

**T.C.**  
**MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**  
**ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MUNZUR**  
ÜNİVERSİTESİ  
2008

**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ ISITMA MERKEZİ ENERJİ VE EKSERJİ  
ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Taner AYDIN**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK**  
**TUNCELİ – 2018**

**T.C.**  
**MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**  
**ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ ISITMA MERKEZİ ENERJİ VE EKSERJİ**  
**ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Taner AYDIN**  
**(1488000046)**

**Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği**

**DANIŞMAN**  
**Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK**

**TUNCELİ – 2018**

**T.C.**  
**MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**  
**ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ ISITMA MERKEZİ ENERJİ VE EKSERJİ**  
**ANALİZİ**

**Taner AYDIN**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 18/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

**İmza:.....**

**İmza:.....**

**İmza:.....**

Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK  
(Munzur Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk  
CAN (Dicle Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erhan  
FIRAT (Munzur  
Üniversitesi)

**DANIŞMAN**

**ÜYE**

**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Numan YILDIRIM  
Enstitü Müdürü  
İmza ve Mühür

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Dünya birincil enerji tüketiminin artmasına neden olan temel etkenlerin başında nüfus ve gelir artışı gelmektedir. Nüfus artışının gelişmekte olan sanayi ve kentleşmelere bağlı olarak küresel enerji talep artışına önemli miktarda etki edeceği öngörülmektedir. Yapılan senaryolara göre, 2040 yılına kadar olan dönemde fosil yakıtların paylarının nispeten azalmasına rağmen bu yakıtlar hâkim kaynaklar olmaya devam edecektir. Kullanılan temel enerji kaynakları fosil yakıtlar olduğundan önemli çevresel problemlerde ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlar enerji kullanımında verimliliği, ekonomikliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını gündeme getirmektedir. Bu bilgiler ışığında enerjinin verimli kullanılması ön plana çıkmaktadır. Enerjinin en çok tüketildiği yerlerden olan konutlarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin düşüşüne yol açmadan, enerji tüketiminin azaltılması gerekmektedir. Uzun yıllardan beri termal sistemlerin verimlilik analizi ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Termal sistemlerin analizinde termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu kullanılmaktadır. Bu kanunlara dayalı analiz yöntemine ise ekserji adı verilmektedir. Enerji tüketiminin yaklaşık %25'i konutların ısıtılması için harcadığından, ısıtma sistemlerinin enerji ve ekserji analizlerinin yapılması oldukça önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada, üç kazan, on bir eşanjör dairesi bulunan ve yaklaşık olarak yılda 500 ton özel kalorifer yakıtı tüketen Munzur Üniversitesi Isı Merkezinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Çalışmada öncelikli olarak kazandaki yanma olayı incelenmiştir. Yanma olayında hava fazlalık katsayısının (HFK) ve baca gazı sıcaklıklarının enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analiz sonucunda kazan enerji verimi %94 ve kazan ekserji verimi %19,3 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, sistemin otomasyonunda, Hava fazlalık katsayısı ve baca gazı sıcaklıklarındaki iyileştirmelerle yılda yaklaşık olarak %1,5-2 civarında yakıt tasarrufu sağlanacağı tespit edilmiştir. Bu oran, tüm sistemdeki iyileştirmeler göz önüne alındığında (örneğin bina ısı yalıtım kalınlığının Tunceli ili için 7 cm olması gerektiği, çatı yalıtımlarının yapılması, bina mimarilerinin bölgeye uygun olarak projelendirilmesi gibi) çok ciddi ekonomik tasarruflar sağlanmış olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Bölgesel ısıtma, Enerji, Ekserji, Termodinamik.

## ABSTRACT

### **Analysis of The Energy and Exergy in Munzur University Heating System**

Two of the main reasons of the increasing consumption of energy are population and income growth. It is predicted that increasing population is going to effect seriously the increase in demand of energy all around the world. According to committed scenarios, fossil fuels keep continue to remain as a first fuel but it is going to lose power until 2040. Crucial environmental problems come to exist because much-used essential energy sources are fossil fuels. This problems bring debates with itself, such as productivity and economy in usage of energy, and usage of energy sources. In light of this informations, usage of energy productively come into prominence. Consumption of energy must be minimise in the houses without losing of life standarts and service quality. Scientific studies of productivity analysis about thermal systems take an important place. First and second rule of thermodynamic is used in the analysis of the thermal systems. The method of analysis based on that rules is called exergy. Analysis of energy and exergy in heating systems take an important place because nearly %25 percent of energy consumption is used for heating houses.

In this study, Heating system of Munzur University which spend 500 ton special oil fuel and has 3 heating boilers, 11 heat exchangers, is analysed from the point of energy and exegy. Firstly, combustion in the heating boilers are examined in this study. Effects of the excess air coefficient and flue temperature in combustion on energy and exergy efficiency are searched. According to analyse results, heating boilers' energy efficiency is %90 and heating boilers' exergy efficiency is %19.3. As a result, system ecominize nearly %1.5-2 percent fuel in a year if access air coefficient and flue temperatures are enhanced. This rate will be increase if all improvements (such as roof insulation, buildings' thermal insulation for Tunceli should be 7 cm) are done.

**Keywords:** Localized heating, enrgy, exergy, thermodynamics.

## TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmalarım da yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren değerli hocam Sayın Dr. Erdem IŞIK'a,

Çalışmalarım süresince ihtiyaç duyduğum her türlü bilgi, kaynak vb. durumlar için destek olan, gerek kişisel gerekse bilimsel tecrübeleriyle bakış açısı kazandıran değerli hocam Sayın Prof. Dr. Kemal ÇOMAKLI'ya,

Eleştiri ve önerilerinden dolayı tez savunmamda bulunan değerli jüri üyelerine,

Çalışmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm Munzur Üniversitesi Isıtma Merkezi yönetici ve çalışanlarına,

Bu süreçte her türlü desteği gösteren değerli ailem ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

