersinmez bir hal değişimi sırasında bir miktar entropi üretilir veya var edilir, entropi üretimi tümüyle tersinmezliklerle ilgilidir. Bir hal değişimi sırasında üretilen veya var edilen entropi, entropi üretimi olarak adlandırılır ve sistemin içindeki tersinmezlikleri temsil eder.

Entropi, moleküler düzensizlik veya moleküler rastgelelik olarak görülebilir. Bir sistem daha düzensiz bir hal aldıkça, moleküllerin konumları belirsizleşecek ve entropi artacaktır. Enerjinin niceliği (miktarı) gerçek bir hal değişimi sırasında her zaman korunur (TD1K), fakat niteliği azalmak zorundadır (TD2K). Nitelikteki bu azalma entropi artışıyla birlikte olur. Yani 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 entropi de ki artış ilkesi aşağıdaki gibi yazılabilir [90]:

$$\begin{aligned} & (\text{Giren toplam entropi}) - (\text{Çıkan toplam entropi}) + (\text{Üretilen toplam entropi}) \\ & = (\text{Sistemdeki toplam entropi değişimi}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\Sigma \dot{S}_{giren} - \Sigma \dot{S}_{çıkan} + \dot{S}_{üretilen} = \Delta \dot{S}_{sistem} \quad (2.5)$$

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.

$$I = T_0 \dot{S}_{üretilen} \quad (2.6)$$

Burada  $I$  ve  $T_0$  ifadeleri sırasıyla ekserji yıkımı (kaybolan ekserji) ve ortam sıcaklığıdır. Bu ifadeden görüldüğü üzere çevre sıcaklığı ekserji üzerinde önemli etkiye sahiptir. Aynı

zamanda bu ifade hem ekserji yok oluşunu hem de entropi üretimi sistem içerisindeki tersinmezlikleri ifade eder.

#### 2.4.4. Ekserji Dengesi

Daha önceki bölümlerde enerjinin yoktan var edilemeyeceğini, var olan enerjinin de yok edilemeyeceği (TD1K) bilgisi verilmişti. Enerji tüketilemez veya üretilmez. Yani enerji bir türünden başka bir türüne dönüşür. Bu dönüşümün üst sınırlarını TD2K ile belirlenmiştir. Isıl sistemlerde Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunun ortak açıklaması, enerjinin iş yapabilme potansiyeli olduğu, iş yapabilme potansiyelinin azaldığı veya kaybolduğu olarak açıklanabilir. Enerjinin iş potansiyeli, yeteneği ekserji olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, belirli bir halde ve miktardaki enerjinin yararlı iş potansiyeli özelliğine kullanılabilirlik veya kullanılabilir enerji diye ifade edilebilir. Bir sistemin ekserji analizi yapılması ile sistemdeki tersinmezlikler ve bu tersinmezliklerin miktarı belirlenir. Bu şekilde sistemin daha iyi çalışması için gereken tüm önlemler alınabilir. Ekserji analizi, sistem içindeki kayıpları da hesaba kattığı için, ısı bir sistem için ekserji verimliliği belirlenmesi ve ekserji dengesinin yazılması önemlidir. Genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} & (\text{Ekserji girişi}) - (\text{Ekserji çıkışı} + \text{Ekserji kaybı}) - (\text{Ekserji yok oluşu}) \\ & = (\text{Sistemdeki toplam ekserji değişimi}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\dot{E}x_g - (\dot{E}x_c - \dot{E}x_{Q_{kayıp}}) - I = \Delta \dot{E}x_{sistem} \quad (2.8)$$

Burada  $\dot{E}x$  ifadesi ekserjiyi,  $\dot{E}x_{Q_{kayıp}}$  ısı kazancından dolayı kaybolan ekserjiyi,  $I$  ekserji yıkımı ve  $\Delta \dot{E}x_{sistem}$  ise sistemdeki ekserji değişimini göstermektedir. Sistem çevrim halinde çalıştığı için  $\Delta \dot{E}x_{sistem} = 0$ 'dır.

#### 2.4.5. BED Sisteminin Termodinamik Analizi

Yukarıda genel şekilde verilen dört denge denklemi Şekil 2.4 ile Şekil 2.8 arasında verilen sistemin çalışma periyotları için ayrı ayrı yazılmıştır. Her bir durum için denge denklemleri Tablo 2.4 ve Tablo 2.5 ayrı ayrı verilmiştir. Analizler sırasında Engineering

Equation Solver (EES) yazılımı kullanılmıştır. Termodinamik analizlerde yapılan kabüller aşağıda sıralanmıştır.

- Referans koşulları  $T_0=25\text{ °C}$  and  $P_0=101,325\text{ kPa}$  olarak alınmıştır.
- Sistem elemanlarındaki basınç düşüşleri ihtimal edilmiştir.
- Proseslerin kararlı koşullar altında gerçekleştiği kabul edilmiştir.
- İş akışlarının termodinamik özellikleri çalışma koşullarına göre değiştiği kabul edilmiştir.
- Analizler binanın pik soğutma ve ısıtma yükleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.
- Etilen-glikol çözeltisinin EES programında entropi değerleri bulunmadığından, entropi üretim değerleri, ekserji yıkımı değerlerinden Denklem 2.6 ile elde edilmiştir.

Binanın yaz ve kış için performans katsayısı, enerji ve ekserji verim denklemleri Tablo 2.9'da tüm sistem için COP denklemleri Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.4. Yaz Modu-Buz Yapma Periyodu Denge Denklemleri

|                 | <b>Evaporatör</b>                                                                                                | <b>Kompresör</b>                                                               | <b>Buz Tankı</b>                                                                                                      |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_6 = \dot{m}_4$                                                                                          | $\dot{m}_v = \dot{m}_{vi}$                                                     | $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$                                                                                               |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_6 h_6 + \dot{Q}_{eva} = \dot{m}_4 h_4$                                                                  | $\dot{m}_v h_v + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{vi} h_i$                            | $\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{Q}_{depo}$                                                                      |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_6 s_6 + \left(\frac{\dot{Q}_E}{T_E}\right) + \dot{S}_{\text{üret,EVA}} = \dot{m}_4 s_4$                 | $\dot{m}_v s_v + \dot{S}_{\text{üret,KOMP}} = \dot{m}_{vi} s_{vi}$             | $\dot{E}x_{kyp,DEPO} = T_0 \dot{S}_{\text{üret,DEPO}}$                                                                |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_6 ex_6 + \left(\frac{T_0}{T_E} - 1\right)\dot{Q}_E = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{kyp,EVA}$               | $\dot{m}_v ex_v + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{vi} ex_{vi} + \dot{E}x_{kyp,KOMP}$ | $\dot{m}_4 ex_4 = \dot{m}_5 ex_5 + \left(1 - \left(\frac{T_0}{273}\right)\right)\dot{Q}_{depo} + \dot{E}x_{kyp,DEPO}$ |
|                 | <b>Kondenser</b>                                                                                                 | <b>Genişleme Vanası</b>                                                        | <b>Pompa</b>                                                                                                          |
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_{vi} = \dot{m}_{vii}$                                                                                   | $\dot{m}_{vii} = \dot{m}_{viii}$                                               | $\dot{m}_5 = \dot{m}_6$                                                                                               |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_{vi} h_{vi} = \dot{m}_{vii} h_{vii} + \dot{Q}_{kon}$                                                    | $\dot{m}_{vii} h_{vii} = \dot{m}_{viii} h_{viii}$                              | $\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_p = \dot{m}_6 h_6$                                                                           |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_{vi} s_{vi} + \dot{S}_{\text{üret,KON}} = \dot{m}_{vii} s_{vii} + \left(\frac{\dot{Q}_C}{T_C}\right)$   | $\dot{m}_{vii} s_{vii} + \dot{S}_{\text{üret,KV}} = \dot{m}_{viii} s_{viii}$   | $\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{üret,P}} = \dot{m}_6 s_6$                                                             |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_{vi} ex_{vi} = \dot{m}_{vii} ex_{vii} + \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right)\dot{Q}_C + \dot{E}x_{kyp,KON}$ | $\dot{m}_{vii} ex_{vii} = \dot{m}_{viii} ex_{viii} + \dot{E}x_{kyp,KV}$        | $\dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_p = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{kyp,P}$                                                      |

Tablo 2.5. Yaz Modu-Buz Eritme Periyodu Denge Denklemleri

|                 | Buz Tankı                                                                                       | Pompa                                                            | Isı Değiştirici                                                                     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$                                                                         | $\dot{m}_8 = \dot{m}_9$                                          | $\dot{m}_9 = \dot{m}_7 \quad \dot{m}_a = \dot{m}_b$                                 |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_{depo}$                                                | $\dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_p = \dot{m}_9 h_9$                      | $\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_b h_b$                     |
| Entropi Dengesi | $\dot{E}x_{kyp,DEPO} = T_0 \dot{S}_{üret,DEPO}$                                                 | $\dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{üret,p} = \dot{m}_9 s_9$               | $\dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_a s_a + \dot{S}_{üret,HX} = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_b s_b$ |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_8 ex_8 + (1 - (\frac{T_0}{273}))\dot{Q}_{depo} + \dot{E}x_{kyp,DEPO}$ | $\dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_p = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{kyp,p}$ | $\dot{m}_9 s_9 + \dot{m}_a s_a = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_b s_b + \dot{E}x_{kyp,HX}$ |

Tablo 2.6. Yaz Modu-Normal Soğutma Periyodu Denge Denklemleri

|                 | <b>Evaporatör</b>                                                                                      | <b>Kompresör</b>                                                               | <b>Pompa</b>                                                                               |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_3 = \dot{m}_1$                                                                                | $\dot{m}_i = \dot{m}_{ii}$                                                     | $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$                                                                    |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_{eva} = \dot{m}_1 h_1$                                                        | $\dot{m}_i h_i + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{ii} h_{ii}$                         | $\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_p = \dot{m}_2 h_2$                                                |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_3 s_3 + (\frac{\dot{Q}_E}{T_E}) + \dot{S}_{\text{üret,EVA}} = \dot{m}_1 s_1$                  | $\dot{m}_i s_i + \dot{S}_{\text{üret,KOMP}} = \dot{m}_{ii} s_{ii}$             | $\dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{\text{üret,P}} = \dot{m}_2 s_2$                                  |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_3 ex_3 + (\frac{T_0}{T_E} - 1) \dot{Q}_E = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{kyp,EVA}$               | $\dot{m}_i ex_i + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{ii} ex_{ii} + \dot{E}x_{kyp,KOMP}$ | $\dot{m}_1 ex_1 + \dot{W}_p = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}x_{kyp,P}$                           |
|                 | <b>Kondenser</b>                                                                                       | <b>Genişleme Vanası</b>                                                        | <b>Isı Değiştirici</b>                                                                     |
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_{ii} = \dot{m}_{iii}$                                                                         | $\dot{m}_{iii} = \dot{m}_{iv}$                                                 | $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad \dot{m}_a = \dot{m}_b$                                        |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_{ii} h_{ii} = \dot{m}_{iii} h_{iii} + \dot{Q}_{kon}$                                          | $\dot{m}_{iii} h_{iii} = \dot{m}_{iv} h_{iv}$                                  | $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_b h_b$                            |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_{ii} s_{ii} + \dot{S}_{\text{üret,KON}} = \dot{m}_{iii} s_{iii} + (\frac{\dot{Q}_C}{T_C})$    | $\dot{m}_{iii} s_{iii} + \dot{S}_{\text{üret,KV}} = \dot{m}_{iv} s_{iv}$       | $\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_a s_a + \dot{S}_{\text{üret,HX}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_b s_b$ |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_{ii} ex_{ii} = \dot{m}_{iii} ex_{iii} + (1 - \frac{T_0}{T_C}) \dot{Q}_C + \dot{E}x_{kyp,KON}$ | $\dot{m}_{iii} ex_{iii} = \dot{m}_{iv} ex_{iv} + \dot{E}x_{kyp,KV}$            | $\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_a s_a = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_b s_b + \dot{E}x_{kyp,HX}$        |

Tablo 2.7. Kış Modu-Buz Yapma Periyodu Denge Denklemleri

|                 | <b>Evaporatör</b>                                                                                                 | <b>Kompresör</b>                                                                           | <b>Buz Tankı</b>                                                                                                                   |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13}$                                                                                     | $\dot{m}_{xiii} = \dot{m}_{xiv}$                                                           | $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$                                                                                                      |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{13} h_{13}$                                                       | $\dot{m}_{xiii} h_{xiii} + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{xiv} h_{xiv}$                         | $\dot{m}_{13} h_{13} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{Q}_{depo}$                                                                       |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_{15} s_{15} + \left(\frac{\dot{Q}_E}{T_E}\right) + \dot{S}_{\text{üret},EVA} = \dot{m}_{13} s_{13}$      | $\dot{m}_{xiii} s_{xiii} + \dot{S}_{\text{üret},KOMP} = \dot{m}_{xiv} s_{xiv}$             | $\dot{E}x_{kyp,DEPO} = T_0 \dot{S}_{\text{üret},DEPO}$                                                                             |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_{15} ex_{15} + \left(\frac{T_0}{T_E} - 1\right) \dot{Q}_E = \dot{m}_{13} ex_{13} + \dot{E}x_{kyp,EVA}$   | $\dot{m}_{xiii} ex_{xiii} + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_{xiv} ex_{xiv} + \dot{E}x_{kyp,KOMP}$ | $\dot{m}_{13} ex_{13} = \dot{m}_{14} ex_{14} + \left(1 - \left(\frac{T_0}{273}\right)\right) \dot{Q}_{depo} + \dot{E}x_{kyp,DEPO}$ |
|                 | <b>Kondenser</b>                                                                                                  | <b>Genişleme Vanası</b>                                                                    | <b>Pompa</b>                                                                                                                       |
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_{xiv} = \dot{m}_{xv}$                                                                                    | $\dot{m}_{xv} = \dot{m}_{xvi}$                                                             | $\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$                                                                                                      |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_{xiv} h_{xiv} = \dot{m}_{xv} h_{xv} + \dot{Q}_{kon}$                                                     | $\dot{m}_{xv} h_{xv} = \dot{m}_{xvi} h_{xvi}$                                              | $\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{W}_p = \dot{m}_{15} h_{15}$                                                                            |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_{xiv} s_{xiv} + \dot{S}_{\text{üret},KON} = \dot{m}_{xv} s_{xv} + \left(\frac{\dot{Q}_C}{T_C}\right)$    | $\dot{m}_{xv} s_{xv} + \dot{S}_{\text{üret},KV} = \dot{m}_{xvi} s_{xvi}$                   | $\dot{m}_{14} s_{14} + \dot{S}_{\text{üret},P} = \dot{m}_{15} s_{15}$                                                              |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_{xiv} ex_{xiv} = \dot{m}_{xv} ex_{xv} + \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right) \dot{Q}_C + \dot{E}x_{kyp,KON}$ | $\dot{m}_{xv} ex_{xv} = \dot{m}_{xvi} ex_{xvi} + \dot{E}x_{kyp,KV}$                        | $\dot{m}_{14} ex_{14} + \dot{W}_p = \dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{E}x_{kyp,P}$                                                       |

Tablo 2.8. Kış Modu-Buz Eritme Periyodu Denge Denklemleri

|                 | <b>Evaporatör</b>                                                                                               | <b>Kompresör</b>                                                               | <b>Buz Tankı</b>                                                                                                                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_{12} = \dot{m}_{10}$                                                                                   | $\dot{m}_{ix} = \dot{m}_x$                                                     | $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$                                                                                                      |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{10} h_{10}$                                                     | $\dot{m}_{ix} h_{ix} + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_x h_x$                         | $\dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{Q}_{depo}$                                                                       |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_{12} s_{12} + \left(\frac{\dot{Q}_E}{T_E}\right) + \dot{S}_{\text{üret,EVA}} = \dot{m}_{10} s_{10}$    | $\dot{m}_{ix} s_{ix} + \dot{S}_{\text{üret,KOMP}} = \dot{m}_x s_x$             | $\dot{E}x_{kyp,DEPO} = T_0 \dot{S}_{\text{üret,DEPO}}$                                                                             |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_{12} ex_{12} + \left(\frac{T_0}{T_E} - 1\right) \dot{Q}_E = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{kyp,EVA}$ | $\dot{m}_{ix} ex_{ix} + \dot{W}_{komp} = \dot{m}_x ex_x + \dot{E}x_{kyp,KOMP}$ | $\dot{m}_{10} ex_{10} = \dot{m}_{11} ex_{11} + \left(1 - \left(\frac{T_0}{273}\right)\right) \dot{Q}_{depo} + \dot{E}x_{kyp,DEPO}$ |
|                 | <b>Kondenser</b>                                                                                                | <b>Genişleme Vanası</b>                                                        | <b>Pompa</b>                                                                                                                       |
| Kütle Dengesi   | $\dot{m}_x = \dot{m}_{xi}$                                                                                      | $\dot{m}_{xi} = \dot{m}_{xii}$                                                 | $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$                                                                                                      |
| Enerji Dengesi  | $\dot{m}_x h_x = \dot{m}_{xi} h_{xi} + \dot{Q}_{kon}$                                                           | $\dot{m}_{xi} h_{xi} = \dot{m}_{xii} h_{xii}$                                  | $\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{W}_p = \dot{m}_{12} h_{12}$                                                                            |
| Entropi Dengesi | $\dot{m}_x s_x + \dot{S}_{\text{üret,KON}} = \dot{m}_{xi} s_{xi} + \left(\frac{\dot{Q}_C}{T_C}\right)$          | $\dot{m}_{xi} s_{xi} + \dot{S}_{\text{üret,KV}} = \dot{m}_{xii} s_{xii}$       | $\dot{m}_{11} s_{11} + \dot{S}_{\text{üret,P}} = \dot{m}_{12} s_{12}$                                                              |
| Ekserji Dengesi | $\dot{m}_x ex_x = \dot{m}_{xi} ex_{xi} + \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right) \dot{Q}_C + \dot{E}x_{kyp,KON}$       | $\dot{m}_{xi} ex_{xi} = \dot{m}_{xii} ex_{xii} + \dot{E}x_{kyp,KV}$            | $\dot{m}_{11} ex_{11} + \dot{W}_p = \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{E}x_{kyp,P}$                                                       |