**Taner AYDIN**

**TUNCELİ-2018**

## İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| <b>ABSTRACT</b> .....                                               | III  |
| <b>TEŞEKKÜRLER</b> .....                                            | IV   |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....                                       | VI   |
| <b>TABLolar LİSTESİ</b> .....                                       | VII  |
| <b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....                                      | VIII |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                               | 1    |
| <b>1.2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....                                 | 8    |
| 1.2.1. Termodinamiğin Birinci Kanunu ve Enerji .....                | 8    |
| 1.2.2. Termodinamiğin İkinci Kanunu ve Ekserji .....                | 9    |
| 1.2.3. Entropi .....                                                | 9    |
| 1.2.4. Kontrol Hacmi veya Açık Sistemler .....                      | 10   |
| 1.2.4.1. Kütle, Enerji ve Entropi Dengeleri .....                   | 10   |
| 1.2.4.2. Kararlı Durumda Kütle, Enerji ve Entropi Bağıntıları ..... | 11   |
| 1.2.5. Özellik Bağıntıları .....                                    | 12   |
| 1.2.6. İdeal Gaz Denklemleri .....                                  | 13   |
| 1.2.6.1. İdeal Gazların Entropi Değişimleri .....                   | 14   |
| 1.2.6.2. İdeal Gaz Karışımları.....                                 | 14   |
| 1.2.7. Ekserji .....                                                | 15   |
| 1.2.8. Ekserji Çeşitleri .....                                      | 17   |
| 1.2.8.1. Fiziksel Ekserji .....                                     | 18   |
| 1.2.8.2. Kimyasal Ekserji.....                                      | 18   |
| <b>2. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                                  | 19   |
| 2.1. Bölgesel Isıtma Sistemleri .....                               | 19   |
| 2.2. Kızgın Sulu Bölgesel Isıtma Sistemi .....                      | 19   |
| 2.2.1. Kazanlar.....                                                | 22   |
| 2.2.1.1. Yakıtlar Ve Yanma .....                                    | 22   |
| 2.2.1.2. Yanma Analizi .....                                        | 23   |
| 2.2.1.3. Yanma Gazları Özgül Isıları .....                          | 25   |
| 2.2.1.4. Kazan İçin Enerji ve Ekserji Analizi .....                 | 26   |
| <b>3. BULGULAR</b> .....                                            | 20   |
| <b>4. TARTIŞMA</b> .....                                            | 44   |
| <b>5. SONUÇLAR</b> .....                                            | 448  |
| <b>6. ÖNERİLER</b> .....                                            | 45   |
| <b>7. KAYNAKLAR</b> .....                                           | 46   |
| <b>8. EKLER</b> .....                                               | 53   |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....                                               | 55   |

## SEKİLLER LİSTESİ

## Sayfa No

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. 1. Enerji dönüşüm diyagramı (Hepbaşı, 2001). .....                                      | 2  |
| Şekil 1. 2. 2015 yılı Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı (Kaynak: ETKB).....           | 2  |
| Şekil 1. 3. Sonlu sıcaklık farkında; ekserji, entropi, ısı ve sıcaklık geçişi (Çengel, 2012). 10 |    |
| Şekil 1. 4. Kontrol hacmi. ....                                                                  | 11 |
| Şekil 1. 5. Ekserji çeşitleri.....                                                               | 18 |
| Şekil 2. 1. Kızgın sulu bölgesel ısıtma sistemi şematik hali. ....                               | 20 |
| Şekil 2. 2. Kazanın şematik gösterimi. ....                                                      | 26 |
| Şekil 3. 1. 2016 yılı ısıtma merkezi saatlik sıcaklık analizi. ....                              | 31 |
| Şekil 3. 2. 2016 yılı ısıtma merkezi bir günlük sıcaklık analizi. ....                           | 31 |
| Şekil 3. 3. 2016 yılı ısıtma merkezi bir günlük baca gazı sıcaklık analizi. ....                 | 32 |
| Şekil 4. 1. 2016 yılına ait dış hava sıcaklık ortalamalarının aylara göre değişimi.....          | 44 |
| Şekil 4. 2. 2017 yılına ait dış hava sıcaklık ortalamalarının aylara göre değişimi.....          | 44 |
| Şekil 4. 3. 2017-2018 yılı ısıtma dönemine ait aylık ortalama dış hava sıcaklıkları. ....        | 45 |
| Şekil 4. 4. 2017-2018 yılı ısıtma dönemine ait aylık ortalama yakıt tüketimi. ....               | 45 |
| Şekil 4. 5. Hava fazlalık katsayısına göre ekserji verimi değişimi. ....                         | 46 |
| Şekil 4. 6. Hava fazlalık katsayısına göre enerji verimi değişimi. ....                          | 46 |
| Şekil 4. 7. Baca gazı sıcaklıklarına göre ekserji verimi değişimi.....                           | 47 |
| Şekil 4. 8. Baca gazı sıcaklıklarına göre enerji verimi değişimi .....                           | 47 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1. 1.</b> Ekserji ve enerji kavramlarının kıyaslanması (Özgener ve Hepbaşı, 2003). ..                                                         | 16 |
| <b>Tablo 1. 2.</b> Referans çevre özelliklerine göre maddelerin mol oranları ve buldukları fazlar (T0, P0) (Çomaklı, 2003). .....                      | 17 |
| <b>Tablo 2. 1.</b> Munzur Üniversitesi ısıtma merkezi komponentlerine ait bilgiler:.....                                                               | 21 |
| <b>Tablo 2. 2.</b> Bazı yakıtlar için HFK değerleri (Çomaklı, 2003). .....                                                                             | 23 |
| <b>Tablo 2. 3.</b> Yakıtın kütleli analizi (Çomaklı, 2003). .....                                                                                      | 24 |
| <b>Tablo 2. 4.</b> Bazı maddelerin mol kütleleri (Eyriboyun, 2009). .....                                                                              | 24 |
| <b>Tablo 3. 1.</b> Yanma sonucunda oluşan gazların molar ve kütleli analizi. ....                                                                      | 20 |
| <b>Tablo 3. 2.</b> Hava fazlalık katsayısına göre yanma sonucundaki oksijen ve azot değerleri.                                                         | 29 |
| <b>Tablo 3. 3.</b> Hava fazlalık katsayısına göre duman gazı miktarları.....                                                                           | 30 |
| <b>Tablo 3. 4.</b> Duman gazlarını oluşturan gazların kütleli oranları. ....                                                                           | 30 |
| <b>Tablo 3. 5.</b> Duman gazlarını oluşturan gazların molar oranları. ....                                                                             | 30 |
| <b>Tablo 3. 6.</b> Bazı gazların özgül ısı değerleri (Çengel, 2012). .....                                                                             | 32 |
| <b>Tablo 3. 7.</b> Baca gazlarının molar ve kütleli özgül ısı analizleri. ....                                                                         | 33 |
| <b>Tablo 3. 8.</b> 101 kPa, 150 °C şartları için bazı gazların ısı kapasiteleri (Çomaklı, 2003). ....                                                  | 36 |
| <b>Tablo 3.9.</b> Baca gazı bileşenlerinin molar standart kimyasal ekserjileri (Filiz, 2012). ....                                                     | 36 |
| <b>Tablo 3. 10.</b> Hava fazlalık katsayısına göre yakıt bileşenlerinin kütleli oranları ve baca gazı özgül ısı değerleri. ....                        | 38 |
| <b>Tablo 3. 11.</b> Hava fazlalık katsayısına göre yakıt bileşenlerinin molar oranları. ....                                                           | 39 |
| <b>Tablo 3. 12.</b> 120 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi. ....                                                                            | 39 |
| <b>Tablo 3. 13.</b> 130 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi. ....                                                                            | 39 |
| <b>Tablo 3. 14.</b> 140 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi. ....                                                                            | 40 |
| <b>Tablo 3. 15.</b> 150 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi. ....                                                                            | 40 |
| <b>Tablo 3. 16.</b> Hava fazlalık katsayısına göre kazan enerji verimi. ....                                                                           | 40 |
| <b>Tablo 3. 17.</b> Her Bir Baca Gazının Ekserjetik Isı Kapasitesi ( $C_p^E$ ). .....                                                                  | 41 |
| <b>Tablo 3. 18.</b> 150 °C Sıcaklıktaki baca gazı ekserji değerleri. ....                                                                              | 41 |
| <b>Tablo 3. 19.</b> Baca gazı sıcaklıklarına göre baca gazı ekserji değerleri. ....                                                                    | 41 |
| <b>Tablo 3. 20.</b> Hava fazlalık katsayısına göre kazan ekserji verimi. ....                                                                          | 42 |
| <b>Tablo 3. 21.</b> Baca gazı sıcaklıklarına göre kazan ekserji verimi. ....                                                                           | 42 |
| <b>Tablo 4. 1.</b> Yakıtın kütleli analizi. ....                                                                                                       | 44 |
| <b>Tablo 4. 2.</b> Kızgın sulu bölgesel ısıtma sistemi eşanjör sekonder devresi çıkış suyu sıcaklığının dış hava sıcaklığına göre ayar çizelgesi. .... | 44 |
| <b>Ek Tablo 1. 1.</b> Baca Gazları için $C_p^E$ Değerleri. ....                                                                                        | 53 |
| <b>Ek Tablo 1. 2.</b> Çeşitli gazlar için özgül ısı katsayıları (Çengel ve Boles, 2012). .....                                                         | 53 |
| <b>Ek Tablo 1. 3.</b> Çeşitli malzemelerin yayma katsayıları (Çengel ve Boles, 2012). .....                                                            | 54 |

## SEMBOLLER LİSTESİ

- $A$  : Alan ( $m^2$ )
- $C$  : Isı kapasitesi ( $kJ/kg \cdot K$ )
- $C_p$  : Sabit basınçta ısı kapasitesi ( $kJ/kg \cdot K$ )
- $C_p^E$  : Her bir gazın baca gazı sıcaklığına denk gelen ekserjetik ısı kapasitesi ( $kJ/kg \cdot K$ )
- $C_v$  : Sabit hacimde ısı kapasitesi ( $kJ/kg \cdot K$ )
- $D$  : Çap ( $m$ )
- $E$  : Enerji ( $kJ$ )
- $\dot{E}_y$  : Yakıt enerjisi ( $kJ/yıl$ )
- $\dot{E}_b$  : Baca gazları ile dışarı atılan enerji ( $kJ/yıl$ )
- $\dot{E}_k$  : Kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kaybı ( $kJ/yıl$ )
- $E_x$  : Ekserji ( $kJ$ )
- $\dot{E}_{X,B}$  : Baca gazları ile dışarı atılan ekserji ( $kJ/yıl$ )
- $\dot{E}_{X,K}$  : Kazan yüzeylerinden olan ekserji kayıpları ( $kJ/yıl$ )
- $\dot{E}_{X,Y}$  : Yakıt ekserjisi ( $kJ/yıl$ )
- $(\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG})$  : Suya aktarılan ekserji
- $e$  : Birim enerji ( $kJ/kg$ )
- $u$  : Birim İç enerji ( $kJ/kg$ )
- $e_k$  : Birim kinetik enerji ( $kJ/kg$ )
- $e_p$  : Birim potansiyel enerji ( $kJ/kg$ )
- $\varepsilon$  : Birim ekserji ( $kJ/kg$ ), bazı malzemelerin yayma katsayıları
- $\varepsilon^0$  : Her bir gazın standart kimyasal ekserjisi ( $kJ/kg$ )
- $h$  : Entalpi ( $kJ/kg$ ), ısı taşınım katsayısı ( $W/m^2 \cdot K$ )
- $H_u$  : Yakıt alt ısı değeri ( $kJ/kg$ )
- $I$  : Tersinmezlik ( $kJ$ )
- $M$  : Mol Kütlesi ( $kg/kmol$ )
- $\dot{m}$  : Kütlesel debi ( $kg/sa$ )
- $\dot{m}_s$  : Suyun kütlesel debisi ( $kg/yıl$ )

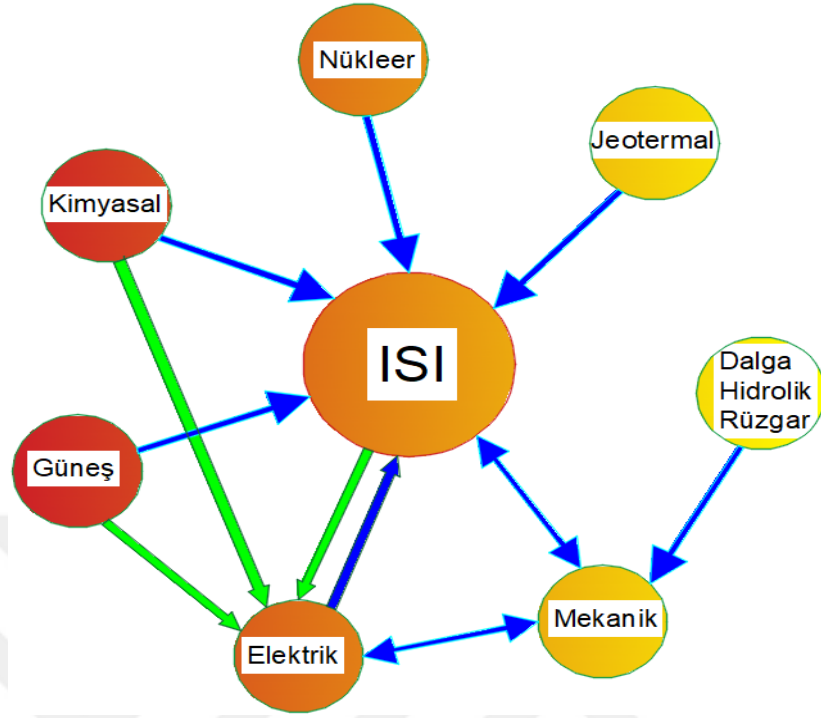
- $\dot{m}_y$  : Yakıtın kütleli debisi ( $kg/yıl$ )  
 $n$  : Mol miktarı ( $kmol$ )  
 $P$  : Basınç ( $kPa$ )  
 $P_0$  : Çevre basıncı ( $kPa$ )  
 $Q$  : Isı ( $W$ )  
 $\dot{Q}_K$  : Kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kayıpları ( $kJ/yıl$ )  
 $R$  : Gaz sabiti ( $kJ/kg \cdot K$ )  
 $\check{R}$  : Evrensel gaz sabiti ( $kJ/kmol \cdot K$ )  
 $S$  : Entropi ( $kJ/kg \cdot K$ )  
 $T$  : Sıcaklık ( $K$ )  
 $T_0$  : Çevre sıcaklığı ( $K$ )  
 $T_{sç}$  : Su çıkış sıcaklığı ( $K$ )  
 $T_{sg}$  : Su giriş sıcaklığı ( $K$ )  
 $T_y$  : Yüzey sıcaklığı ( $K$ )  
 $V_{DF}$  : Hacimsel duman gazı miktarı ( $kmol$ )  
 $V_{KDF}$  : Kütleli duman gazı miktarı ( $kg$ )  
 $X$  : Gazların hacimsel oranları  
 $\lambda$  : Hava fazlalık katsayısı  
 $\eta_w, \Psi$  : Ekserji verimi (%)  
 $\eta_l$  : Enerji verimi (%)  
 $\sigma$  : Stefan- Boltzmann sabiti ( $W/m^2 \cdot K^4$ )  
 $\phi$  : Yakıt ekserjisinin alt ısı değere oranı  
 $\Delta \dot{E}_s$  : Kazandan suya aktarılan enerji ( $kJ$ )  
 $\dot{I}_T$  : Kazanda oluşan toplam tersinmezlikler ( $kJ/yıl$ )