Tablo 2.9. Sistemin COP (Performans Katsayısı) ve Verim Denklemleri

| COP (Performans Katsayısı)                                                                                     |                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Enerji                                                                                                         | Ekserji                                                                                                             |
| $COP_{yaz,ch} = \frac{[\dot{m}_a * (h_a - h_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$              | $COP_{yaz,ch,ex} = \frac{[\dot{m}_a * (ex_a - ex_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$              |
| $COP_{yaz,nc} = \frac{[\dot{m}_a * (h_a - h_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$              | $COP_{yaz,nc,ex} = \frac{[\dot{m}_a * (ex_a - ex_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$              |
| $\eta_{yaz,disch} = \frac{[\dot{m}_a * (h_a - h_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{m}_7 * (h_7 - h_8)}$ | $\psi_{yaz,disch,ex} = \frac{[\dot{m}_a * (ex_a - ex_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{m}_7 * (h_7 - h_8)}$ |
| $COP_{kış,ch} = \frac{[\dot{m}_{13} * (h_{13} - h_{14})] - \dot{W}_{p1}}{\dot{W}_{comp}}$                      | $COP_{kış,ch,ex} = \frac{[\dot{m}_{13} * (ex_{13} - ex_{14})] - \dot{W}_{p1}}{\dot{W}_{comp}}$                      |
| $COP_{kış,disch} = \frac{[\dot{m}_a * (h_a - h_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$           | $COP_{kış,disch,ex} = \frac{[\dot{m}_a * (ex_a - ex_b)] - [\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}]}{\dot{W}_{comp}}$           |

Tablo 2.10. Tüm sistemin yaz ve kış dönemleri için COP ve verim denklemleri

**COP (Performans Katsayısı)**

$$COP_{yaz,tüm} = \frac{[\sum_{t=0}^t \dot{m}_a * (h_a - h_b) * t] - [(\sum_{t=0}^{t_{ch}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{disc h}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{disc h}) + (\sum_{t=0}^{t_{nc}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{nc})]}{(\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{comp} * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{nc}} (\dot{W}_{comp} * t_{nc}))}$$

$$COP_{yaz,tüm,ex} = \frac{[\sum_{t=0}^t \dot{m}_a * (ex_a - ex_b) * t] - [(\sum_{t=0}^{t_{ch}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{disc h}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{disc h}) + (\sum_{t=0}^{t_{nc}} (\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t_{nc})]}{(\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{comp} * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{nc}} (\dot{W}_{comp} * t_{nc}))}$$

$$COP_{kış,tüm} = \frac{\sum_{t=0}^{t_{disc h}} [[\dot{m}_a * (h_a - h_b) * t] - [(\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t]] - (\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{p1} * t_{ch})}{(\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{comp} * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{disc h}} \dot{W}_{comp} * t_{disc h})}$$

$$COP_{kış,tüm,ex} = \frac{\sum_{t=0}^{t_{disc h}} [[\dot{m}_a * (ex_a - ex_b) * t] - [(\dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2}) * t]] - (\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{p1} * t_{ch})}{(\sum_{t=0}^{t_{ch}} \dot{W}_{comp} * t_{ch}) + (\sum_{t=0}^{t_{disc h}} \dot{W}_{comp} * t_{disc h})}$$

### **3. BÖLÜM**

#### **BULGULAR VE TARTIŞMA**

Bu bölümde, tez çalışmasında elde edilen tüm bulgular ve sonuçlar açıklanmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak termodinamik analiz çalışmalarından elde edilen verilmiştir. Ardından parametrik çalışmaların bulguları sunulmuştur. Daha sonra ekonomik analizlerden elde edilen bulgular ve sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak farklı BED kullanım stratejilerinin ekonomik performans üzerindeki parametrik olarak incelenmiştir.

##### **3.1. Termodinamik Analiz Sonuçları**

###### **3.1.1. Sistemin Termodinamik Açıdan Değerlendirilmesi**

Bölüm 2.3 ve 2.4, bu tez kapsamında tasarlanan BED sistemi ve BED sisteminin termodinamik analizlerinde kullanılan denklemler ve kabuller tanıtılmıştı. Termodinamik analizler kapsamında ilk olarak tasarlanan sistem için hâl noktalarından termodinamik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Termodinamik özellikler EES programından elde edilmiştir. Soğutma çevrimleri EES ile entegre olarak çalışan Coolpack programında yapılmıştır. Sistemde ITA olarak kullanılan etilen glikol için özgül entropi değeri, programın veri tabanında entropi değeri bulunmadığı için verilmemiştir. Entropi üretim değerleri Denklem 2.6’daki ekerji yıkımı ve entropi üretimindeki ilişkiden hesaplanmıştır.

Tablo 3.1. Isı Pompası Entegre Sistemin Termodinamik Durumları ve Özellikleri

| Durum Noktası | Akışkan       | Sıcaklık (K) | Basınç (kPa) | Özgül Entalpi (kJ/kg) | Özgül Entropi (kJ/kg.K) | Özgül Ekserji (kJ/kg) |
|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1             | Etilen Glikol | 277          | 105          | 1058                  | -                       | 6.662                 |
| 2             | Etilen Glikol | 277          | 106.5        | 1058                  | -                       | 6.659                 |
| 3             | Etilen Glikol | 283          | 105          | 1082                  | -                       | 4.26                  |
| 4             | Etilen Glikol | 267          | 105          | 1018                  | -                       | 4.904                 |
| 5             | Etilen Glikol | 270          | 102          | 1030                  | -                       | 3.82                  |
| 6             | Etilen Glikol | 270          | 105          | 1030                  | -                       | 3.805                 |
| 7             | Etilen Glikol | 283          | 106.5        | 1082                  | -                       | 4.26                  |
| 8             | Etilen Glikol | 277          | 102          | 1058                  | -                       | 6.662                 |
| 9             | Etilen Glikol | 277.1        | 106.5        | 1058                  | -                       | 6.617                 |
| 13            | Etilen Glikol | 267          | 105          | 1018                  | -                       | 0.5997                |
| 14            | Etilen Glikol | 270          | 102          | 1030                  | -                       | 0.2681                |
| 15            | Etilen Glikol | 270          | 105          | 1030                  | -                       | 0.2643                |
| i             | R410a         | 266          | 196.8        | 431.6                 | 1.995                   | -                     |
| ii            | R410a         | 329.4        | 899.8        | 475.7                 | 1.98                    | -                     |
| iii           | R410a         | 306          | 887.4        | 453.2                 | 1.91                    | -                     |
| iv            | R410a         | 265          | 200.7        | 430.7                 | 1.989                   | -                     |
| v             | R410a         | 259          | 130.1        | 427.7                 | 2.026                   | -                     |
| vi            | R410a         | 317.8        | 581          | 469.4                 | 2.007                   | -                     |
| vii           | R410a         | 291          | 572.1        | 445                   | 1.928                   | -                     |
| viii          | R410a         | 258          | 132.9        | 426.9                 | 2.02                    | -                     |
| ix            | R410a         | 301.4        | 287.6        | 459.5                 | 2.051                   | -                     |
| x             | R410a         | 347          | 1030.6       | 491.1                 | 2.011                   | -                     |
| xi            | R410a         | 311          | 1016.9       | 455.8                 | 1.905                   | -                     |
| xii           | R410a         | 278          | 292.9        | 439.4                 | 1.98                    | -                     |
| xiii          | R410a         | 256.3        | 130.1        | 425.6                 | 2.017                   | -                     |
| xiv           | R410a         | 292          | 331.9        | 450.6                 | 2.006                   | -                     |
| xv            | R410a         | 274          | 326.1        | 435.2                 | 1.953                   | -                     |
| xvi           | R410a         | 255.3        | 132.9        | 424.7                 | 2.012                   | -                     |
| a(yaz)        | Su            | 285          | 110          | 3044                  | 0.1784                  | -9.7                  |
| b(yaz)        | Su            | 280          | 110          | 3034                  | 0.1041                  | -14.17                |
| a(kış)        | Su            | 323          | 103          | 3121                  | 0.7018                  | 48.75                 |
| b(kış)        | Su            | 303          | 103          | 3081                  | 0.4347                  | 27.51                 |

Tüm sistem için enerjetik ve ekserjetik COP değerleri ve verimlilikler Tablo 3.2’de görülmektedir. Tablo 3.2’den görüldüğü üzere, eğer binada BED sistemi olmadan normal soğutma yapılması durumunda COP değeri 2,97 olarak hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde binanın soğutma yükünün tamamı BED ile

depolandığından soğutma grupları sadece gece saatlerinde çalıştırılmaktadır. Gündüz saatlerinde soğutma ihtiyacı ise BED tarafından karşılanmaktadır. BED entegre soğutma sisteminin COP değeri ise 3,50 olarak hesaplanmıştır. Bu fark, gündüz ve gece sıcaklık farkından dolayı soğutma gruplarının COP'sinde meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır. COP sağlanan yaklaşık %20'lik artış, aynı zamanda daha düşük elektrik tüketimi anlamında gelmektedir. Ayrıca, BED sistemlerinde daha yüksek kapasiteli pompa kullanılması gerekmektedir. Pompalardan kaynaklı gelen ek yüke rağmen bu faydanın elde edildiği unutulmamalıdır. BED sistemlerinde basınç kaybı daha düşük sistemler tasarlamak sistemin termodinamik performansını artırmaya daha fazla yardımcı olabilir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere, enerji depolama sistemlerinin sağlamış olduğu, enerji tüketim miktarını düşürme ve enerji sistemlerinden daha yüksek verim ile yararlanma faydalarını sağladığı açık bir şekilde görülmektedir. Enerjetik COP değerlerine benzer şekilde, BED entegre soğutma sisteminin ekserjetik COP değeri, normal soğutma sistemine göre yaklaşık olarak 5 kat daha yüksektir. Bu artış, enerjetik artış ile kıyaslandığı zaman, aradaki fark çevre sıcaklığı ile çalışma sıcaklıkları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. BED entegre sistemin çalışma sıcaklıkları ortam sıcaklığına daha yakındır.

Tablo 3.2. Bina için COP ve Verim Değerleri

|                     | <b>Enerji</b> | <b>Ekserji</b> |
|---------------------|---------------|----------------|
| $COP_{yaz,ch}$      | 3.50          | 1.31           |
| $COP_{yaz,nc}$      | 2.97          | 0.27           |
| $\eta_{yaz,disch}$  | %96.1         | %4.16          |
| $COP_{yaz,tüm.sis}$ | 2.03          | 0.86           |
| $COP_{kış,ch}$      | 6.61          | 2.85           |
| $COP_{kış,disch}$   | 5.51          | 0.09           |
| $COP_{kış,tüm.sis}$ | 3.70          | 1.90           |

BED entgre sistemde, boşaltma periyodunda soğutma grupları çalışmadığı için COP değeri kullanılmaz. Bu yüzden boşaltma periyodu için termodinamik değerlendirmeler enerji ve ekserji verimlilikleri üzerinden yapılmıştır. Yaz dönemi için enerji boşaltma periyodunda enerji ve ekserji verimi değerleri sırasıyla %96,1 ve %4,16 olarak

hesaplanmıştır. Enerji ve ekserji verim değerleri birbiri ile kıyaslandığı zaman, aralarında büyük bir fark olduğu görülmektedir. Bu fark, ekserji analizlerinin referans koşullara göre hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Enerji boşaltma periyodunda sistem iş akışkanının sıcaklıkları ile referans koşulları arasındaki fark en yüksektir. Literatürdeki araştırmalarda en büyük ekserji verimliliği değerlerinin enerji boşaltma periyodunda olduğunu işaret etmektedir. Elde edilen bu veriler literatür ile uyumluluk göstermektedir.

Yaz dönemi için tüm çalışma periyotları dikkate alınarak, sistemin termodinamik performansı dikkate alındığı zaman enerjetik ve ekserjetik COP değerleri sırasıyla 2,03 ve 0,86 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, sistemin genelinde elde edilen faydalı çıktılar ve tüm giderler dikkate alınmalıdır. Tüm sistem için hesaplanan COP değerleri, tasarlanan BED sisteminin 8 saat enerji yükleme ve 12 saat enerji boşaltma periyotları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sistemde soğutma gruplarının ve pompaların tükettiği tüm enerji miktarları enerji girdisi olarak, elde edilen soğutma ise faydalı çıktı olarak dikkate alınmıştır.

Kış döneminde, BED sisteminin ısı pompası düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak kullanılması durumunda COP değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Kış döneminde enerji yükleme periyodunda enerjetik ve ekserjetik COP değerleri sırasıyla 6,61 ve 2,85 olarak hesaplanmıştır. İlk olarak kış dönemi ve yaz dönemi COP’leri arasındaki fark ısı pompası ve soğutma grubu arasındaki 1 birimlik faydadan, dış ortam ve iş akışkanı sıcaklıklarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Geleneksel toprak ya da hava kaynaklı ısı pompası sistemlerde düşük sıcaklık enerji kaynağı (soğuk kuyu) sıcaklığı 10-15 °C civarında olmaktadır. BED entegre sistemde ise bu sıcaklık 0 °C’ye düşmektedir. Düşük sıcaklık enerji kaynağı sıcaklığı düşmesi ısı pompalarının COP değerlerini arttırmaktadır.

Isı pompası entegre BED sisteminin en büyük dezavantajlarından biri hem enerji yükleme hem de enerji boşaltma döneminde soğutma grupları çalıştırılmasıdır. Kış döneminde enerji boşaltma döneminde enerjetik ve ekserjetik COP değerleri sırasıyla 5,51 ve 0,09 olarak hesaplanmıştır. Kış dönemi için tüm sistem için enerjetik ve ekserjetik COP değerleri 3,70 ve 1,90 olarak hesaplanmıştır. Isıtma ve soğutma durumları için tüm sistem için COP değerleri kıyaslandığı zaman yaklaşık olarak 1 birimlik bir artış olduğu görülmektedir. Bu hesaplamalarlar 1 günlük bir çevrim için yapılmıştır. Ancak bina

soğutma ve ısıtma yükleri arasında bir fark vardır. Depolanan enerji ile bir günlük soğutma yapılabilirken, daha fazla süre ısıtma yapılabilir. 1 haftalık ısıtma ihtiyacı için 3 günlük enerji yükleme yapmak yeterlidir. Bu yüzden termodinamik analizlerin yanında ekonomik analizlerin yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

### 3.1.2. Termodinamik Parametrik Çalışma Sonuçları

Parametrik çalışmalarda, binanın soğutma yükünü değiştirmeden dış ortam sıcaklıklarının COP üzerindeki etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Yaz ve kış dönemleri gündüz ve gece sıcaklıkları sistemin termodinamik performansı (COP) üzerindeki önemli etkiye sahiptir. Bu yüzden Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'teki sıcaklık değerleri Coolpack programında kullanılarak soğutma çevrimleri yeniden analiz edilmiş ve kompresör güç gereksinimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kompresör güçleri COP denklemlerinde yerine yazılarak COP değerleri yeniden hesaplanmıştır. Tablo 3.3'te yaz dönemi için farklı dış ortam sıcaklıklarına göre COP değerleri verilmiştir. Tablo 3.3'ten görüldüğü üzere, COP değerleri artan gece ve gündüz dış ortam sıcaklıkları ile düşme eğilimindedir. Gündüz ve gece sıcaklık farkının yüksek olduğu yerlerde BED sistemlerinin daha yüksek COP ile çalışmasına yardımcı olacağı görülmektedir.

Tablo 3.3. Farklı Dış Ortam Sıcaklıkları için COP Değerleri

| COP <sub>yaz,nc</sub> (Performans Katsayısı) |        |         |
|----------------------------------------------|--------|---------|
| T <sub>gündüz</sub>                          | Enerji | Ekserji |
| 30.00                                        | 3.56   | 0.29    |
| 35.00                                        | 3.05   | 0.30    |
| 40.00                                        | 2.63   | 0.31    |
| 45.00                                        | 2.28   | 0.31    |

| COP <sub>yaz,ch</sub> (Performans Katsayısı) |        |         |
|----------------------------------------------|--------|---------|
| T <sub>gece</sub>                            | Enerji | Ekserji |
| 15                                           | 4.05   | 0.24    |
| 17.5                                         | 3.73   | 0.25    |
| 20                                           | 3.45   | 0.26    |
| 22.5                                         | 3.20   | 0.27    |
| 25                                           | 2.97   | 0.28    |
| 27.5                                         | 2.77   | 0.29    |
| 30                                           | 2.58   | 0.29    |

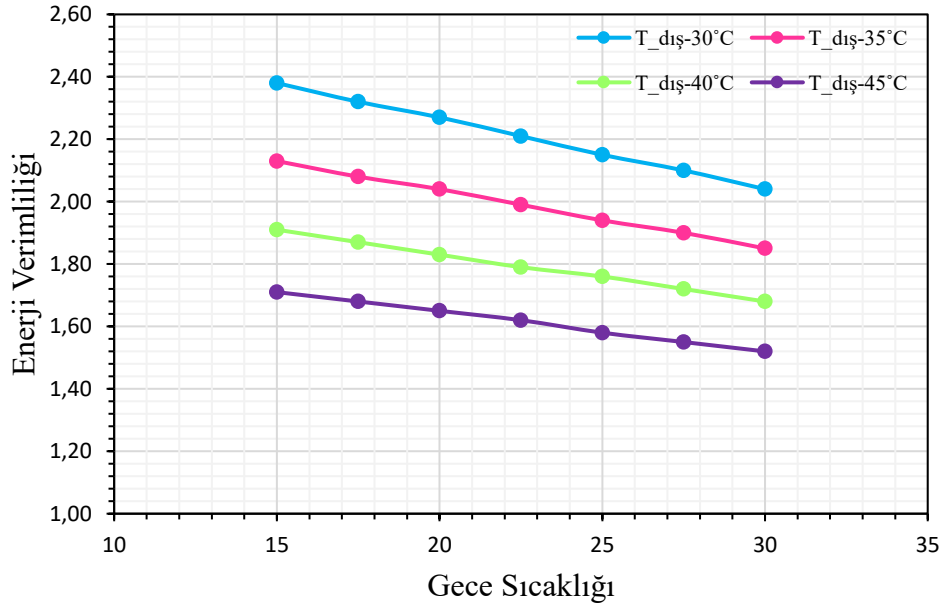
Tablo 3.4’te yaz dönemi için tüm çalışma periyotları dikkate alınarak farklı gündüz ve gece sıcaklıklarına göre COP değişimi verilmiştir. Gündüz ve gece dış ortam sıcaklık farkı arttıkça sistemin termodinamik performansı artma eğilimindedir. Bu durum BED sistemlerinin tasarımında dış ortam sıcaklıklarının önemini göstermektedir.