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunda meydana gelen artış, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak enerji ihtiyacında her geçen gün artış gözlenmektedir. Klasik ısıtma sistemlerinin tamamına yakını enerjilerini fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Bu durum hem kaynak, hem de çevre sorunlarını gündeme getirmektedir. İnsanların çağdaş yaşam koşullarında yaşamlarını sürdürmesi enerji ihtiyaçlarının karşılanması ile mümkündür. Bu ihtiyaçların karşılanması yaşam kalitesi açısından önemli bir parametredir. Enerji kaynaklarının sınırlı bir yapıya sahip olması bilim insanlarını enerjinin daha verimli kullanılmasını araştırmaya ve yöneticilerin enerji politikalarını güncellemeye sevk etmiştir.

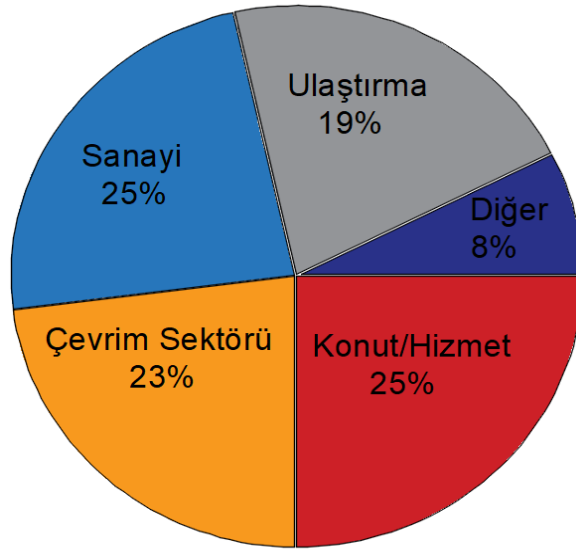
Enerji tasarrufu, sistemlerde enerjinin etkin kullanımı ile verim artışını sağlamaktır. Bu da savurganlığı engelleyeceği gibi ekonomik kalkınmaya katkı sağlayacak önemli bir unsurdur. Enerji tasarrufu ekonomik kalkınma ve yaşam koşullarından ödün vererek enerjinin az kullanılması demek değildir. Enerji tasarrufu enerji üretiminin ve tüketiminin en üst düzey bir verimle gerçekleştirilmesi, enerji kayıplarının en düşük seviyeye indirilmesi, ekonomik gelişmeyi ve yaşam kalitesini düşürmeden enerji arz ve talebini kontrol altına almaktır (Çomaklı, 2003).

Enerjinin verimli ve maliyet açısından etkin kullanımı, enerjinin bir şekilden diğer şekillerine dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi ile başlamaktadır. Bu enerji dönüşümünün etkilenebildiği olası farklı yollar, şekil 1.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde yeşil renkte gösterilen hatlar, gelişmenin bugünkü durumunda büyük bir ölçekte fizibil olan, ancak ekonomik açıdan değerli olmayan (ranta bıl) enerji değişim yollarını göstermektedir (Hepbaşı, 2001).



Şekil 1. 1. Enerji dönüşüm diyagramı (Hepbaşı, 2001).

Türkiye birincil enerji talebinin sektörlere göre dağılımını incelendiğinde; tüketimin %23'ü çevrim sektöründe (elektrik üretiminde), %25'i konut ve hizmet sektöründe, %25'i sanayide ve %19'u ulaştırma sektöründe kullanılmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1. 2. 2015 yılı Türkiye enerji tüketiminin sektörel dağılımı (Kaynak: ETKB).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2017 yılı verileri doğrultusunda enerjinin yaklaşık dörtte biri konut sektöründe gerçekleşmektedir.

Konutlarda, enerji tüketiminin %85'i ısıtma ve sıcak su temininde kullanılmaktadır (Çomaklı, 2003). Bu veriler ışığında konut ısıtması ve konut sıcak su ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılan enerjinin toplam tüketim içindeki payı dikkate alındığında, bu alanda enerjinin etkin ve verimli kullanımı yolunda yapılacak çalışmalar sonucunda elde edilecek ekonomik kazancın büyüklüğü açıkça görülmektedir.

Enerji analizi, bir sisteme giren enerjinin nasıl dağıldığını görmek için termodinamiğin birinci kanununa göre yapılan analizdir. Bu analize göre, sisteme giren 100 birimlik enerjinin hangi amaçlarla kullanıldığı hesaplanarak sistemin verimli çalışıp çalışmadığı hakkında bir yorum yapma olanağı sağlamaktadır. Enerji analizi sonuçlarına bakılarak sistemin hangi noktalarında iyileştirmeler yapılabileceği hakkında yorum yapılabilir (Karakoç ve ark., 2012).

Ekserji, bir enerji türünün (örneğin elektrik, ısıtma, soğutma enerjisi) iş yapabilme veya farklı işlerde kullanılabilme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Örneğin, bir binadaki ısıtma kazanında enerji verimliliği yüzde 90'ın üzerinde olabilirken, ekserji verimliliği yalnızca yüzde 8 civarında bulunmaktadır. Bu durum, bina sistemlerindeki iyileştirme potansiyelinin nerelerde olduğunu göstermektedir. Aynı şey topluma yönelik mevcut enerji temin ve dağıtım sistemi için de geçerlidir. Buradaki potansiyelin anlaşılması, fosil tabanlı ve büyük miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu yayan mevcut enerji sistemlerinin, yenilenebilir enerji sistemlerine geçişine yardımcı olacaktır. Bunun için yeni ve ekonomik sistemlerin geliştirilmesi ve enerjinin üretiminden nihai kullanımına kadar yüksek verimle dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun sonucu öncelikle ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma vb. için kullanılan enerji azaltılabilir. Yenilenebilir enerji teknolojileri, ısı pompaları, kojenerasyon sistemleri, termal olarak aktive edilmiş bina ekipmanları, yüksek sıcaklıklı soğutma ve düşük sıcaklıklı ısıtma teknolojileri, termal depolama, atık ısının kullanımı bunun için yararlanılması gereken sistemlerdir (Çakmanus, 2011).

Enerji, genellikle iş yada iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Oysa, bunun yerine, enerji; hareket yada hareket üretebilme kabiliyeti olarak tanımlanmalıdır. Bunun yanı sıra, ekserji; iş ya da iş yapabilme kabiliyeti olmaktadır. Enerji, bir proseste daima korunabilirken, ekserji ise daima tersinir proseslerde korunabilmekte, gerçek proseslerde ise, tersinmezlikler nedeniyle tüketilmektedir. Ekserji analizi, bir sistemin enerji analizinden farklıdır. Ekserji analizinin sonuçları, genellikle, bir sistemdeki proseslerin daha

fazla anlamlı ve duyarlı gösterilmesini sağlamak için göz önüne alınmaktadır (Özgener ve Ark., 2003).

İnsanlık sadece sınırlı kaynak potansiyeli olan dünyada yeni enerji kaynak arayışları ile yetinmemiş aynı zamanda artan enerji savurganlığının önüne geçmek için sistemlerin ekonomik koşullarda işletilmesini en önemli hedef olarak belirlemiştir. Bu olgu yeni dizayn edilecek tüm sistemlerin ekserjetik verim açısından irdelenmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle bir sistemin en ekonomik koşullarda işletilip işletilmediğinin ölçütü o sistemin ekserjetik veriminin belirlenmesinde yatmaktadır (Çomaklı ve ark., 2007).

Ekserji, kullanılabilir maksimum enerji olarak tanımlanmaktadır. Termodinamiğin birinci kanununa göre yapılan enerji analizi kullanılabilir maksimum enerji miktarını görmek için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle herhangi bir sistemde kullanılabilir maksimum enerjiyi görmek açısından, termodinamiğin ikinci yasasına dayalı ekserji analizinin yapılması zorunludur. Böylece sistemin, verilen enerjiye göre ne kadar verimli olduğunun yanı sıra, sistemden daha fazla ne kadar iş elde edilebileceği görülür. Bu sayede sistemde iyileştirmeler yapmak mümkün olabilir (Karataş ve ark., 2012).

Ergün (2010), yaptığı çalışmada, yaklaşık 3 yıl süren deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Ankara'da ki 80.000 m<sup>2</sup>'lik ısıtma soğutma ihtiyacı olan bir alışveriş merkezinin enerji (termodinamiğin 1. kanunu) ve ekserji (termodinamiğin 2. kanunu) analizleri yapılmıştır. Isıtma sistemi için yapılan enerji analizlerinde en düşük verimin eşanjörde, en yüksek verimin ise kazanda; ekserji analizlerinde ise en düşük verimin kazanda, en yüksek verimin ise eşanjörde olduğu tespit edilmiştir.

Çomaklı ve ark. (2006), yaptıkları çalışmada, bölgesel ısıtma sisteminin kullanıldığı Atatürk Üniversitesi kampüsünde, boru dağıtım hatlarında meydana gelen enerji ve ekserji kayıplarını hesaplamışlardır. Buna göre, kızgın suyun aktarıldığı boru kanallarındaki ısı kayıplarının fazla miktarda yakıt tüketimine sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan hesaplamalara göre, bir yılda yaklaşık olarak 780 ton yakıt, boru kanallarındaki ısı kayıplarına harcanmaktadır. Sistemin yılda 10 bin ton yakıt harcadığı dikkate alındığında sistemdeki hat kayıpları %7,8 olarak hesaplanmıştır. Borulardaki mevcut yalıtım kalınlığı 12 cm arttırılması durumunda bu kayıplarda yaklaşık %25 oranında (180 ton) bir azalma sağlamanın mümkün olacağını ortaya çıkarmışlardır.

Atatürk Üniversitesi Kampüsünde bulunan ve yılda yaklaşık 330 kWh/m<sup>2</sup> ısıtma enerjisine ihtiyaç duyulan lojman binalarının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Dış duvarları yalıtımsız olan lojman binalarının, başta dış duvar ısı yalıtımı olmak üzere önemli

bazı ısı rehabilitasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu sayede meydana gelen ısı kayıpları %81 oranında azalmıştır. Yapılan iyileştirmeler sonucunda eski duruma göre %51,3 daha az ısı kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, binaların dış duvarlarından olan ekserji kayıpları da hesaplanmış ve dış duvarlarda %94 oranında daha az ekserji kaybı olduğu görülmüştür (Akyol, 2006).

Konya Merkez Bilişim Meslek Lisesi'nin ısıtma sisteminin ekserji, enerji ve ekonomik analizi yapılmıştır. Binanın her odası için ısıtma gereksinimi, ısı kaybı hesaplanarak bulunmuştur. Isıtma gereksinimini karşılayacak radyatör boyları seçilmiştir. Ekserji analizi için sistem üç bölüme ayrılmıştır: Isı üretici, radyatörler ve odalar. Enerji kullanımı, ekserji tüketimi, sistemin ilk yatırım ve yıllık işletme maliyetine olan etkilerini görmek amacıyla en düşük dış hava sıcaklığı, yapı bileşenlerinin ısı yalıtımı, yakıt türü, sıcak su rejimi ve ısı üreticinin türüne (kazan, ısı pompası, kojenerasyon ile ısı pompası) göre kıyaslamalar yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, en yüksek ısı kaybı infiltrasyondan dolaydır. Fakat bu değer taze hava ihtiyacı nedeniyle düşürülmemelidir. En düşük enerji kullanımı, ekserji tüketimi ve yıllık işletme maliyeti, kojenerasyon ünitesinin ısı pompası ile kullanılması ile elde edilir. Fakat yüksek sermaye maliyeti nedeniyle uzun bir geri ödeme süresine sahiptir (45,3 yıl). En kısa geri ödeme süresi (3,2 yıl) pencerelerin kalitesinin 12 mm hava boşluklu 4 mm'lik çift cama yükseltilmesi durumunda hesaplanmıştır (Dilek, 2007).

Rosen ve Dinçer (2001), yaptıkları çalışmada ekserjinin, bir maddenin veya enerji formunun yararlılığını veya kalitesinin ya da potansiyelinin belirlenmesinde bir ölçü olduğunu belirtmişlerdir. Bilim adamlarının veya mühendislerin ekserjiyi kullanarak enerji sistemlerinin verimlerini, çevresel etkileri ve sistemin sürdürülebilirliğini daha net anlayabileceklerini ortaya koymuşlardır. Geçen 10 yıl içinde enerji ve ekserji ilişkisinin, sürdürülebilir gelişmenin ve çevresel etkilerin hızla önem kazandığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, ekserjinin potansiyelin belirlenmesinde etkili bir ölçüm olduğunu savunmuşlardır.