Tablo 3.4. Tüm Sistemin Farklı Dış Ortam Sıcaklıkları için COP Değerleri

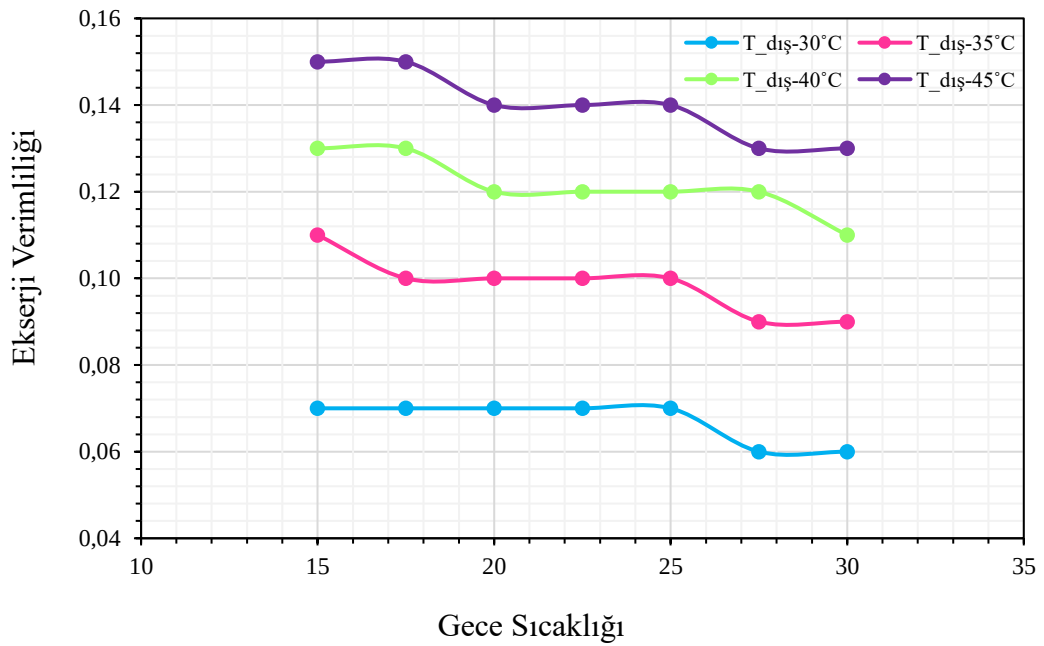
| <i>COP<sub>yaz,tüm.sis</sub></i> |               |                |
|----------------------------------|---------------|----------------|
| <b>T (°C)</b>                    | <b>Enerji</b> | <b>Ekserji</b> |
| 30-15                            | 2.38          | 0.07           |
| 30-17.5                          | 2.32          | 0.07           |
| 30-20                            | 2.27          | 0.07           |
| 30-22.5                          | 2.21          | 0.07           |
| 30-25                            | 2.15          | 0.07           |
| 30-27.5                          | 2.10          | 0.06           |
| 30-30                            | 2.04          | 0.06           |
| 35-15                            | 2.13          | 0.11           |
| 35-17.5                          | 2.08          | 0.10           |
| 35-20                            | 2.04          | 0.10           |
| 35-22.5                          | 1.99          | 0.10           |
| 35-25                            | 1.94          | 0.10           |
| 35-27.5                          | 1.90          | 0.09           |
| 35-30                            | 1.85          | 0.09           |
| 40-15                            | 1.91          | 0.13           |
| 40-17.5                          | 1.87          | 0.13           |
| 40-20                            | 1.83          | 0.12           |
| 40-22.5                          | 1.79          | 0.12           |
| 40-25                            | 1.76          | 0.12           |
| 40-27.5                          | 1.72          | 0.12           |
| 40-30                            | 1.68          | 0.11           |
| 45-15                            | 1.71          | 0.15           |
| 45-17.5                          | 1.68          | 0.15           |
| 45-20                            | 1.65          | 0.14           |
| 45-22.5                          | 1.62          | 0.14           |
| 45-25                            | 1.58          | 0.14           |
| 45-27.5                          | 1.55          | 0.13           |
| 45-30                            | 1.52          | 0.13           |

BED sisteminin enerji ve ekserji verimlerinin gece ve gündüz sıcaklığına göre değişimleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Daha önce açıklandığı ve Şekil 3.1’de görüldüğü üzere, enerji verimi en yüksek dış ortam sıcaklığı 30°C’de görülmektedir. Normal

soğutma (30 °C dış ortam sıcaklığı) durumunda akışkan sıcaklığı, buz yapma (15 °C gece sıcaklığı) periyodundaki akışkan sıcaklığından yüksek olduğu için enerji verimliliği bu değerlerde yüksek olmaktadır. Enerji verimi en düşük dış ortam sıcaklığı 45 °C ve gece sıcaklığı 30 °C olduğunda görülmüştür. Gece sıcaklığı arttıkça, gündüz ve gece sıcaklığı arasındaki fark azaldığı için verim düşmektedir.



Şekil 3.1. Farklı Dış Ortam Sıcaklıklarıyla COP'nin değişimi



Şekil 3.2. Farklı Dış Ortam Sıcaklıklarıyla ekserjetik COP değişimi

Şekil 3.2’den görüldüğü üzere sistemdeki en yüksek ekserji verimi  $T_{gündüz} = 45^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{gece} = 15^{\circ}\text{C}$  olduğu durumdadır. En düşük ekserji verimi ise  $T_{gündüz} = 30^{\circ}\text{C}$  ve  $T_{gece} = 30^{\circ}\text{C}$ ’de görülmektedir. Bu düşük ekserji verimine çevre sıcaklığı neden olmaktadır. Çünkü çevre sıcaklığı ile sistem sıcaklığı arasındaki fark düştükçe sistemin ekserji verimi de düşmektedir.

### 3.2. Buz Depolama Sisteminin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Ofis binasının ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemine entegre BED sisteminin ekonomik olarak sağladığı fayda binanın soğutma ve ısıtma yükleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sistemin kullanılmaya başladıktan sonra sonraki yıllarda sağlayacağı fayda hesaplanırken elektrik birim fiyatına %5 zam geleceği kabul edilmiştir. Sistemde çıkabilecek sorun ve arızaların neden oluşturacağı ve periyodik bakım maliyetleri dikkate alınmamıştır.

İncelenen binada çalışma saatlerindeki soğutma yükünün tamamı depolanmıştır. Yani, soğutma grupları sadece gece tarifiesi dönemlerinde, başka bir deyişle elektriğin ucuz olduğu saatlerde çalıştırılmaktadır. Binanın soğutma ihtiyacının tamamı depolanan enerji ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, ayrıca, buzda depolama sisteminde üretilen buzların ısı pompası uygulamasında düşük sıcaklık enerji kaynağı (ısı kuyusu) olarak kullanılması da incelenmiştir. Özetle, sadece soğutma yükünü karşılayacak şekilde tasarlanan buz depolama sisteminin kış dönemlerinde ısı pompası için enerji kaynağı olarak kullanılması araştırılmıştır. Sistem için ekonomik değerlendirmeler yaz, kış ve bütün bir yıl için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

#### 3.2.1. Yaz Dönemi için BED Sisteminin Soğutma Amaçlı Kullanıldığı Durumda Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

BED sistemleriyle soğutma yaparken, soğutma yükü daha sonra kullanmak için depolanmaktadır. BED sistemlerinde soğutma yapılırken, enerji yükleme periyodunda buz üretilmekte ve bu buzlar bir depolama tankı içerisinde kullanılıncaya kadar bekletilmektedir. Son olarak depolanan buzlar; enerji boşaltma periyotunda, soğutma yapmak için kullanılmaktadır. BED sistemlerinde enerji yükleme (buz üretme) elektrik kullanımının gece tarifesinde yapılmaktadır. Elektrik kullanımının pahalı olduğu gündüz ve puant tarife saatlerinde bu depolanan enerji kullanılmaktadır. Böylece BED

sistemleriyle bina soğutma için gerekli olan elektrik tüketim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu sayede, hem soğutma daha ucuz bir şekilde gerçekleştirilmekte hem de elektrik şebeke pik yükünü azaltmaya katkı sağlanmaktadır.

Tablo 3.5. Soğutma Elektrik Tüketim Bedeli Hesabı

|                                              | <b>Buz Enerji<br/>Depolama<br/>Sistemi</b> | <b>Normal<br/>Soğutma<br/>Sistemi</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Günlük Depolanan Soğutma Kapasitesi (8 sa)   | 13636                                      | -                                     |
| BED Şarj Esnasında Harcanacak Elektrik (kWh) | 4545                                       | -                                     |
| Yılda Kaç Gün BED Kullanılır?                | 240                                        | -                                     |
| Puant Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)         | 1,0567                                     | 1,0567                                |
| Gündüz Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)        | 0,7195                                     | 0,7195                                |
| Gece Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)          | 0,4498                                     | 0,4498                                |
| Günlük Tüketim (TL)                          | 2.044                                      | 8.073                                 |
| Aylık Tüketim (TL)                           | 61.335                                     | 242.203                               |
| Yıllık Tüketim (TL)                          | 490.678                                    | 1.973.621                             |

Tablo 3.5'te üçlü elektrik tarifiesi değerlerine göre BED sistemi ve normal soğutma sistemi ile soğutma yapıldığında yıllık tüketim bedellerinin nasıl değiştiği verilmiştir. Tablo 3.5'te buzda enerji depolama sisteminde soğutma yükünün tamamını gece tarifesine göre depolayıp hesapladığımızda günlük tüketim bedeli 2.044 TL ve aylık tüketim bedeli 61.335 TL olduğu görülmektedir. Binanın toplam soğutma yükü 13.636 kWh'tir. Bina haftanın 5 günü çalıştığı için BED sistemi de haftada 5 gün çalışmaktadır. Sistem soğutma yükünü karşılamak için her gün şarj edilmekte ve kullanılmaktadır. Bu şartlarda, sistemin 240 gün kullanılması durumunda yıllık tüketim bedelinin 490.678 TL olduğu görülmektedir. Normal soğutma sistemi ile yapılan soğutmada ise günlük tüketim bedeli 8.073 TL ve aylık tüketim bedeli 242.203 TL olduğu, hesaplanan yıllık tüketim bedeli 1.973.621 TL olmaktadır. Sonuç olarak Tablo 3.5'te görüldüğü üzere BED sistemi kullandığımızda yıllık elektrik tüketim bedelinin yaklaşık 1.482.943 TL azaldığı gözlemlenmiştir.

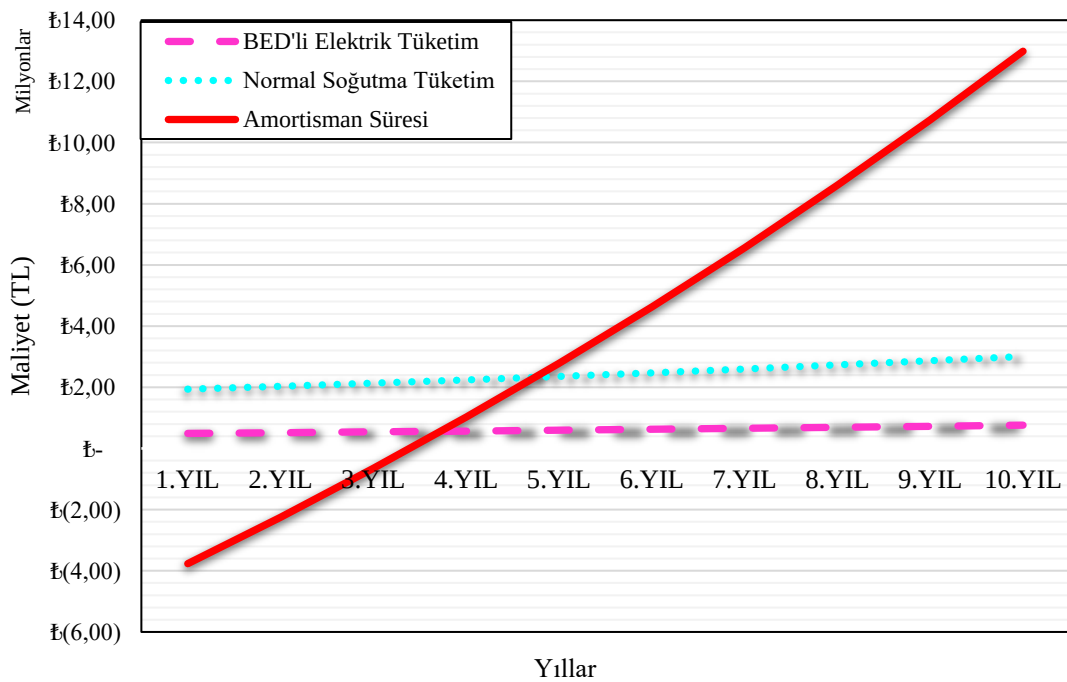
BED sisteminin olmadığı durumdaki elektrik tüketim maliyeti hesaplanırken, BED sisteminin olduğu durumda tüketilen enerjinin tamamının BED'in olmadığı durumda da tüketildiği kabul edilmiştir. Soğuk su ihtiyacı tamamen soğutma çevrimi içerisinde soğutma grubunun kompresörünün çalışması ile sağlanmaktadır. Soğutma sistemi normal

bir klima sistemi gibi çalışır. Klimalar birer hava kaynaklı ısı pompalarıdır yani içerdeki havanın ısıısını, tıpkı buzdolapları gibi çalışarak, dış ortama pompalarlar. Bu işlemi de yaparken 1 birim elektrik enerjisi ile yaklaşık 3 birim ısı pompalama işi yapabilirler. Isıtma modunda buna COP (Performans Katsayısı), soğutma modunda ise EER (Energy Verimliliği Oranı) değeri denir. Soğutmada tüm sistemde pompalar tankın içerisinden su akıtmaya çalışmaktadır. Bu yüzden pompanın basınç düşümü daha azdır ve böylece daha çok güç çekmektedir. Normal soğutmanın tüm sisteme göre COP değerinde çok küçük bir fark bulunmaktadır. Normal soğutmada bu COP farkı dikkate alınarak yaptığımız kabullerle, BED sisteminin olmadığı durumdaki elektrik tüketim maliyeti üçlü tarifiedeki gündüz elektrik birim fiyat için hesaplanmıştır.