Enerji verimliliği ve ekonomikliği açısından ısıtma sisteminin türü ve özellikleri incelendiğinde, ısıtma sistemleri içerisinde bölgesel ısıtma, enerji kaynaklarının verimli kullanılmasının yanı sıra ısı ihtiyacının da düzenli, yeterli ve diğer yöntemlere göre genellikle daha ucuza karşılanması açısından önem kazanmaktadır.

Isıtma sistemleri üç ana grupta toplanmaktadır (Çomaklı, 2003).

1. Lokal Isıtma: Isı, ısıtılacak hacim içerisinde üretilir ve tüketilir (şömine, soba, elektrikli ısıtıcılar, kombi, ısı pompaları vb.).

2. Merkezi Isıtma: Isı bir merkezde üretilir ve taşıyıcı akışkan kullanılarak ısıtılacak mahaldeki ısıtıcılara gönderilir (bir veya birkaç hacim ve/veya binanın bir merkezden ısıtılması, ısı pompaları).
3. Bölgesel Isıtma: Belirli bir bölgedeki binaların, küçük bir kentin tamamının veya büyük bir kentin bir kısmının bir merkezde üretilen ısı tarafından ısıtılması şeklindedir ( üniversite kampüsü vb.).

Bölgesel ısıtma sisteminde sınıflandırma şu şekilde yapılır:

- a. Akışkan sıcaklığına göre;
  - Sıcak sulu ısıtma sistemleri
  - Kızgın sulu ısıtma sistemleri
  - Buharlı ısıtma sistemleri
- b. Isı taşıyıcı akışkanın ve boru şebekesinin binalara bağlanma şekline göre;
  - Direkt sistem: Akışkan olarak kazandan çıkan sıcak su doğrudan radyatörlere verilir.
  - Endirekt sistem: Kızgın su ve sıcak su devresi olmak üzere iki ayrı devreden oluşur. Birinci devrede kazanda üretilen kızgın su, ikinci devrede ise sıcak su dolaşır. Hacimlerdeki radyatörlere ise ikinci devredeki sıcak su iletilir.
- c. Isı merkezinin türüne göre;
  - Sadece ısıtma amaçlı ısı üretimine dayalı ısıtma
  - Bileşik ısı güç santralli bölgesel ısıtma

Yaygın olarak kullanılan bölgesel ısıtma sistemi, kızgın sulu ısıtmadır. Kızgın sulu ısıtma sistemlerinde sistemde dolaşan akışkanın ortalama sıcaklığı 140-150 °C aralığındadır. Bu sistemler, ısı merkezinde bulunan kazanlar, ısı iletim hatları, eşanjörler ve radyatörler olmak üzere dört ana kısımdan oluşur. Bu kısımlardaki enerji kullanımı ve tasarrufu sistemin verimliliği ve ekonomikliği açısından oldukça önemlidir.

Tüketilen enerjinin büyüklüğü nedeniyle ısıtma sisteminin en önemli elemanı kazanlardır. Enerji tasarrufu için öncelikli olarak üzerinde çalışılması gereken kazanlar, yapılabilecek iyileştirmeler ile enerjinin daha verimli ve ekonomik kullanılmasını sağlayacaktır.

Kazanlardaki enerji verimliliği, kullanılan yakıtın cinsine ve yanma koşullarına bağlıdır. Özellikle sıvı ve gaz yakıtlı kazanlarda kullanılan otomasyon sistemlerinden dolayı,

bu kazanların katı yakıtlı kazanlara göre işletme verimlerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Isıtma amaçlı kullanılan, sıvı yakıt yakan bir kazanda otomatik kontrol sistemi kullanılarak (radyatör gidiş dönüş sıcaklıklarını sabitleyerek) yakıttan %8 civarında bir tasarruf sağlanacağı belirlenmiştir (Çomaklı, 2003).

Isıtma merkezlerinde kullanılan kazanlarda enerji tasarrufu ile ilgili yapılan çalışmalarda, ısı verimlerin yaklaşık olarak kömürlü kazanlarda %60-65, fuel-oil yakan kazanlarda ise bu oranın yaklaşık olarak %70-75 civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu verimlerin bazı basit ve ekonomik yöntemlerle %10-15 artırılacağı ortaya çıkmıştır.

Kazanlarda ısı oluşumu yakıtların oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu meydana gelir. Diğer bir ifadeyle, yakıttaki bileşenler, havada bulunan oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu yanma meydana gelir. Yakıt ile havanın yeterli oranlarda karışmaması sonucu ise eksik yanma meydana gelmektedir. Eksik yanma olması durumunda yakıt içindeki bileşenlerin bir kısmı yanmaya uğramadan bacadan atılmaktadır. Bu durum kazan verimini olumsuz etkilemektedir. Eksik yanmayı önlemek için yanma için gerekli hava miktarından bir miktar fazla hava gönderilir. Bu durumda ise yanmanın oluşumuna etki etmeyen fazla hava ısıtılarak baca gazları ile beraber atmosfere atılır. Kazan verimini etkileyen bu durum, kazan için verilen minimum hava fazlalık katsayısı ile aşılmaktadır.

Bölgesel ısıtma, başta hava kirliliğinin kontrolü olmak üzere çeşitli yakıtların kullanılabilmesi, yangın tehlikesinin yerleşim yerlerinden uzak olması, enerjinin daha verimli kullanılması gibi avantajlara sahiptir.

Fosil yakıtların yakılması ile SO<sub>2</sub> ve diğer zararlı gazlar atmosfere bırakılmaktadır. Özellikle tam yanmanın sağlanamadığı lokal tip yakıcılarda atmosfere bırakılan zararlı gaz ve atıkların miktarı oldukça yüksektir. Bölge ısıtmasında verimi yüksek kazanlar kullanıldığından ve baca gazlarının filtre edilebilmesinden zararlı emisyonlar minimum değerlere indirilmiş olur.

Lokal ve merkezi ısıtma sistemlerinde, ısı değeri yüksek ve temiz yakıtları kullanılmasına daha çok ihtiyaç duyulduğundan, bu yakıtların maliyetlerinin yüksek olması, ithal edilmeleri ve düşük verimle çalışan kazanlarda yakılması durumu işletme giderlerini artırmaktadır.

Bölge ısıtmasında yanma, tek merkezden ve büyük kazanlarda yapıldığından ve otomatik kontrol sistemlerinin kullanılmasından dolayı yüksek verim elde edilmektedir.

Ayrıca çeşitli ve ucuz yakıtlarla işletilebilir olması verimi ve maliyeti olumlu yönde etkilemektedir.