Tablo 3.6. Binada Bulunan BED Sistemi Amortisman Süresi Tablosu

| BED İLK YATIRIM<br>MALİYETİ (TL)                |        | BED SİSTEMİ<br>İÇİN<br>ÖDENECEK<br>İLAVE FARK               |                                                                                       |                                                      |                                                           |
|-------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| -                                               |        | -5.214.468                                                  |                                                                                       |                                                      |                                                           |
|                                                 |        | BED ŞARJI<br>İÇİN<br>KULLANIL<br>ACAK<br>ELEKTRİK<br>BEDELİ | SOĞUTMA<br>GRUBU İLE<br>YAPILACAK<br>SOĞUTMADA<br>KULLANILACA<br>K ELEKTRİK<br>BEDELİ | ELEKTRİK<br>BEDELİNDEN<br>ELDE<br>EDİLECEK<br>KAZANÇ | HER YIL<br>SONUNDA<br>KALAN<br>BEDEL (TL)<br>(Amortisman) |
| YILLIK<br>ELEKTRİK<br>TÜKETİM<br>BEDELİ<br>(TL) | 1.YIL  | ₺ 490.678,00                                                | ₺ 1.937.621,00                                                                        | 1.446.943                                            | -3.767.525                                                |
|                                                 | 2.YIL  | ₺ 515.211,90                                                | ₺ 2.034.502,05                                                                        | 1.519.290                                            | -2.248.235                                                |
|                                                 | 3.YIL  | ₺ 540.972,50                                                | ₺ 2.136.227,15                                                                        | 1.595.255                                            | -652.980                                                  |
|                                                 | 4.YIL  | ₺ 568.021,12                                                | ₺ 2.243.038,51                                                                        | 1.675.017                                            | 1.022.037                                                 |
|                                                 | 5.YIL  | ₺ 596.422,18                                                | ₺ 2.355.190,44                                                                        | 1.758.768                                            | 2.780.806                                                 |
|                                                 | 6.YIL  | ₺ 626.243,28                                                | ₺ 2.472.949,96                                                                        | 1.846.707                                            | 4.627.512                                                 |
|                                                 | 7.YIL  | ₺ 657.555,45                                                | ₺ 2.596.597,46                                                                        | 1.939.042                                            | 6.566.554                                                 |
|                                                 | 8.YIL  | ₺ 690.433,22                                                | ₺ 2.726.427,33                                                                        | 2.035.994                                            | 8.602.548                                                 |
|                                                 | 9.YIL  | ₺ 724.954,88                                                | ₺ 2.862.748,69                                                                        | 2.137.794                                            | 10.740.342                                                |
|                                                 | 10.YIL | ₺ 761.202,63                                                | ₺ 3.005.886,13                                                                        | 2.244.684                                            | 12.985.026                                                |
| 10. YIL SONUNDAKİ<br>DURUM                      |        | 6.171.695                                                   | 24.371.189                                                                            | 18.199.494                                           | 31.184.519                                                |

Tablo 3.6’da BED sisteminin ilk yatırım maliyeti ve çiller kapasitesinin küçültülmesinden elde edilen kazanç sonucunda yapılan hesaplamada bize sağladığı kazanç ve amortisman süresinin nasıl değiştiği görülmektedir. Pik soğutma yükünün azalması ile ilk yatırım maliyetinin de düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda bina için gerekli jeneratör vb. ekipmanların kapasitelerini de düşürmektedir. Tablo 3.6’da sistemin ilk yatırım maliyetinin 5.214.468 TL’dir. Yani BED sistemi için ödenecek olan farkın 5.214.468 TL olduğu görülmektedir. Sistemin amortisman süresi hesaplanırken elektrik tüketiminin aynı kalacağı ve elektriğe %5 yıllık zam gelebileceği düşünülmüştür. Bu şartlarda yıllık tüketim maliyeti ve geri ödeme süresi Şekil 3.3’te görülmektedir. Yapılan bu çalışma sonunda sistemin yaklaşık 3 yılda kendini geri ödediği, 4 yılın sonunda 1.022.037 TL kazanç sağlayacağı ve 10 yılın sonunda ise yaklaşık 31.184.519 TL’lik bir tasarruf sağlayacağı görülmüştür.



Şekil 3.3. Ofis Binasında Bulunan BED Sistemi için Yatırımın Geri Ödeme Süresi ve 10 Yıl Boyunca Elde Edilecek Kâr Miktarı

### 3.2.2. BED Sisteminin Isı Pompası Sistemine Entegre Edilmesi Durumunda Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

Buzda enerji depolama sistemleri sadece soğutma yükünü depolama amaçlı kullanıldığından yaz aylarında kullanılmaktadır. Yılın soğutma yapılmayan günlerinde ise kullanılmamaktadır. Buzda enerji depolama soğutma maliyetlerini düşürmede etkin bir yöntemdir. Bu çalışmada, BED sisteminde üretilen buzların bir ısı pompası sisteminin enerji kaynağı olarak kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. BED entegre ısı pompası sistemiyle incelenen binanın ısıtma maliyetleri hesaplanarak, sonuçlar ısıtmanın doğalgaz ile yapılması durumundaki maliyet ile kıyaslanmıştır. Tablo 3.7’de üçlü elektrik tarifesine göre BED entegre ısı pompası sistemi ile ısıtma yapıldığında günlük tüketim bedelleri hesaplanmıştır. Tablo 3.7’de buzda enerji depolama sisteminde gece tarifesine göre hesapladığımızda günlük tüketim bedeli 3.209 TL’dir. Soğutmanın ekonomik olarak değerlendirilmesinde binanın toplam soğutma yükü 13,636 kWh olduğunu ve bu toplam soğutma yüküne göre sistem 5 gün buz üretip depolanan enerji ile 5 günlük soğutma ihtiyacı karşılanmakta olduğunu belirtmiştik. Aynı şekilde sistemde toplam ısıtma yükü ise 9972 kWh’tir. Sistem bu ısıtma yüküne karşılamak için haftada 3 gün buz üretip depolanan enerji ile 5 günlük ısıtma ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında haftalık tüketim bedeli 9.628 TL, aylık tüketim bedeli 38.511 TL, bu sistemin 144 gün kullanılması durumunda yıllık tüketim bedelinin 462.129 TL olarak hesaplanmıştır.

Dünyada kullanılan enerjinin büyük bir kısmı konutlarda tüketilmektedir. Binalarda ve ısıtma sistemlerinde uygulanacak çeşitli teknikler ile önemli oranda enerji tasarrufunun sağlanması mümkündür. Konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir kısmı konutların ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle konutlarda kullanılan ısıtma sistemlerinin tasarımı, kullanılacak yakıtın türü ve maliyetleri kullanıcılar ve enerjinin verimli kullanılması açısından son derece önemlidir. Ülkemizdeki konutların büyük bir kısmında ısıtma işlemi için fosil yakıt (fueloil, kömür, doğalgaz vs.) kullanan merkezi ısıtma sistemleri tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında binada BED kullanmadığımız durumda ısıtma tekniği olarak İstanbul’da bulunan bina için doğalgazlı ısıtma sistemi kullanıldığı düşünülmüştür ve hesap yapılmıştır. Doğalgazlı sistemlerde, ofis binası için doğalgaz ile yapılan ısıtma hesabı Tablo 3.8’de verilmiştir. Tablo 3.8’de binanın günlük enerji tüketimi 7.478 kWh, yıllık enerji tüketimi 1.794.780 kWh olduğu

görülmektedir. Tablo 3.8’den görüldüğü üzere, günlük tüketim bedeli 1.552 TL, haftalık tüketim bedeli 7.760 TL ve aylık tüketim bedeli 31.041 TL’dir. Yıllık ısıtma hesabı yapılırken haftada 5 gün kullanıldığı göz önüne alınarak hesap edildiğinde yıllık tüketim bedeli 372.489 TL’dir.

Tablo 3.7. Isıtma Sisteminin Üçlü Tarifedeki Elektrik Tüketim Bedeli

| Zaman         |       | Isıtma Yüğü (kWh) |    |      |       |      |      | Depo<br>lama | Norm<br>al Isıtma<br>Yüğü | Elektr<br>ik Birim<br>Fiyat | Komp<br>resör<br>Gücü<br>(kW) | Isıtma<br>Maliye<br>ti (TL) |
|---------------|-------|-------------------|----|------|-------|------|------|--------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 00:00         | 01:00 | 1                 | 1  | 4,87 | 1     | 1351 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 01:00         | 02:00 | 1                 | 2  | 4,91 | 2     | 1364 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 02:00         | 03:00 | 1                 | 3  | 4,95 | 3     | 1375 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 03:00         | 04:00 | 1                 | 4  | 5,03 | 4     | 1398 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 04:00         | 05:00 | 1                 | 5  | 5,08 | 5     | 1411 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 05:00         | 06:00 | 1                 | 6  | 5,09 | 6     | 1415 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 06:00         | 07:00 | 1                 | 7  | 4,96 | 7     | 1378 | 0    | 0            | 0,7195                    | 0                           | 0,0                           |                             |
| 07:00         | 08:00 | 1                 | 8  | 5,08 | 8     | 1412 | 0    | 1412         | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 08:00         | 09:00 | 1                 | 9  | 4,45 | 9     | 1236 | 0    | 1236         | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 09:00         | 10:00 | 1                 | 10 | 3,68 | 10    | 1023 | 0    | 1023         | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 10:00         | 11:00 | 1                 | 11 | 3,26 | 11    | 905  | 0    | 905          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 11:00         | 12:00 | 1                 | 12 | 2,77 | 12    | 769  | 0    | 769          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 12:00         | 13:00 | 1                 | 13 | 2,64 | 13    | 735  | 0    | 735          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 13:00         | 14:00 | 1                 | 14 | 2,20 | 14    | 610  | 0    | 610          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 14:00         | 15:00 | 1                 | 15 | 2,29 | 15    | 636  | 0    | 636          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 15:00         | 16:00 | 1                 | 16 | 2,19 | 16    | 610  | 0    | 610          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 16:00         | 17:00 | 1                 | 17 | 2,22 | 17    | 618  | 0    | 618          | 0,7195                    | 246,5                       | 177,4                         |                             |
| 17:00         | 18:00 | 1                 | 18 | 2,35 | 18    | 652  | 0    | 652          | 1,0567                    | 246,5                       | 260,5                         |                             |
| 18:00         | 19:00 | 1                 | 19 | 2,76 | 19    | 766  | 0    | 766          | 1,0567                    | 246,5                       | 260,5                         |                             |
| 19:00         | 20:00 | 1                 | 20 | 2,96 | 20    | 821  | 0    | 0            | 1,0567                    | 0                           | 0,0                           |                             |
| 20:00         | 21:00 | 1                 | 21 | 3,37 | 21    | 937  | 0    | 0            | 1,0567                    | 0                           | 0,0                           |                             |
| 21:00         | 22:00 | 1                 | 22 | 3,96 | 22    | 1100 | 0    | 0            | 1,0567                    | 0                           | 0,0                           |                             |
| 22:00         | 23:00 | 1                 | 23 | 4,42 | 23    | 1229 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| 23:00         | 00:00 | 1                 | 24 | 4,67 | 24    | 1298 | 1246 | 0            | 0,4498                    | 254,2                       | 114,3                         |                             |
| <b>TOPLAM</b> |       |                   |    |      | 25050 | 9971 | 9971 |              |                           |                             |                               | 3209,2                      |

Tablo 3.8. Binada Kullanılan Doğalgaz ile Isıtma Tüketim Bedeli Hesabı

| <b>DOĞALGAZ YILLIK<br/>TÜKETİM HESABI</b>                           | <b>GÜNLÜK</b> | <b>HAFTALIK</b> | <b>AYLIK</b> | <b>YILLIK</b> |
|---------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| Doğalgazın Isıl Değeri (kJ/m <sup>3</sup> )(Hu)                     | 34526,2       | 34526,2         | 34526,2      | 34526,2       |
| Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )                                      | 0,067         | 0,067           | 0,067        | 0,067         |
| $\eta$ (verim)                                                      | 0,8           | 0,8             | 0,8          | 0,8           |
| Isıtma Yüğü (kW)                                                    | 1246,375      | 1246,375        | 1246,375     | 1246,375      |
| Ortalama Kapasite Kullanım Oranı                                    | 0,75          | 0,75            | 0,75         | 0,75          |
| Çalışma Süresi (sa/gün)                                             | 8             | 40              | 160          | 1920          |
| Günlük Enerji Tüketimi (kWh)                                        | 7478,25       | 37391,25        | 149565       | 1794780       |
| Yakıt Tüketimi (m <sup>3</sup> )                                    | 974,7         | 4873,4          | 19493,7      | 233924,1      |
| Konut (0-800.000 m <sup>3</sup> ) Birim Fiyatı (TL/m <sup>3</sup> ) | 1,592352      | 1,592352        | 1,592352     | 1,592352      |
| Maliyet (TL)                                                        | 1552          | 7760            | 31041        | 372489        |

Buzda enerji depolama ile 3 gün şarj edilerek depolayıp, 5 gün kullanıldığı düşünülerek ısıtma yaptığımızda sistemin elektrik tüketimi yıllık 462.129 TL bulunmuştur. Doğalgazlı ısıtma sistemi 5 gün kullanılarak ısıtma yaptığımızda ise elektrik tüketim bedeli 372.489 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önünde bulundurularak doğalgazlı ısıtma yerine BED sistemi ile ısıtma yaparsak kullanırsak 89.640 TL'lik bir ısıtma farkı bulunmaktadır. Bu durum doğalgaz ile ısıtma sistemi için avantajdır. Fakat doğalgaz ile ısıtmanın bu avantajının yanı sıra karbondioksit salınımı gibi çevreye zararlı etkileri bulunmaktadır. Ayrıca ilk yatırım maliyetine ek olarak kazan maliyeti bulunmaktadır. Isıtma için BED sistemi kullandığımızda ısıtma zararı ile ilk yatırım maliyeti artacaktır. Fakat BED sistemleri pik soğutma yükünün azalması ile ilk yatırım maliyetini düşürmektedir. Aynı zamanda bina için gerekli jeneratör vb. ekipmanların kapasitelerini de düşürmek ve doğalgaz sisteminin aksine karbon emisyonunu da azaltmaktadır. BED sistemlerinde ısıtma yapmak için ekstra kaynağa ihtiyaç olmamaktadır. Sistemde gece elektrik üretilip depolandığı için gece giden elektriği kullanmaktadır. Ayrıca ülkelerin çoğunda ısıtma elektrikle karşılandığı için elektrikleşme, gelişmişlik artmaktadır. Binayı ısıtmak için bu avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında ilk yatırım maliyetin düşürülmesi, çevresel etkileri ve ekipmanların kapasitelerinin düşürmesi gibi avantajlarından dolayı buzda enerji depolama sisteminin kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

### 3.2.3. BED Sisteminin Soğutma ve Isıtma Amaçlı Kullanımının Bütün Bir Yıl Üzerinden Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi

BED sistemleri yazın sadece soğutma amaçlı kullanılan bir sistemdir. Bu sistem yaz döneminde sadece gece çalışmaktadır ve yaz dönemleri dışında çalışmamaktadır. Sistem ısı pompasında ısı kaynağı olarak kullanıldığında kışın gece ve akşam saati çalışmaktadır. Sistem kışın binayı ısıtmak için ekstra bir elemana ve kaynağa ihtiyaç duymamaktadır. Bu durumu ve üçlü elektrik tarifi değeri göz önüne aldığımızda BED sistemi ve doğalgaz sistemi ile ısıtma yapıldığında yıllık tüketim miktarları Tablo 3.9’da verilmiştir. Sistem kışın ısıtma yaparken 3 gün buz üretip depolanan enerji, 5 gün ısıtma için kullanılmaktadır. Tablo 3.9’da buzda enerji depolama sisteminde soğutma yükünün tamamını gece tarifesine göre hesapladığımızda günlük tüketim bedeli 2.044 TL ve aylık tüketim bedeli 61.335 TL olduğu görülmektedir. Bu şartlarda, sistemin 144 gün kullanılması durumunda yıllık tüketim bedelinin 294.407 TL olduğu görülmektedir. Sistem 240 gün doğalgaz ile ısıtmada kullanılması durumunda yıllık tüketim bedelinin 372.489 TL olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.9. Isıtma Elektrik Tüketim Bedeli Hesabı

|                                              | <b>Buz Enerji<br/>Depolama<br/>Sistemi</b> | <b>Doğalgaz ile<br/>Isıtma<br/>Sistemi</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Günlük Depolanan Soğuk (8 sa)                | 13636                                      | -                                          |
| BED Şarj Esnasında Harcanacak Elektrik (kWh) | 4545                                       | -                                          |
| Yılda Kaç Gün BED Kullanılır?                | 144                                        | -                                          |
| Puant Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)         | 1,0567                                     | -                                          |
| Gündüz Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)        | 0,7195                                     | -                                          |
| Gece Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)          | 0,4498                                     | -                                          |
| Doğalgaz Birim Fiyatı (TL/m <sup>3</sup> )   | -                                          | 1,59                                       |
| Günlük Tüketim (TL)                          | 2.044                                      | 1.552                                      |
| Aylık Tüketim (TL)                           | 61.335                                     | 31.041                                     |
| Yıllık Tüketim (TL)                          | 294.407                                    | 372.489                                    |

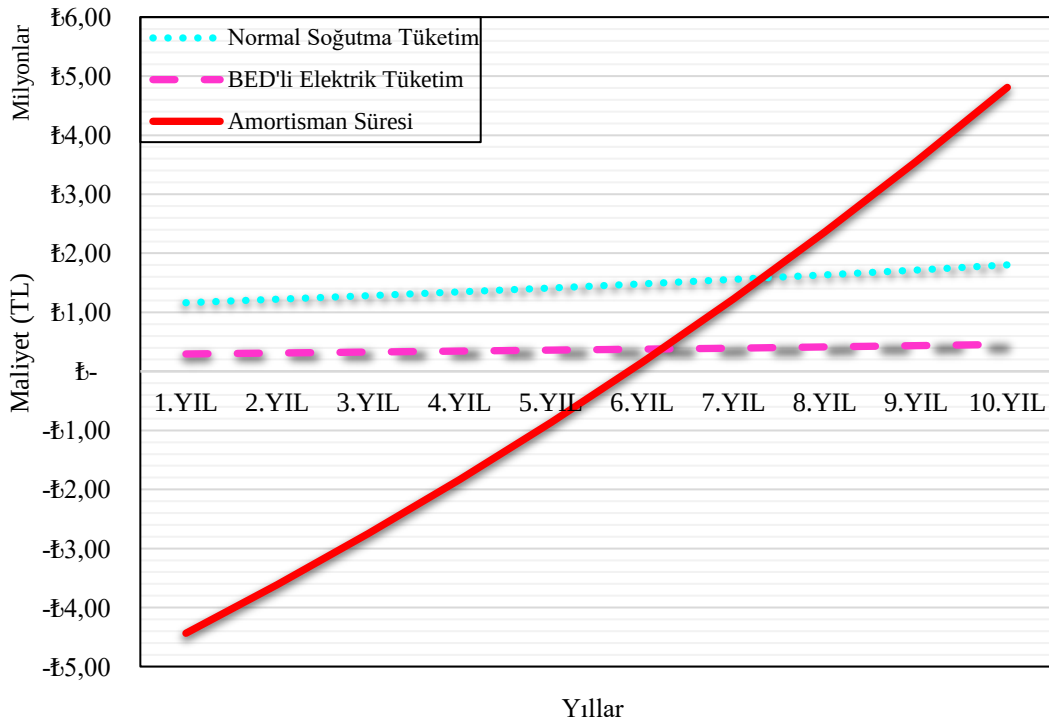
Buzda enerji depolama sistemleri ile soğutma yaptığımızda sağladığı tasarruf ve kısa geri ödeme süresi ve uzun vadede faydaları bir önceki kısımda verilmiştir. Kışın ısıtma yaptığımızda, BED’li sistem kullanımının doğalgaz kullanımına göre 89.640 TL’lik ısıtma zararı olduğunu hesaplamıştık. Tablo 3.10’da BED sistemine ısıtmanın bu

dezavantajını eklediğimizde geri ödeme süresinin nasıl değişeceği ve ne kadar tasarruf edeceğimiz değerlendirmek için hesaplama yapılmıştır.

Tablo 3.10. Ofis Binasında Isıtma Zararı ile BED Sistemi Amortisman Süresi Tablosu

| BED İLK YATIRIM<br>MALİYETİ (TL)                | ISITMADAN GELEN ZARAR                                 |                                                                                     | BED SİSTEMİ İÇİN ÖDENECEK<br>İLAVE FARK               |                  |                                                           |            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 5.124.468                                       | - 89.640                                              |                                                                                     | -5.214.108                                            |                  |                                                           |            |
|                                                 | BED ŞARJI<br>İÇİN<br>KULLANILAN<br>ELEKTRİK<br>BEDELİ | SOĞUTMA<br>GRUBU İLE<br>YAPILACAK<br>SOĞUTMADA<br>KULLANILACAK<br>ELEKTRİK<br>BEDEL | ELEKTRİK<br>BEDELİN<br>DEN ELDE<br>EDİLECEK<br>KAZANÇ | ISITMA<br>ZARARI | HER YIL<br>SONUNDA<br>KALAN<br>BEDEL (TL)<br>(Amortisman) |            |
| YILLIK<br>ELEKTRİK<br>TÜKETİM<br>BEDELİ<br>(TL) | 1.YIL                                                 | ₺<br>294.407,00                                                                     | ₺<br>1.162.573,00                                     | 868.166          | 89.640                                                    | -4.435.582 |
|                                                 | 2.YIL                                                 | ₺<br>309.127,35                                                                     | ₺<br>1.220.701,65                                     | 911.574          | 89.640                                                    | -3.613.647 |
|                                                 | 3.YIL                                                 | ₺<br>324.583,72                                                                     | ₺<br>1.281.736,73                                     | 957.153          | 89.640                                                    | -2.746.134 |
|                                                 | 4.YIL                                                 | ₺<br>340.812,90                                                                     | ₺<br>1.345.823,57                                     | 1.005.011        | 89.640                                                    | -1.830.764 |
|                                                 | 5.YIL                                                 | ₺<br>357.853,55                                                                     | ₺<br>1.413.114,75                                     | 1.055.261        | 89.640                                                    | -865.142   |
|                                                 | 6.YIL                                                 | ₺<br>375.746,23                                                                     | ₺<br>1.483.770,48                                     | 1.108.024        | 89.640                                                    | 153.242    |
|                                                 | 7.YIL                                                 | ₺<br>394.533,54                                                                     | ₺<br>1.557.959,01                                     | 1.163.425        | 89.640                                                    | 1.227.027  |
|                                                 | 8.YIL                                                 | ₺<br>414.260,21                                                                     | ₺<br>1.635.856,96                                     | 1.221.597        | 89.640                                                    | 2.358.984  |
|                                                 | 9.YIL                                                 | ₺<br>434.973,22                                                                     | ₺<br>1.717.649,81                                     | 1.282.677        | 89.640                                                    | 3.552.021  |
|                                                 | 10.YIL                                                | ₺<br>456.721,89                                                                     | ₺<br>1.803.532,30                                     | 1.346.810        | 89.640                                                    | 4.809.191  |
| 10. YIL SONUNDAKİ<br>DURUM                      | 3.703.020                                             | 14.622.718                                                                          | 10.919.699                                            | 15.728.890       |                                                           |            |

Sistemin amortisman süresi hesaplanırken elektrik tüketiminin aynı kalacağı ve elektriğe %5 yıllık zam gelebileceği düşünülmüştür. Bu şartlarda yıllık tüketim maliyeti ve geri ödeme süresi Şekil 3.4'te görülmektedir. Yapılan bu çalışma sonunda sistemin yaklaşık 5 yılda kendini geri ödediği, 6 yılın sonunda 153.242 TL kazanç sağlayacağı ve 10 yılın sonunda ise yaklaşık 15.728.890 TL'lik bir tasarruf sağlayacağı görülmüştür.



Şekil 3.4. Binada Isıtma Dezavantajlı BED Sistemi için Yatırımın Geri Ödeme Süresi ve 10 Yıl Boyunca Elde Edilecek Kâr Miktarı

Tablo 3.10 ve Şekil 3.4'ten görüldüğü üzere, sisteme ısıtma zararı her yıl eklenmesine rağmen sistem kendini 5 yıl gibi kısa bir sürede geri ödemektedir. Sistemde 6 yıl sonunda elde edilen kâr miktarı 153.242 TL'dir. Sistem 10 yılın sonundaki kâr miktarı 15.728.890 TL olmaktadır. Yani sistem 10 yıl sonunda bu dezavantajı avantaja dönüştürmüştür.

### 3.3. Sistemin Farklı BED Kullanım Stratejilerinin Ekonomik Açıdan Değerlendirilmesi

BED sistemlerinde, elektrik birim fiyatının pahalı olduğu saatlerdeki soğutma yükü, elektriğin ucuz olduğu döneme kaydırılmaktadır. Bu sayede, soğutma sistemleri için gerekli elektrik maliyeti azaltılmış olur. Bölüm 1.7'de BED sistemleri ile alakalı stratejiler bulunmaktadır. Buz termal depolama sistemi kullanım stratejisi, enerjinin ne kadar depolandığı ve depolanan enerjinin nasıl kullanıldığıdır diyebiliriz. Depolanan enerji miktarı sistemin ilk yatırım maliyeti ile bağlantılıyken, depolanan enerjinin nasıl kullanıldığı, BED'in sağlayacağı ekonomik tasarruf miktarı ile değerlendirilir. Bu nedenle, sistem kullanım stratejisi iyi ayarlanmalıdır, çünkü iyi ayarlanmayan BED geri ödeme süresini uzatabilir ve ekonomik tasarruf miktarını azaltabilir. Bu bölümde,

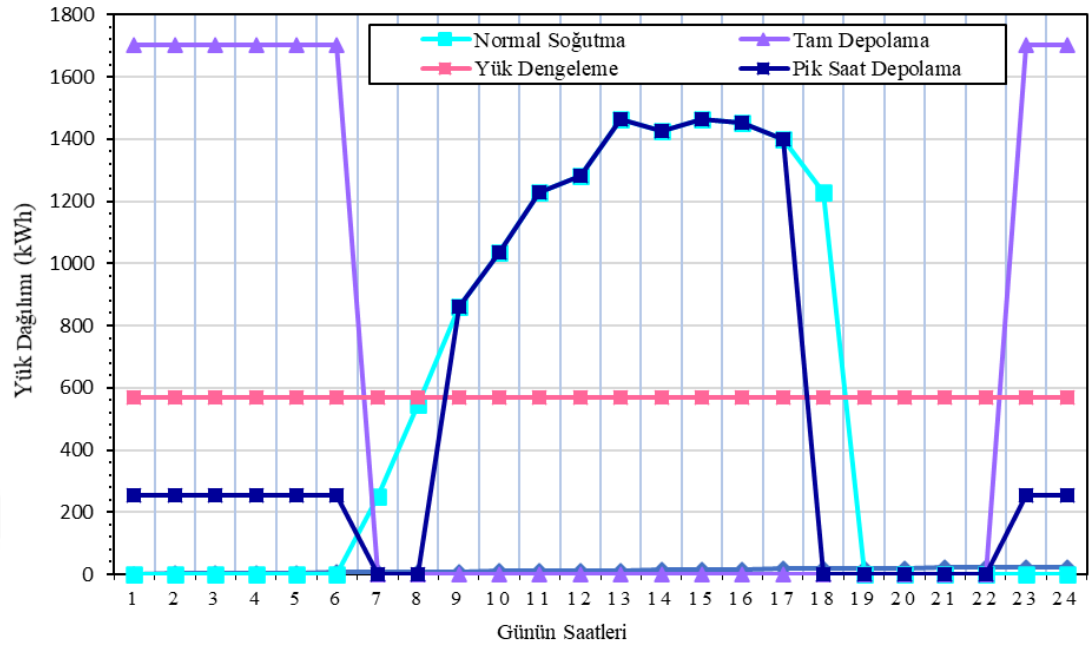
İstanbul'daki ofis binası için farklı BED stratejileri ekonomik açıdan incelenecektir. Ekonomik hesaplar soğutma pik yükü üzerinden yapılmıştır. Bu kapsamda 12 farklı BED kullanım strateji incelenmiştir.

### 3.3.1. BED Kullanım Stratejileri

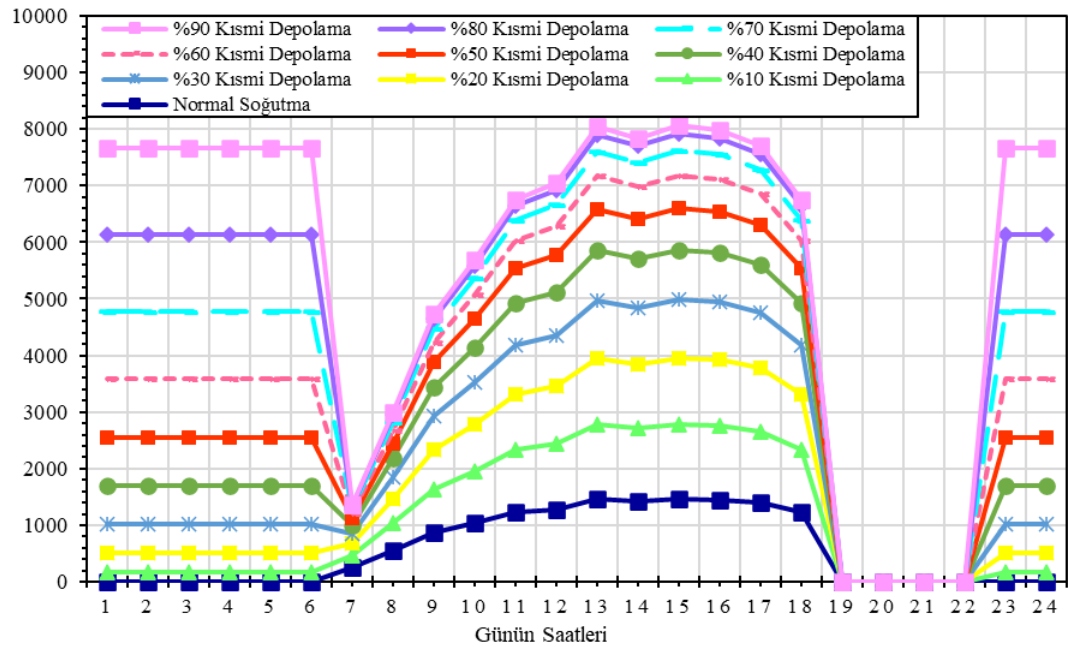
BED sistemleri, elektrik birim fiyatının pahalı olduğu saatlerdeki soğutma yükü elektriğin ucuz olduğu dönemlere kaydırılarak, soğutma sistemleri için gerekli elektrik maliyeti azaltılmış olmaktadır. Aynı zamanda normal soğutma sistemlerine göre yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir. Bu fazla yatırım maliyeti BED sistemlerinden elde edilen tasarruf ile kısa sürede geri ödenmektedir ve kâr durumuna geçmektedir. Sistemin ilk yatırım maliyeti ve ekonomik tasarruf üzerindeki en büyük etkiye BED kullanım stratejileri sahiptir. Bu çalışmada, 12 farklı BED kullanım stratejisinin ofis binası için BED sisteminin soğutma maliyeti üzerindeki etkisi ele alınmıştır. BED kullanım stratejileri soğutma yüküne göre hesaplanmıştır. Şekil 3.5'ten görüldüğü gibi, tüm soğutma yükü tam depolama stratejisinde pik olmayan saatlerde depolanmıştır. Bu şekilden görüldüğü üzere, tam depolama stratejisinde binanın pik soğutma yükünün tamamı depolanır. Bu strateji, daha yüksek soğutucu kapasitesi ve depolanacak enerji miktarı daha yüksek olduğundan daha yüksek depolama hacmi gerektirir. Dolayısıyla yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirir.

Yük dengeleme stratejisinde (Şekil 3.5) amaç, gün boyunca soğutma gruplarını eşit kullanmaktır. Böylece soğutma yükünün bir kısmı depolanır. Bu strateji genellikle enerji yükleme gece tarifesinde depolanır. Daha düşük soğutucu kapasitesi ve depolama hacmi gereklidir. Bu nedenle, bu strateji genellikle soğutucular için ilk yatırım maliyetini düşürür. Pik saatler stratejisi için kısmi depolamada (Şekil 3.5), yalnızca pik saatlerde soğutma yükü depolanır. Bu stratejinin temel amacı, elektriğin pahalı olduğu yoğun saatlerden kaçınmaktır. Enerji yükleme gece periyodunda, enerji depolama da gündüz tarifesinde yapılır, depolanan enerji pik saatlerde kullanılmaktadır.

Şekil 3.5'ten görüldüğü üzere, chiller elektriğin yoğun olduğu saatlerde çalışmamaktadır. Bu strateji, yoğun soğutma saatleri elektrik yoğun saatleriyle çakıştığı zaman en fazla faydayı sağlamaktadır. Elektrik tarifesinin pik saati, soğutma yükünün tepe noktasıyla çakışmadığında, soğutucu kapasitesi genellikle azalmaz. Dolayısıyla, bu strateji ilk yatırım maliyetini düşürebilir.



Şekil 3.5. Çalışmada Kullanılan BED Kullanım Stratejilerinin Saatlik Soğutma Grubu Yükle



Şekil 3.6. Çalışmada Kullanılan BED Kullanım Stratejilerinin Saatlik Soğutma Grubu Kullanımı

Soğuk kapasitesi, BED'in kullanıldığı binanın soğutma yükü ve fiziksel durumuna bağlı olarak farklı miktarlarda depolanabilir. Kısmi depolama için saatlik soğutucu kullanımı

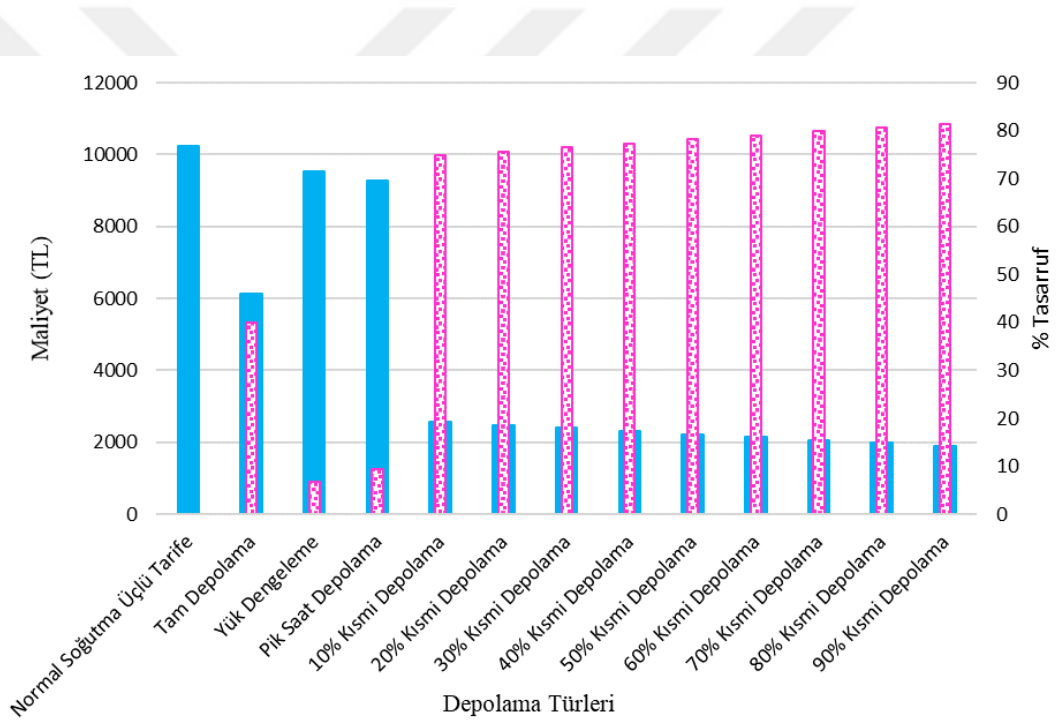
Şekil 3.6 'da verilmiştir. Kısmi depolama stratejisinin temel amacı, soğutma tepe yükünün belirli bir bölümünü pik olmayan saatlere kaydırmaktır. Ofis binası için gereken soğutma yükünün bir kısmı pik olmayan saatlerde depolanır ve gün içerisinde de kullanılır. Bu yazıda kullanılan stratejiler için %10- %90 arasında depolanan enerji miktarı Tablo 3.11'de verilmiştir. BED kullanım stratejilerinin soğutma yükleri, saatlik pik soğutma yükleriyle orantılı olarak hesaplanmıştır. Bazı soğutma kullanımlarının depolama miktarları yaklaşık aynıdır. Örneğin, yük dengeleme ile %30 kısmi depolama stratejileri yaklaşık olarak 4.100 kWh enerji depolanmaktadır. Aynı şekilde pik saatler ve %50 kısmi enerji depolama da yaklaşık 6.400 kWh enerji depolanmaktadır. Ancak, depolanan enerji farklı şekillerde kullandığı için stratejilerin ekonomik etkileri de farklı olacaktır.