Bölge ısıtmasında, yakıtın ve yanma sonucu oluşan atık maddenin (kül) taşıma maliyetleri diğer ısıtma şekillerine göre daha uygundur. Bölgesel ısıtma ile ilgili yapılan bir çalışmada üç yüz bin nüfuslu bir şehirde bölgesel ısıtma yapılması durumunda yakıt ve kül taşıma maliyetlerinde diğer ısıtma sistemlerine göre %10 tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir (Çomaklı, 2003).

## 1.2. KURAMSAL TEMELLER

### 1.2.1. Termodinamiğin Birinci Kanunu ve Enerji

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin korunumunu ifade eder. Deneysel gözlemlere dayanarak, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini ifade eder. Bu nedenle bir hal değişimi sırasında enerjinin her zerresi hesaplanmalıdır.

Enerji çevrede değişiklik yapma yeteneğidir ve ısı, mekanik, kinetik, potansiyel, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi çeşitli türlerde olabilir. Sistemde toplam enerji, belirtilen enerjilerin var olanlarının toplamına eşittir. Bir sistemde toplam enerji termodinamikte aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir.

$$E = U + E_k + E_p \quad (1.1)$$

veya birim kütle için;

$$e = u + e_k + e_p \quad (1.2)$$

Kinetik enerji, sistemin hareketinden dolayı sahip olduğu enerjidir ve

$$e_k = \frac{v^2}{2} \quad (1.3)$$

şeklinde hesaplanır. Potansiyel enerji ise sistemin bir yerçekimi alanındaki yüksekliğe bağlı olarak sahip olduğu enerjidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$e_p = gz \quad (1.4)$$

### 1.2.2. Termodinamiğin İkinci Kanunu ve Ekserji

Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin miktarı üzerinde durarak enerjinin hal değişimleri sırasında dönüşümlerin sayısal değerlerle ifade edilmesini sağlar. Farklı türden enerji kaynaklarının nitelikleri ile ilgili ayırım yapmaz. Termodinamiğin ikinci kanunu ise birinci kanunun yanı sıra enerjinin niteliğini de ön plana çıkarır. Doğallığında ikinci kanun, bir enerji kaynağının maksimum iş yapma potansiyeli üzerinde durur. Sistemde entropi üretimi enerjinin niteliğinde azalmaya sebep olur. Bu bakımdan araştırmacılar bir sistemin değerlendirilmesinde, termodinamiğin birinci kanunu ile ikinci kanunu düşünülerek analiz edilmesi gerektiğini söylemişlerdir (Çengel ve ark., 2012).

### 1.2.3. Entropi

Enerji dönüşümü sürecinde ortaya çıkan düzensizlikler, entropi kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu kavram ilk kez Clausius tarafından kullanılmıştır.

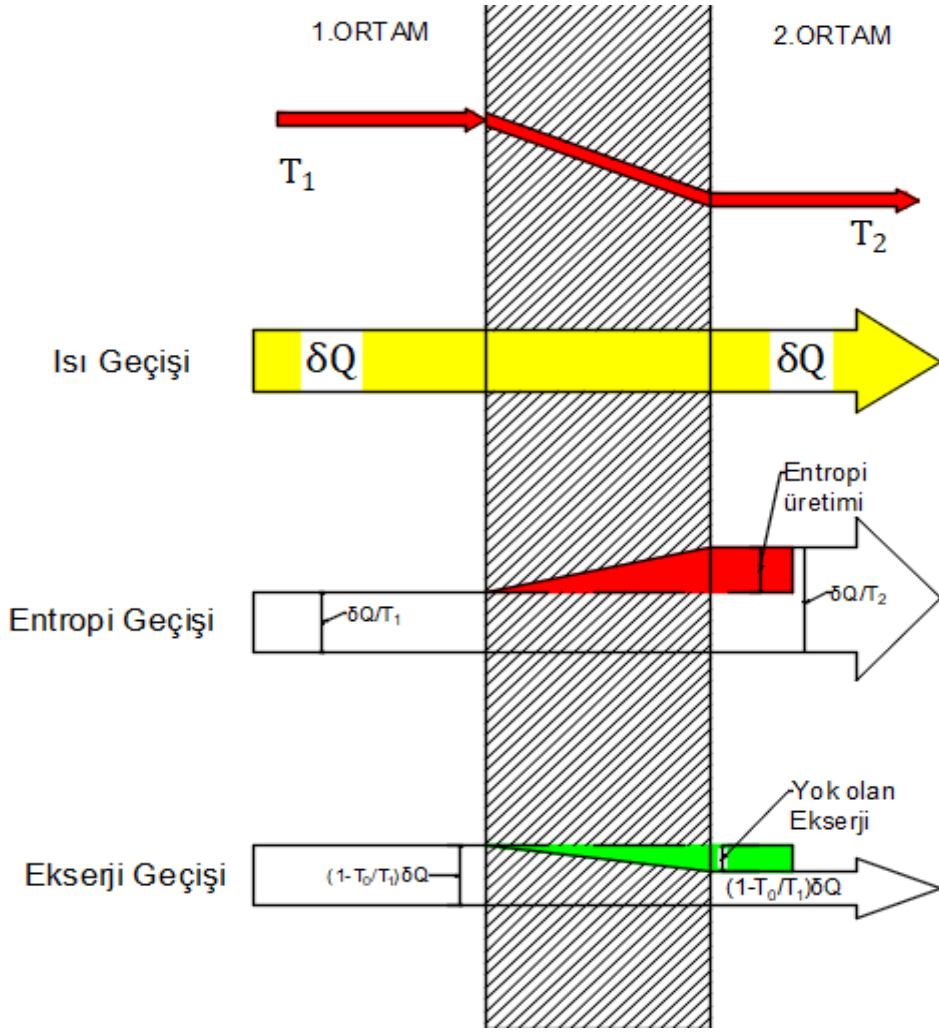
$$dS \geq \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{ter} \quad ; \quad dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{ter} \quad (1.5)$$

Bu ilişki çevredeki entropi artışının ısı enerjisi ile doğru orantılı olduğunu ifade etmektedir. Termodinamiğin ikinci yasasına göre, gerçek enerji dönüşüm süreçlerinde toplam entropi sürekli artar. Entropi sıcaklık, basınç vb. fiziksel büyüklükler gibi ölçülemez. Sistemlerdeki entropi değişim miktarı hesaplanarak bulunur. Entropi ancak ısı denge durumunda sabit kalır.

En genel halde kapalı bir sistem için entropi değişimi;

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right) + S_{\dot{u}} \quad (1.6)$$

bağıntısı ile verilir.



Şekil 1. 3. Sonlu sıcaklık farkında; ekserji, entropi, ısı ve sıcaklık geçişi (Çengel, 2012).

#### 1.2.4. Kontrol Hacmi veya Açık Sistemler

Mühendislik uygulamalarının birçoğunda sisteme kütle girişi ve çıkışı vardır. Bu nedenle kontrol hacmi tanımına gerek duyulmuştur. Kontrol hacminde kütle, enerji ve entropi büyük bir rol oynar.