Tablo 3.11. Çalışmada Kullanılan Stratejilerin Enerji Depolama Miktarları

| Stratejiler        | Depolanan enerji miktarı (kWh) | Yüzde (%) |
|--------------------|--------------------------------|-----------|
| Tam Depolama       | 13636                          | 100       |
| Yük Dengeleme      | 4500                           | 33        |
| Pik Saat Depolama  | 6409                           | 47        |
| 10% Kısmi Depolama | 1364                           | 10        |
| 20% Kısmi Depolama | 2727                           | 20        |
| 30% Kısmi Depolama | 4091                           | 30        |
| 40% Kısmi Depolama | 5454                           | 40        |
| 50% Kısmi Depolama | 6818                           | 50        |
| 60% Kısmi Depolama | 8182                           | 60        |
| 70% Kısmi Depolama | 9545                           | 70        |
| 80% Kısmi Depolama | 10909                          | 80        |
| 90% Kısmi Depolama | 12272                          | 90        |

Ofis binasında kullanılacak 12 farklı BED stratejileri için saatlik chiller kullanımı Tablo 3.12'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, her bir stratejinin saatlik kullanım miktarları ve çiller kapasitesi farklılık göstermektedir. Tablo 3.12'de yeşil renkteki bölümler gece tarifesini, mavi renkteki bölümler gündüz tarifesini ve kırmızı renkteki bölümler ise pik saatleri belirtmektedir. Tablo 3.12'deki soğutma grubu kapasiteleri kullanılarak, pik soğutma yükü için günlük soğutma maliyetleri hesaplanmıştır. Saatlik soğutma maliyetleri; normal bina soğutma ve 12 farklı BED kullanım stratejilerine göre hesaplanmıştır. BED'in olmadığı durumdaki soğutma sadece üçlü tarife için hesaplanmıştır. Saatlik elektrik tüketim maliyetleri Tablo 3.13'te verilmiştir. Tablo 3.13'teki maliyet hesaplamalarında Tablo 2.3 ve Şekil 2.3'te verilen elektrik birim

fiyatları kullanılmıştır. Ayrıca soğutma grubunun EER değerinin 3.0 olduğu maliyet hesaplarında göz önüne alınmıştır. BED sisteminin olduğu soğutma sisteminde, artan depolama miktarı ile elektrik maliyeti düşüş göstermektedir. Bunun nedeni, artan depolama miktarı ile soğutma yükünün gece tarifesine kaydırılmış olmasıdır. Böylece, artan depolama miktarı, gündüz ve pik saat tarifesindeki soğutma grubu kullanımını azalttığı için elektrik tüketim maliyetinde düşüşe neden olmaktadır. Bu durum kısmi depolama stratejileri ve tam depolama maliyet sonuçlarında açıkça görülmektedir. %10 kısmi depolama stratejisinde, pik soğutma yükü altında elektrik tüketim maliyeti 2.572 TL olurken, %90 kısmi depolama stratejilerinde 1894 TL ve tam depolama durumunda ise 6.132 TL 'dir.



Şekil 3.7. Farklı BED Kullanım Stratejilerinin Tasarruf Yüzde Grafiği

Şekil 3.7’te BED kullanım stratejilerinin maliyet ve tasarruf grafiği Tablo 3.13’te verilen bilgiler doğrultusunda çizilmiştir. Şekil 3.7’den görüldüğü üzere, daha önce de belirttiğimiz gibi BED sisteminin olduğu soğutma sisteminde, artan depolama miktarı ile elektrik maliyeti düşüş göstermektedir. Buna bağlı olarak maliyet kısmi depolama miktarı arttıkça düşerken, sistemden elde ettiğimiz tasarruf kısmi depolama miktarı arttıkça artmaktadır. BED sisteminin sağladığı faydalardan birini yani kâr miktarının artması durumu şekilde net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 3.12. Normal Soğutma ve 12 Farklı BED Stratejilerinin Saatlik Chiller Kullanımı

| Saat | Normal Soğutma (kWh) | Tam Depolama(kWh) | Yük Dengeleme (kWh) | Pik Saat Depolama (kWh) | %10 Kısmi Depolama (kWh) | %20 Kısmi Depolama (kWh) | %30 Kısmi Depolama (kWh) | %40 Kısmi Depolama (kWh) | %50 Kısmi Depolama (kWh) | %60 Kısmi Depolama (kWh) | %70 Kısmi Depolama (kWh) | %80 Kısmi Depolama (kWh) | %90 Kısmi Depolama (kWh) |
|------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 2    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 3    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 4    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 5    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 6    | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 7    | 249                  | 0                 | 568                 | 0                       | 224                      | 199                      | 174                      | 149                      | 125                      | 100                      | 75                       | 50                       | 25                       |
| 8    | 545                  | 0                 | 568                 | 0                       | 491                      | 436                      | 382                      | 327                      | 273                      | 218                      | 164                      | 109                      | 55                       |
| 9    | 862                  | 0                 | 568                 | 862                     | 776                      | 690                      | 603                      | 517                      | 431                      | 345                      | 259                      | 172                      | 86                       |
| 10   | 1034                 | 0                 | 568                 | 1034                    | 931                      | 827                      | 724                      | 620                      | 517                      | 414                      | 310                      | 207                      | 103                      |
| 11   | 1229                 | 0                 | 568                 | 1229                    | 1106                     | 983                      | 860                      | 737                      | 615                      | 492                      | 369                      | 246                      | 123                      |
| 12   | 1281                 | 0                 | 568                 | 1281                    | 1153                     | 1025                     | 897                      | 769                      | 641                      | 512                      | 384                      | 256                      | 128                      |
| 13   | 1463                 | 0                 | 568                 | 1463                    | 1317                     | 1170                     | 1024                     | 878                      | 732                      | 585                      | 439                      | 293                      | 146                      |
| 14   | 1426                 | 0                 | 568                 | 1426                    | 1283                     | 1141                     | 998                      | 856                      | 713                      | 570                      | 428                      | 285                      | 143                      |
| 15   | 1465                 | 0                 | 568                 | 1465                    | 1319                     | 1172                     | 1026                     | 879                      | 733                      | 586                      | 440                      | 293                      | 147                      |
| 16   | 1452                 | 0                 | 568                 | 1452                    | 1307                     | 1162                     | 1016                     | 871                      | 726                      | 581                      | 436                      | 290                      | 145                      |
| 17   | 1401                 | 0                 | 568                 | 1401                    | 1261                     | 1121                     | 981                      | 841                      | 701                      | 560                      | 420                      | 280                      | 140                      |
| 18   | 1229                 | 0                 | 568                 | 0                       | 1106                     | 983                      | 860                      | 737                      | 615                      | 492                      | 369                      | 246                      | 123                      |
| 19   | 0                    | 0                 | 568                 | 0                       | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 20   | 0                    | 0                 | 568                 | 0                       | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 21   | 0                    | 0                 | 568                 | 0                       | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 22   | 0                    | 0                 | 568                 | 0                       | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 23   | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |
| 24   | 0                    | 1704              | 568                 | 253                     | 170                      | 341                      | 511                      | 682                      | 852                      | 1022                     | 1193                     | 1363                     | 1534                     |

Tablo 3.13. Normal Soğutma ve 12 Farklı BED Stratejilerinin Saatlik Elektrik Tüketim Maliyeti

| Saat          | %10<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %20<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %30<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %40<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %50<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %60<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %70<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %80<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | %90<br>Kısmi<br>Depolama<br>(TL) | Normal<br>Soğutma<br>Üçlü Tarife<br>(TL) | Tam<br>Depolama<br>Maliyet<br>(TL) | Yük<br>Dengeleme<br>Maliyet<br>(TL) | Pik Saat<br>Depolama<br>Maliyet<br>(TL) |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1             | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 2             | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 3             | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 4             | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 5             | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 6             | 26                               | 51                               | 77                               | 103                              | 129                              | 154                              | 180                              | 206                              | 231                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 7             | 54                               | 48                               | 42                               | 36                               | 30                               | 24                               | 18                               | 12                               | 6                                | 179                                      | 0                                  | 409                                 | 0                                       |
| 8             | 118                              | 105                              | 92                               | 79                               | 66                               | 53                               | 39                               | 26                               | 13                               | 392                                      | 0                                  | 409                                 | 0                                       |
| 9             | 187                              | 166                              | 146                              | 125                              | 104                              | 83                               | 62                               | 42                               | 21                               | 620                                      | 0                                  | 409                                 | 620                                     |
| 10            | 225                              | 200                              | 175                              | 150                              | 125                              | 100                              | 75                               | 50                               | 25                               | 744                                      | 0                                  | 409                                 | 744                                     |
| 11            | 267                              | 237                              | 208                              | 178                              | 148                              | 119                              | 89                               | 59                               | 30                               | 884                                      | 0                                  | 409                                 | 884                                     |
| 12            | 278                              | 247                              | 216                              | 186                              | 155                              | 124                              | 93                               | 62                               | 31                               | 922                                      | 0                                  | 409                                 | 922                                     |
| 13            | 318                              | 282                              | 247                              | 212                              | 177                              | 141                              | 106                              | 71                               | 35                               | 1053                                     | 0                                  | 409                                 | 1053                                    |
| 14            | 310                              | 275                              | 241                              | 207                              | 172                              | 138                              | 103                              | 69                               | 34                               | 1026                                     | 0                                  | 409                                 | 1026                                    |
| 15            | 318                              | 283                              | 248                              | 212                              | 177                              | 141                              | 106                              | 71                               | 35                               | 1054                                     | 0                                  | 409                                 | 1054                                    |
| 16            | 315                              | 280                              | 245                              | 210                              | 175                              | 140                              | 105                              | 70                               | 35                               | 1045                                     | 0                                  | 409                                 | 1045                                    |
| 17            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 1008                                     | 0                                  | 409                                 | 1008                                    |
| 18            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 1299                                     | 0                                  | 600                                 | 0                                       |
| 19            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                        | 0                                  | 600                                 | 0                                       |
| 20            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                        | 0                                  | 600                                 | 0                                       |
| 21            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                        | 0                                  | 600                                 | 0                                       |
| 22            | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                | 0                                        | 0                                  | 600                                 | 0                                       |
| 23            | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| 24            | 22                               | 44                               | 67                               | 89                               | 111                              | 133                              | 155                              | 177                              | 200                              | 0                                        | 766                                | 256                                 | 114                                     |
| <b>TOPLAM</b> | <b>2572</b>                      | <b>2487</b>                      | <b>2402</b>                      | <b>2318</b>                      | <b>2233</b>                      | <b>2148</b>                      | <b>2064</b>                      | <b>1979</b>                      | <b>1894</b>                      | <b>10226</b>                             | <b>6132</b>                        | <b>9543</b>                         | <b>9266</b>                             |

### 3.3.2. Farklı BED Stratejilerinin İlk Yatırım Maliyeti

Bu çalışmada ofis binası için uygulanan BED maliyetine göre diğer stratejiler için ilk yatırım maliyetleri hesaplanmıştır. BED'in önemli ekipmanları, ekipmanların fiyatları ve BED kullanım stratejileri ile değişen maliyetleri Tablo 3.14'te verilmiştir. Tablo 3.14'ten görüldüğü üzere, BED sisteminde kullanılan makine, teçhizat ve ekipmanlar, BED kullanım stratejilerine göre sabit olabileceği gibi farklı da olabilir. Bu elemanlardan tesisat elemanları ve işçiliği tüm stratejiler için aynıdır. Çünkü aynı ekipman ve tesisat kullanılmaktadır. Bunun dışında BED için önemli diğer elemanlar da BED kullanım stratejilerine göre değişim göstermektedir. Maliyet hesaplanırken Erdemir ve Altuntop [58]'un çalışmasındaki değerler orantılanarak hesaplanmıştır ve doların güncel kur değeri 7.38 alınmıştır. Tablo 3.14'ten görüldüğü gibi ofis binası için BED entegre soğutma sisteminin maliyeti 4.287.680 TL (581.000 USD)'dir. BED'siz normal soğutma sisteminin maliyeti 2.472.300 TL (335.000 USD) 'dir. Sonuç olarak, BED için ekstra ilk yatırım 1.815.380 TL (246.000 USD)'dir. Ayrıca, BED kullanım stratejileri ve depolama kapasiteleri ile sistem araçlarının değişimi Tablo 3.14'te verilmiştir. Buz depolama tankının maliyeti, depolama kapasitesi ile orantılı olarak değişmektedir, çünkü artan depolama kapasitesi ile daha büyük hacimli depolama tankına ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde, daha yüksek depolama kapasitesi, daha fazla sayıda buz kapsülü gerektirir. Yani, artan depolama kapasitesi ile tank hacmi ve buz kapsülü sayısı da artmaktadır. Artan kapsül sayısı ve tank hacmi ile sistemdeki basınç düşüşleri de artmaktadır. Artan basınç düşüşünü karşılamak için sistemde daha yüksek güce sahip bir pompa kullanılması gerekir. Benzer şekilde, daha yüksek depolama kapasitesi, daha yüksek hacimli ısı transfer akışkanı gerektirir. Isı değiştirici kapasitesi sabit kalacağından, maliyeti sabit alınmıştır. Çünkü, bina soğutma yükü tüm durumlarda aynı olduğundan, soğutulması gereken su miktarı da aynı olacaktır. Soğutucuların maliyeti doğrudan soğutma tepe yükü ile ilgilidir. Bu nedenle, chiller maliyetleri soğutma tepe yükü ile orantılı olarak alınmıştır.

Tablo 3.14. Binada Kullanılan BED ve Sistem Ekipmanlarının İlk Yatırım Maliyeti

| Sistem Ekipmanları          | Maliyet (TL) | Maliyet Değişimi |
|-----------------------------|--------------|------------------|
| Buz Depolama Tankı          | 905848       | Orantılı         |
| Buz Kapsül                  | 422729       | Orantılı         |
| Soğutma Grubu               | 1811696      | Orantılı         |
| Pompa                       | 120780       | Orantılı         |
| Isı Değiştirici             | 241559       | Sabit            |
| Isı Transfer Akışkanı       | 181170       | Orantılı         |
| Tesisat ve Diğer Ekipmanlar | 603899       | Sabit            |
| Toplam                      | 4287681      |                  |

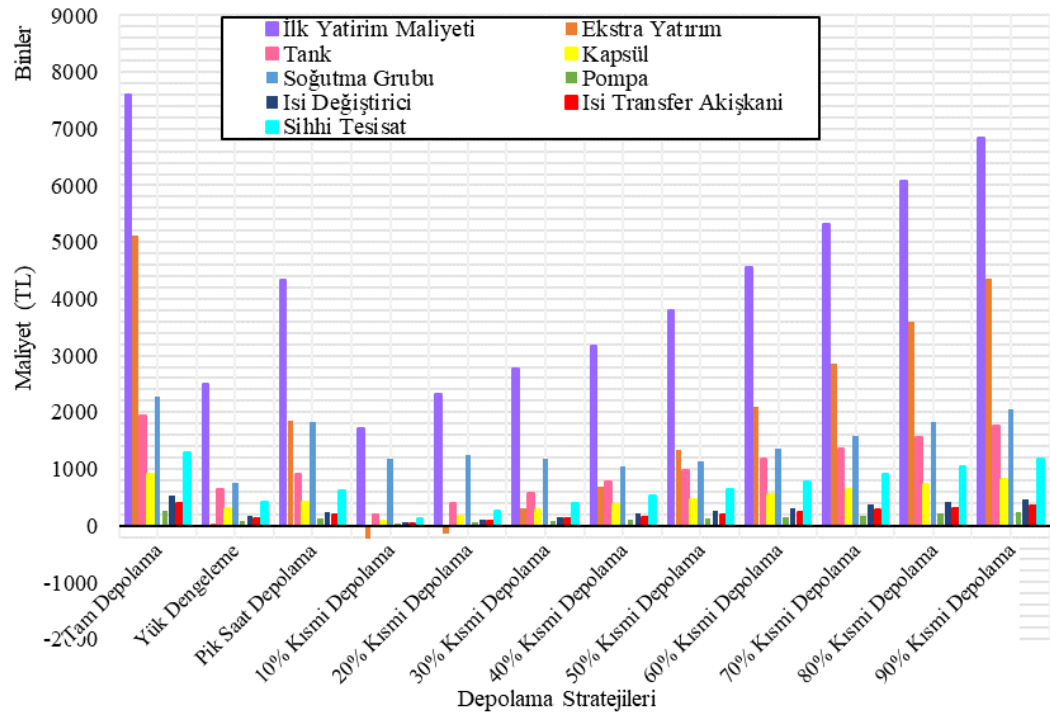
Bu çalışma, farklı BED kullanım stratejilerinin soğutma maliyeti üzerindeki etkisini belirlemek için teorik bir karşılaştırma da sunmaktadır. Farklı BED kullanım stratejilerinin ekonomik performansları, geri ödeme süresi ve 10 yılın sonundaki kar miktarı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Hipermarketin en yüksek soğutma yükü için ekonomik hesaplamalar yapılır. Hesaplamalarda aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

- Hesaplamalar, soğutma tepe yüküne dayanmaktadır.
- Elektrik birim fiyatının yılda %5 artması bekleniyor.
- Gelecekteki sıkıntılar ve plansız duruşlar dikkate alınmadı. Sistemin sorunsuz çalıştığı kabul edilmiştir.
- Hesaplamalarda vergi ve diğer fonlar dikkate alınmamıştır.
- Tepe soğutma yükünün tüm aylar boyunca aynı olacağı varsayılmaktadır.

Tablo 3.15. Farklı BED Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetleri

| Strateji           | İlk Yatırım Maliyeti (TL) | Ekstra Yatırım |
|--------------------|---------------------------|----------------|
| Tam Depolama       | 7596767                   | 5124468        |
| Yük Dengeleme      | 2506328                   | 34028          |
| Pik Saat Depolama  | 4331946                   | 1859646        |
| 10% Kısmi Depolama | 1718742                   | -753558        |
| 20% Kısmi Depolama | 2320128                   | -152172        |
| 30% Kısmi Depolama | 2768968                   | 296668         |
| 40% Kısmi Depolama | 3168172                   | 695872         |
| 50% Kısmi Depolama | 3797846                   | 1325546        |
| 60% Kısmi Depolama | 4558471                   | 2086171        |
| 70% Kısmi Depolama | 5317626                   | 2845326        |
| 80% Kısmi Depolama | 6076137                   | 3603837        |
| 90% Kısmi Depolama | 6836774                   | 4364474        |

Farklı kullanım stratejileri için BED 'in ilk yatırım maliyetleri Tablo 3.15'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.8'de sistem ekipmanı ve BED maliyetleri görülmektedir. Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi, BED 'in ilk yatırım maliyeti artan depolama kapasitesi ile artmaktadır. Artan depolama kapasitesi nedeniyle, sistemde kullanılan aletlerin kapasiteleri de artmaktadır. Ancak chiller maliyeti depolama kapasitesine göre değişmez, soğutma tepe yükü ile değişir. Tablo 3.15'te en önemli nokta, %10 ve %20 kısmi depolama stratejilerinde görüldüğü üzere, BED sistemlerinin faydalarından biri olan chiller kapasitesinin küçültülmesi gerçekleşmiştir. BED soğutma yükü chiller kapasitesini düşürmektedir. Burada, BED sistemine harcadığımız maliyet normal soğutma maliyetine göre daha düşük çıkmıştır yani bu stratejilerde kazanç sağlanmıştır diyebiliriz. Ayrıca, en düşük chiller maliyeti %40 kısmi depolama stratejisinde görülmektedir. Tablo 3.15 ve Şekil 3.8'den görüldüğü gibi, depolama kapasitesinin BED'in ilk yatırım maliyeti üzerinde önemli etkileri vardır.

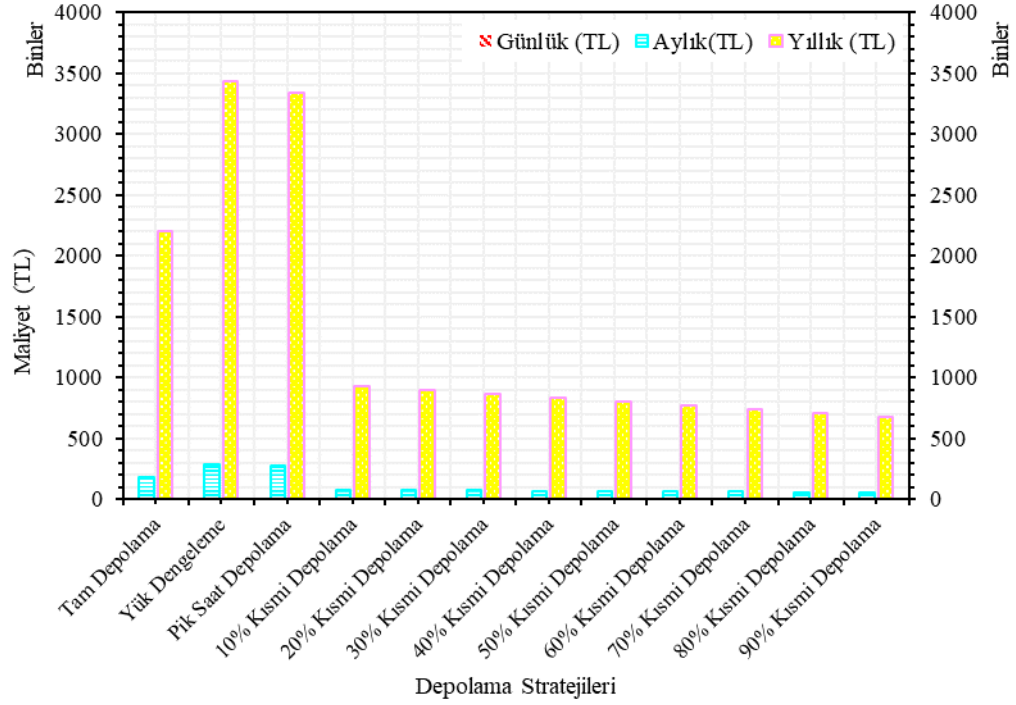


Şekil 3.8. BED Farklı Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetleri ve Ekstra Yatırım Tutarları

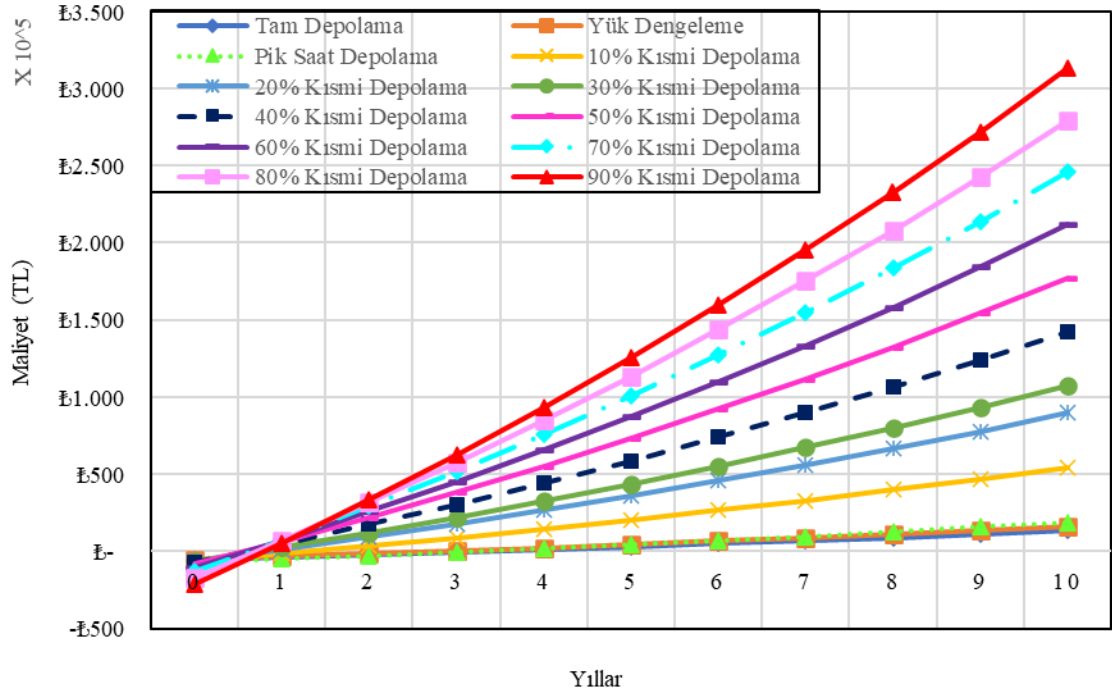
Farklı BED kullanım stratejileri için elektrik tüketim maliyetleri Tablo 3.13'te verilen pik soğutma yükü chiller kullanımına göre hesaplanmıştır. Maliyet hesaplamasında Şekil 2.3'te verilen üçlü tarifeli elektrik birim fiyatı kullanılmıştır. BED kullanım stratejileri için günlük, haftalık ve yıllık elektrik tüketim maliyetleri Tablo 3.16 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.16. Günlük, Haftalık ve Yıllık Elektrik Tüketim Maliyetleri

| Depolama Stratejileri | Günlük (TL) | Aylık (TL) | Yıllık (TL) |
|-----------------------|-------------|------------|-------------|
| Tam Depolama          | 6132        | 183960     | 2207520     |
| Yük Dengeleme         | 9543        | 286290     | 3435480     |
| Pik Saat Depolama     | 9266        | 277980     | 3335760     |
| 10% Kısmi Depolama    | 2572        | 77160      | 925920      |
| 20% Kısmi Depolama    | 2487        | 74610      | 895320      |
| 30% Kısmi Depolama    | 2402        | 72060      | 864720      |
| 40% Kısmi Depolama    | 2318        | 69540      | 834480      |
| 50% Kısmi Depolama    | 2233        | 66990      | 803880      |
| 60% Kısmi Depolama    | 2148        | 64440      | 773280      |
| 70% Kısmi Depolama    | 2064        | 61920      | 743040      |
| 80% Kısmi Depolama    | 1979        | 59370      | 712440      |
| 90% Kısmi Depolama    | 1894        | 56820      | 681840      |

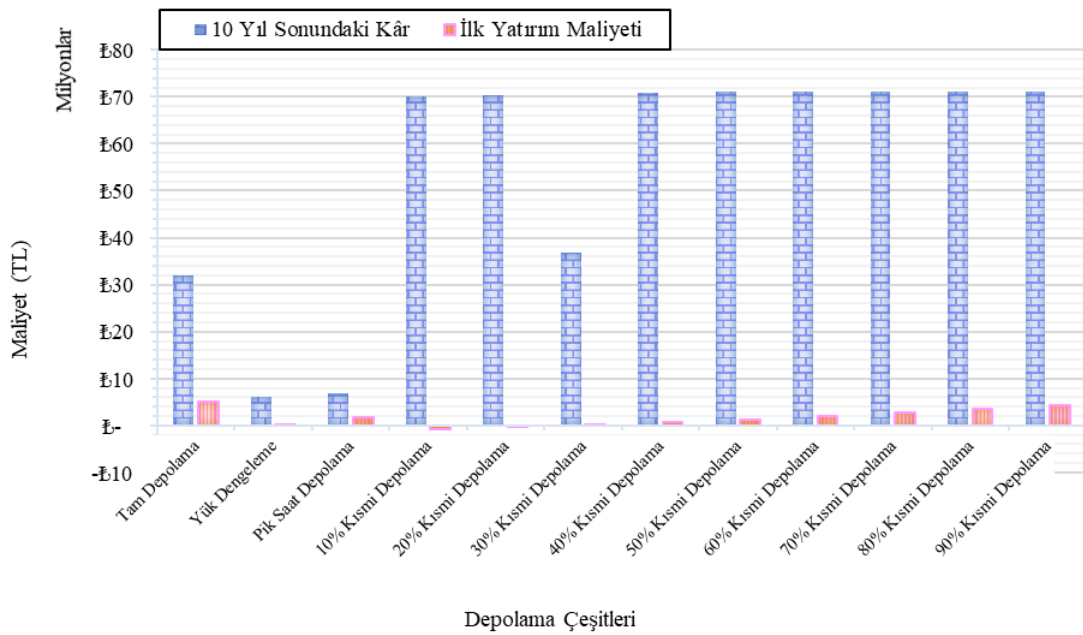


Şekil 3.9. Günlük, Haftalık ve Yıllık Elektrik Tüketim Maliyetleri



Şekil 3.10. Farklı BED Kullanım Stratejileri için Geri Ödeme Süreleri ve 10 Yıllık Sonundaki Kâr Miktarı

Tablo 3.16 ve Şekil 3.9'dan görüldüğü üzere, artan depolama kapasitesi ile soğutma maliyeti düşmüştür. Depolama kapasitesinin artmasıyla soğutma maliyetinde düşüş olmuştur ve ekonomik tasarruf artmıştır. Ancak, artan depolama kapasitesi ile ilk yatırım maliyetinin de arttığı dikkate alınmalıdır. Ayrıca, daha yüksek depolama kapasitesi, daha yüksek hacimli depolama tankı gerektirir. Bu nedenle binanın fiziki koşulları dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.11. Farklı BED Kullanım Stratejileri için İlk Yatırım Maliyetlerinin ve 10 Yılın Sonunda Kâr Miktarının Karşılaştırılması

Sistemin geri ödeme süresi ve 10 yıl sonundaki kâr miktarı Şekil 3.10'dan görülmektedir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi 10 yıl sonunda en yüksek kâr 71.086.467 TL olup %90 kısmi depolama stratejisinde görülmektedir. 10 yılın sonunda en düşük kâr 6.146.937 TL'dir ve yük dengeleme stratejisinde görülmektedir. Artan depolama kapasitesi ile kâr miktarı artmıştır.

Kâr ve geri ödeme süresi hesaplamalarının soğutma pik yükü üzerinden yapılmıştır. Geri ödeme süresi düşünüldüğünde, %80 ve %90 kısmi depolama stratejileri ile en kısa geri ödeme süresinin yaklaşık 1 yıl olduğu bulunmuştur. Tam depolama da geri ödeme süresi 3 yıldır ve 10 yılın sonundaki kâr miktarı 31.946.795 TL'dir. En uzun geri ödeme süresi, pik saat depolama stratejisinde (yaklaşık 4 yıl) görülür.

Farklı BED kullanım stratejileri için artan depolama kapasitesi ile geri ödeme süreleri artmıştır. Depolama kapasitesinin artmasıyla geri ödeme süresi artmış olsada, daha yüksek depolama kapasitesi 10 yılın sonunda daha yüksek kâr sağlamıştır. Farklı BED kullanım stratejilerine göre BED'in ilk yatırım maliyeti ve 10 yıl sonunda kâr miktarındaki değişiklikler Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Şekil 3.11'den görülebileceği ve daha önce ifade edildiği gibi, artan depolama kapasitesi ilk yatırım maliyetini ve kâr miktarı arttırmaktadır ve bu nedenle kısmi depolama stratejilerinde daha yüksek kârlar elde edilmiştir.

Yukarıdaki sonuçlardan görüldüğü üzere, BED sisteminden elde edilecek ekonomik fayda üzerinde farklı BED kullanım stratejilerinin önemi büyüktür. BED kullanım stratejileri ekonomik fayda sağladığı gibi ilk kurulum maliyeti (ekstra yatırım ve geri ödeme süresi) üzerinde de etkisi büyüktür. Yani, ekonomik fayda üzerinde durulurken geri ödeme süresi de göz önünde bulundurulmalıdır. Kısalan geri ödeme süresi, ilk yatırım maliyetini kısa sürede geri ödeyecek ve sistemi kısa sürede kâra geçirecektir.

## 4. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, İstanbul'da bir ofis binasının ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanması için BED entegre klima ve ısı pompası sistemi incelenmiştir. BED sistemleri sadece soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada BED sisteminin bir ısı pompasının düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak kullanılabilirliği termodinamik ve ekonomik olarak araştırılmıştır. Termodinamik analizleri enerji ve ekserji hesaplamaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ekonomik değerlendirme aşamasında iki temel araştırma yapılmıştır. Bunlardan birincisi; ofis binasındaki BED sisteminin elektrik tüketim maliyetine sağladığı katkı miktarı ve sistemin geri süresi ile alakalıdır. İkincisi ise farklı BED kullanım stratejilerinin, sistemin ekonomik performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Tez çalışmasından elde edilen ana bulgular ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. BED entegre klima ve ısı pompası sistemi için yapılan termodinamik analizlerden elde edilen sonuçlar enerji analizinin yanında ekserji analizlerinin yapılması gerekliliğini göstermektedir. Ekserji analizleri sistemin referans koşullara göre değerlendirip ve sistem içindeki tersinmezlikleri de dikkate almaktadır.
2. Sistemin günlük çalışan çevrimi için enerjetik ve ekserjetik COP değerleri yaz dönemlerinde sırasıyla 2,03 ve 0,86 olarak hesaplanmıştır. Kış dönemi için ise 3,70 ve 1,90 olarak hesaplanmıştır.
3. Sistemdeki en büyük ekserji yıkımının, enerji boşaltma periyodunda gerçekleşmiştir. Çünkü, boşaltma periyodunda ortam ve ısı transfer akışkanının

sıcaklığı farkı diğer periyotlara göre daha yüksektir. Enerji ve ekserji verimi değerleri enerji boşaltma periyounda sırasıyla %96 ve %4 olarak hesaplanmıştır.

4. Ofis binasında kullanılan BED sistemi elektrik tüketim maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir. 10 yıllık periyot sonunda, normal soğutma sistemine göre 31.184.519 TL tasarruf sağlanabileceği görülmüştür. Ayrıca sadece soğutma durumu dikkate alındığı zaman sistem geri ödeme süresi 3 yıl olarak hesaplanmıştır.
5. BED sisteminin ısı pompası düşük sıcaklık enerji kaynağı olarak kullanılması durumunda ise yıllık ısıtma enerji tüketim maliyeti yaklaşık 462 bin TL olarak hesaplanmıştır. Isıtmanın doğalgaz ile yapılması durumunda ise yıllık ısıtma maliyeti 372 bin TL olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, ısıtma maliyetlerinde doğalgaz sistemine göre yıllık 90 bin TL'lik bir zarar görülmektedir.
6. BED entegre klima ve ısı pompası sisteminin 10 yıllık süre içerisindeki ekonomik performansı dikkate alındığı zaman, sistemin 5 yılda kendini geri ödediği ve 10 sonunda yaklaşık 15,7 milyon TL'lik bir ekonomik tasarruf sağlandığı hesaplanmıştır.
7. Termodinamik parametrik çalışmalar gündüz ve gece sıcaklıkları arasındaki farkın sistemin COP'sini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Gündüz ve gece sıcaklıkları arasındaki farkın artmasıyla BED sisteminin termodinamik etkinliği artmaktadır. Daha iyi termodinamik performans sistemin ekonomik performansını da arttırmaktadır.
8. Ekonomik parametrik çalışmaların sonucunda, elektrik tarifesinin pik saatleriyle soğutma yükünün yoğun olduğu dönemler çakışiyorsa, BED sisteminin ekonomik faydasının da arttığı gözlenmiştir.
9. BED sisteminin ısı pompasına entegre edilmesi, sistemin sadece soğutma için kullanılması durumuna göre ekonomik olarak dezavantaj sağlasada; sistemde binada doğalgaz tüketilmeyecek olması karbon emisyonlarını azalmaya yardımcı olacaktır. Bu yüzden sisteme kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi yapılması sistemin çevresel etkisini gözlemeye yardımcı olacaktır.

10. Binanın yaz ve kış ortam sıcaklıkları arasındaki fark, ısıtma ve soğutma yükleri arasındaki farkın BED entegre klima ve ısı pompası sisteminin hem termodinamik hem de ekonomik performansı üzerindeki etkilidir. Bu yüzden, aynı binanın farklı iklim koşullarında BED entegre klima ve ısı pompası sistemi ile nasıl çalışacağını inceleyen çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.



## KAYNAKÇA

1. Li, G., 2016. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, 53: 897–923.
2. Villablanca, A., Larsson, C., Höög, A., Teh, B. T., 2001. Molecular Genetics of Familial Hyperparathyroidism. **International Journal on Disability Human Development**, 2: 3–12.
3. Cao, X., Dai, X., 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 Building**, 128: 198–213.
4. Global Energy Statistical Yearbook 2020, Electricity domestic consumption data, (Web sayfası: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>), (Erişim tarihi: Aralık 2020).
5. Ptf, H., Mwh, T. L., 2018. Anlaşma, İ. & Avrupa, D. Elektrik Piyasaları Haftalık Raporu. 1–13.
6. Dinçer, İ., Rosen, M. A., 2011. Thermal Energy Storage Systems and Applications. Wiley and Sons, Ltd., Publication, second edition, 2554.
7. Al-bayati, A. L. J. M., 2017. A Cfd Based Analysis Of Thermalperformance For Spherical Capsules Used In Ice Storage Systems. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 66.
8. Evapco Cooling Systems. (Web sayfası: [http://www.evapco.eu/de/product/thermal\\_ice\\_storage](http://www.evapco.eu/de/product/thermal_ice_storage)), ( Erişim tarihi: Ocak 2020)
9. Erdemir, D., 2018. Enerji Depolama Sistemleri Ders Notları. Erciyes Üniversitesi, ss 38.
10. Erek, A., Dincer, I., 2009. Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream. **International Journal Heat and Mass Transfer**, 52: 851–859.
11. D’Helon, C., Protopopescu, V., Perez, R., 2003. Targeting qubit states using open-loop control. **Journal of Physics a Mathematical and General**, 36: 7129–7148.

12. Elghnam, R. I., Abdelaziz, R. A., Sakr, M. H., 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**: 33–48.
13. Ismail, K. A. R., Henríquez, J. R., Silva, T. M., 2003. A parametric study on ice formation inside a spherical capsule. **International Journal Thermal Sciences**, **42**: 881–887.
14. Kousksou, T., Bédécarrats, J. P., Dumas, J. P., Mimet, A., 2005. Dynamic modelling of the storage of an encapsulated ice tank. **Applied Thermal Engineering**, **25**: 1534–1548.
15. Ryu, H. W., Hong, S. A., Shin, B. C., Kim, S. D., 1991. Heat transfer characteristics of cool-thermal storage systems. **Energy**, **16**: 727–737.
16. Ezan, M. A., Erek, A., Dincer, I., 2011. Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system. **Energy**, **36**: 6375–6386.
17. Amin, N. A. M., Bruno, F., Belusko, M., 2014. Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere **Applied Engineering**, **122**: 280–287.
18. Karthikeyan, S., Velraj, R., 2012. Numerical investigation of packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers - A comparison between various mathematical models. **International Journal Thermal Sciences**, **60**: 153–160.
19. MacPhee, D., Dincer, I., 2009. Thermal modeling of a packed bed thermal energy storage system during charging. **Applied Thermal Engineering**, **29**: 695–705.
20. MacPhee, D., Dincer, I., Beyene, A., 2012. Numerical simulation and exergetic performance assessment of charging process in encapsulated ice thermal energy storage system. **Energy**, **41**: 491–498.
21. Acar, C., Dincer, I., 2016. Energy and exergy analyses of a residential cold thermal energy storage system. **International Journal Exergy**, **19**: 441–458.
22. Ismail, K. A. R., Henríquez, J. R., 2002. Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system. **Applied Thermal Engineering**, **22**: 1705–1716.
23. Zhong, J. Q., Fragoso, A. T., Wells, A. J., Wettlaufer, J. S., 2012. Finite-sample-size effects on convection in mushy layers. **Journal of Fluid Mechanics**, **704**.

24. Regin, A. F., Solanki, S. C., Saini, J. S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, **12**: 2438–2458.
25. Verma, P., Singal, S. K., 2008. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, **12**: 999–1031.
26. Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., Letan, R., 2007. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. **International Journal Heat and Mass Transfer**, **50**: 1790–1804.
27. Calvet, N., 2013. Enhanced performances of macro-encapsulated phase change materials (PCMs) by intensification of the internal effective thermal conductivity. **Energy**, **55**: 956–964.
28. Chen, S. L., Chen, C. L., Tin, C. C., Lee, T. S., Ke, M. C., 2000. Experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **23**: 133–144.
29. Tam, A., Ziviani, D., Braun, J. E., Jain, N., 2019. Development and evaluation of a generalized rule-based control strategy for residential ice storage systems. **Energy and Building**, **197**: 99–111.
30. Bi, Y., Yu, M., Wang, H., Huang, J., Lyu, T., 2019. Experimental investigation of ice melting system with open and closed ice-storage tanks combined internal and external ice melting processes. **Energy and Building**, **194**: 12–20.
31. Sepehri, A., Nelson, B., 2019. Energy and emissions analysis of ice thermal energy storage in the western US. **Energy and Building**, **202**: 109393.
32. MacPhee, D., Dincer, I., 2009. Performance assessment of some ice TES systems. **International Journal Thermal Sciences**, **48**: 2288–2299.
33. Song, X., Liu, L., Zhu, T., Chen, S., Cao, Z., 2018. Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage. **Applied Thermal Engineering**, **133**: 613–621.
34. Henze, G. P., Krarti, M., Brandemuehl, M. J., 1998. Simulation environment for the analysis of ice storage controls. **Ashrae Transactions Science**, **104**: 41.
35. Nassif, N., Tesiero, R., Raees, N. Al., 2013. Energy Performance Analysis of Ice Thermal Storage for Commercial HVAC Systems. **Energy Power Engineering**, **7**: 1713–1718.

36. Adref, K. T., Eames, I. W., 2002. Experiments on charging and discharging of spherical thermal (ice) storage elements. **International Journal of Refrigeration**, **26**: 949–964.
37. Awang, N. A., Kamar, H. M., Kamsah, N., 2017. Akademia Baru Journal of Advanced Research in Fluid Energy saving potential of an air-conditioner – Ice thermal storage ( AC-ITS ) system. **Akademia Baru**, **1**: 1–10.
38. Dogan, V., 2018. Klima sistemlerinde buz depolama yönteminin üçlü elektrik tarifesine göre ekonomik analizi, 637-654. *VIII. Ulusal Tesisat Mühendislik Kongresi*, 17.
39. Lin, W. M., Tu, C. S., Tsai, M. T., Lo, C. C., 2015. Optimal energy reduction schedules for ice storage air-conditioning systems. **Energies**, **8**: 10504–10521.
40. Eames, I. W., Adref, K. T., 2002. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems. **Applied Thermal Engineering**, **22**: 733–745.
41. Sehar, F., Rahman, S., Pipattanasomporn, M., 2012. Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings. **Energy and Building**, **51**: 255–262.
42. Drees, K. H., Braun, J. E., 1995. Modeling of area-constrained ice storage tanks. **HVAC&R Research Journal**, **1**: 143–158.
43. Fang, G., Hu, P., Chen, Z., 2002. Dynamic charging performance study of stacked rectangular capsules for ice storage air conditioning. **Nuantong Kongtiao/HV and AC**, **32**: 10.
44. Schibuola, L., 1998. Experimental study of ice storage performance in an office building. **International Journal of Refrigeration**, **22**: 751–759.
45. Sehar, F., 2011. Impact of Ice Storage on Electrical Energy Consumption in Large and Medium-sized Office Buildings in Different Climate Zones.
46. Shamsabadi, A. A., Seryani, A., Dehkordi, A. R., 2016. Study of technical and economic of ice thermal storage systems for an organizational building in Tehran. *The 11 th international Energy Conference ( IEC 2016 )*. 1–9.
47. Liang, K., Ren, X., Ruan, C., Wang, L., 2015. Operation modes and energy analysis of a new ice-storage air- conditioning system. **The Open Electrical&Electronic Engineering Journal**, **9**: 7–14.

48. Kiatsiriroat, T., Vithayasai, S., Vorayos, N., Nuntaphan, A., Vorayos, N., 2003. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, **44**: 497–508.
49. Arcuri, B., Spataru, C., 2017. Barrett, M. Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil. **Sustainable Cities and Society**, **29**: 178–192.
50. Han, Y., Shen, B., Hu, H., 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.
51. Chen, H. J., Wang, D. W. P., Chen, S. L., 2005. Optimization of an ice-storage air conditioning system using dynamic programming method. **Applied Thermal Engineering**, **25**: 461–472.
52. Abdullah, M. O., Yii, L. P., Junaidi, E., Tambi, G., Mustapha, M. A., 2013. Electricity cost saving comparison due to tariff change and ice thermal storage (ITS) usage based on a hybrid centrifugal-ITS system for buildings: A university district cooling perspective. **Energy and Building**, **67**: 70–78.
53. Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., 2012. Thermodynamic evaluation of utilizing different ice thermal energy storage systems for cooling application in office buildings in Malaysia. **Energy and Building**, **53**: 117–126.
54. Pu, J., Liu, G., Feng, X., 2012. Cumulative exergy analysis of ice thermal storage air conditioning system. **Applied Engineering**, **93**: 564–569.
55. Erdemir, D., Altuntop, N., 2019. Investigation of the effect of using graded porosity on the thermal performance of the encapsulated ice thermal energy storage tank. **Energy Storage**, **1**: e44.
56. Erdemir, D., 2019. Numerical investigation of thermal performance of geometrically modified spherical ice capsules during the discharging period. **International Journal of Refrigeration**, **43**: 4554–4568.
57. Erdemir, D., 2019. Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemelerin Sıcak Su Tankları İçerisindeki Konumlarının Isıl Enerji Depolama Performansı Üzerindeki Etkisi Effect of Position of Encapsulated Phase Change Materials in Hot Water Tanks on Thermal Energy Storage Performance. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, **35**. 24–33.

58. Zhang, Y., Liang, T., Tian, Z., Gao, W., Yang, K. A., 2020. Comprehensive parametric, energy and exergy analysis of a novel physical energy storage system based on carbon dioxide Brayton cycle, low-temperature thermal storage, and cold energy storage. **Energy Conversion and Management**, **226**. 11-35.
59. Erdemir, D., Altuntop, N., 2018. Effect of encapsulated ice thermal storage system on cooling cost for a hypermarket. **International Journal of Refrigeration**, **42**: 3091–3101.
60. Ezan, M. A., Erek, A., 2015. Serpantin üzerinde buzlu gizli enerji depolama sistemlerinin deneysel ve sayısal incelenmesi. *IV. Ege Enerji Sempozyumu*, 8.
61. Wu, C. T., Feng, C. L., Tsai, Y. H., 2015. Application of an ice thermal energy storage system as ways of energy management in a multi-functional building. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, **7**.
62. Ezan, M. A., Çetin, L., Erek, A., 2011. Ice thickness measurement method for thermal energy storage unit. **International Thermal Sciences, Technolohg**, **31**: 1–10.
63. Xu, Y., 2017. Performance analysis of static ice refrigeration air conditioning system driven by household distributed photovoltaic energy system. **Solar Energy**, **158**: 147–160.
64. Mi, S., Cai, L., Ma, K., Liu, Z., 2018. Investigation on flow and heat transfer characteristics of ice slurry without additives in a plate heat exchanger. **International Journal Heat and Mass Transfer**, **127**: 11–20.
65. Matsumoto, K., Okada, M., Kawagoe, T., Kang, C., 2000. Ice storage system with water-oil mixture formation of suspension with high IPF. **International Journal of Refrigeration**, **23**: 336–344.
66. Onokoko, C. L., Galanis, N., Poncet, S., Poirier, M., 2019. Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: A numerical study. **International Journal Thermal Sciences**, **142**: 54–67.
67. Wijesundera, N. E., Hawlader, M. N. A., Andy, C. W. B., Hossain, M. K., 2004. Ice-slurry production using direct contact heat transfer. **International Journal of Refrigeration**, **27**: 511–519.
68. Pronk, P., Hansen, T. M., Ferreira, C. A. I., Witkamp, G. J., 2005. Time-dependent behavior of different ice slurries during storage. **International Journal of Refrigeration**, **28**: 27–36.

69. López-Navarro, A., 2013. Experimental investigation of the temperatures and performance of a commercial ice-storage tank. **International Journal of Refrigeration**, **36**: 1310–1318.
70. Sanaye, S., Shirazi, A., 2013. Four e analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications. **International Journal of Refrigeration**, **36**: 828–841.
71. Sanaye, S., Hekmatian, M., 2016. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes. **International Journal of Refrigeration**, **66**: 181–197.
72. Augusto, G. L., Culaba, A. B., Maglaya, A. B., 2015. Identification of Design Criteria for District Cooling Distribution Network with Ice Thermal Energy Storage System. **Energy Procedia**, **79**.
73. Hajiah, A., Krarti, M., 2012. Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass - Part I: Simulation environment. **Energy Conversion and Manager** **64**, 499–508.
74. Murphy, M. D., O'Mahony, M. J., Upton, J., 2015. Comparison of control systems for the optimisation of ice storage in a dynamic real time electricity pricing environment. **Applied Engineering**, **149**: 392–403.
75. Luo, N., Hong, T., Li, H., Jia, R., Weng, W., 2017. Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings. **Applied Engineering**, **204**: 459–475.
76. Carbonell, D., Philippen, D., Granzotto, M., Haller, M. Y., 2016. Simulation of a solar-ice system for heating applications. System validation with one-year of monitoring data. **Energy and Building**, **127**: 846–858.
77. Wang, S., 2017. Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine. **Applied Thermal Engineering**, **110**: 703–709.
78. Hoseini Rahdar, M., Emamzadeh, A., Ataei, A., 2016. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. **Applied Thermal Engineering**, **96**: 391–399.
79. Fan, Y., Long, W., 2011. Contribution of Ice Storage System to Electricity Sector: Carbon Dioxide Emissions Reduction, 1–4. *Int. Conf. Manag. Serv. Sci*, 2011.

80. Grozdek, M., 2009. Load shifting and storage of cooling energy through ice bank of ice slurry systems-modelling and experimental analysis. **Department of Energy Technology, 8**: 542-550.
81. Borri, E., 2020. Experimental and numerical characterization of sub-zero phase change materials for cold thermal energy storage. **Applied Engineering, 275**: 115131.
82. Tian, S., 2020. Discharging process and performance of a portable cold thermal energy storage panel driven by embedded heat pipes. **Energy, 205**: 117987.
83. Gao, Y., 2020. Thermal performance analysis of sensible and latent heat thermal energy storage tanks: A contrastive experiment. **Journal Building Engineering, 32**: 101713.
84. Rismanchi, B., Saidur, R., Boroumandjazi, G., Ahmed, S., 2012. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. **Renewable Sustainable Energy Reviews, 16**: 5741–5746.
85. Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., 2012. Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications. **Energy and Building, 50**: 347–354.
86. Wang, X., 2019. Performance of a novel cold thermal storage material in an emulated air conditioning system using different storage strategies. **International Journal of Refrigeration, 104**: 259–269.
87. Eskin, N., Türkmen, H., 2008. Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey. **Energy and Building, 40**: 763–773.
88. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (Web sayfası: [https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler\\_istatistik.aspx?m](https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler_istatistik.aspx?m)), (Erişim tarihi: Aralık 2020)
89. EPDK, 2020. ( Web sayfası: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tabloları>), (Erişim tarihi: Aralık 2020)
90. Dincer, I., 2021. Thermodynamics: A Smart Approach. Wiley and Sons, Ltd., Publication, first edition, 667.
91. Cengel, Y. A., Boles, M. A., 2012. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Beşinci baskı, 865.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Merve Bulut

**Uyruğu:** Türkiye (T.C)

**Doğum Tarihi ve Yeri:**

**Medeni Durum:**

**E-mail:**

**Yazışma Adresi:**

### EĞİTİM

| Derece        | Kurum                               | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|-------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | ERÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü        | 2021             |
| Lisans        | ERÜ, Enerji Sistemleri Mühendisliği | 2016             |
| Lise          | Behice Yazgan Kız Lisesi, Kayseri   | 2012             |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl       | Kurum                  | Görev |
|-----------|------------------------|-------|
| 2017-2018 | Journey Mağazacılık    | 1     |
| 2012-2013 | LC Waikiki Mağazacılık | 1     |

### YABANCI DİL

İngilizce

### YAYINLAR

1. Erdemir, D., Bulut, M. (2019). “Bir okul binasında buzda enerji depolama sisteminin soğutma maliyeti üzerindeki etkisinin araştırılması,” *III . International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering*, pp. 123–130.

2. Erdemir, D., Turgut B., Bulut M., Altuntop N. (2019). “Buzda enerji depolama sistemlerinin ekonomik açıdan değerdendirilmesi,” 5. *Enerji Verimliliğı Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, ss.120-128.