##### 1.2.4.1. Kütle, Enerji ve Entropi Dengeleri

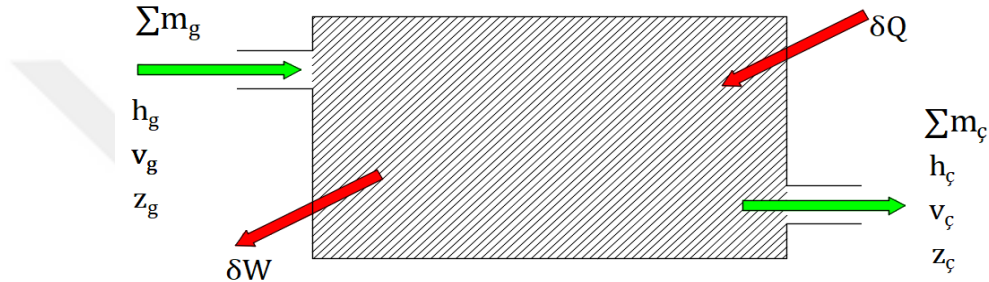
**Kütlenin Korunumu:** Doğanın en temel ilkelerindendir. Kütle de enerji gibi yok olmaz ve süreçler sırasında korunur. Kontrol hacmi için kütlenin korunumu ilkesi aşağıda ifade edilmiştir.

$$dm/dt = \sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç \quad (1.7)$$

Kütlenin korunumuna ait denklem akışkanlar mekaniğinde genellikle süreklilik denklemi olarak adlandırılır. Bir kesitten birim zamanda akan kütle miktarına kütleli debi olarak ifade edilir.

**Kontrol Hacmi Enerji Dengesi:** Şekildeki kontrol hacmi için enerjinin korunumundan hareketle enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{dE_{kh}}{dt} = Q - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \left( h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left( h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) \quad (1.8)$$



Şekil 1. 4. Kontrol hacmi (Çomaklı, 2003).

**Kontrol Hacmi Entropi Dengesi:** Entropi enerji dengesine benzer şekilde kontrol hacmi giriş ve çıkışı için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{dS_{kh}}{dt} = \sum \dot{m}_g s_g - \sum \dot{m}_\zeta s_\zeta + \sum \frac{Q}{T} + \dot{S}_u \quad (1.9)$$

Burada eşitliğin sol tarafındaki denklem kontrol hacmindeki entropi değişimini, eşitliğin sağ tarafındaki birinci, ikinci ve üçüncü terimler entropi transferini; dördüncü terim ise kontrol hacmi içerisindeki tersinmezliklerden dolayı oluşan entropi üretimini göstermektedir.

#### 1.2.4.2. Kararlı Durumda Kütle, Enerji ve Entropi Bağlıları

Yukarıda yazılan bağıntılar, özelliklerin zamanla değiştiği durumlar için geçerlidir. Ancak özelliklerin zamana göre değişmemesi durumunda kontrol hacimleri için aşağıdaki bağıntılar geçerlidir.

Kütle dengesi:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1.10)$$

Enerji dengesi:

$$Q_{kh} - \dot{W}_{kh} = \sum_ç \dot{m}_ç \left( h_ç + \frac{v_ç^2}{2} + gz_ç \right) - \sum_g \dot{m}_g \left( h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (1.11)$$

Entropi dengesi:

$$\dot{S}_ü = \sum_ç \dot{m}_ç s_ç - \sum_g \dot{m}_g s_g - \sum_j \frac{Q_j}{T_j} \quad (1.12)$$

### 1.2.5. Özellik Bağlılıları

T.ds eşitlikleri: Entropi, iç enerji ve entalpi arasındaki bağıntılara denir. Sıkıştırılabilir basit bir sistemde birim kütle için Gibbs denklemi şöyle yazılır;

$$Tds = du + Pdv \quad (1.13)$$

Ayrıca entalpi tanımından yola çıkarak ( $h = u + Pv$ )  $du$  yerine entalpi cinsinde değeri yazarsak;

$$h = u + Pv \quad (1.14)$$

$$dh = du + Pdv + vdP \quad (1.15)$$

$$Tds = dh - vdP \quad (1.16)$$

denklemi elde edilir. Burada denklemler düzenlenerek entropiye ait diferansiyel değişim bulunmuş olur

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} \quad (1.17)$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T} \quad (1.18)$$

Buradan yola çıkarak bir hal değişimi durumunda entropideki değişim yukarıdaki bağıntıların herhangi birinin integrasyonu ile bulunabilir. Burada maddenin hal denklemi ve  $dh$  ile  $du$ 'nun sıcaklık ile bağlantılı olarak değişimi bilinmelidir.

**Özgül ısılar:** Termodinamik biliminde yaygın olarak iki özgül ısı kullanılır. Sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısılar sırasıyla  $c_v$  ve  $c_p$  ile gösterilerek  $u(T, v)$  ve  $h(T, p)$ 'nin kısmi türevlerinin fonksiyonlarıdır.

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad (1.19)$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \quad (1.20)$$

**Katıların ve sıvıların entropi değişimleri:** Katı ve sıvı maddeler, bir hal değişimi sırasında hacimleri neredeyse değişmediğinden sıkıştırılmaz madde olarak kabul edilirler ve katı, sıvı maddeler için  $dv = 0$  alınabilir. Ayrıca sıkıştırılmaz maddeler için  $c_p = c_v = c$  olduğu dikkate alınırsa yukarıdaki denklemlerden hareketle katı ve sıvılar için entropi değişimi aşağıdaki ifadeden bulunabilir.

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{cdT}{T} \quad (1.21)$$

Bu denklemin integrasyonu ile hal değişimi sonunda entropi değişimi hesaplanmış olur.

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T) \frac{dT}{T} \quad (1.22)$$

Bu denklemden anlaşılacağı üzere katı ve sıvıların entropi değişimleri sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu bağıntı kullanılarak katı ve sıvı maddeler için entropi değişimi hatasız bir şekilde hesaplanabilir (Çengel ve ark, 2008).

### 1.2.6. İdeal Gaz Denklemleri

Gaz molekülleri arasındaki uzaklığın, moleküllerin çapına oranla çok büyük olduğu ve bu sebeple aralarında karşılıklı olarak bir çekim kuvvetinin olmadığı gazlara ideal gaz adı verilir. Çok küçük basınç değerlerinin olması veya bu değerlerin sıfıra yakın olması bütün gazları ideal gaz formunda incelenmesini sağlar (Çomaklı 2003).

Maddenin sıcaklığı, özgül hacmi ve basıncı arasındaki bağıntılar hal denklemlerini ifade etmektedir. İdeal gazlar için hal denklemleri şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Pv = RT \quad (1.23)$$

$$\bar{R} = \frac{\dot{R}}{M} \quad (1.24)$$

Burada  $\bar{R} = 8.314 \text{ kJ/kmolK}$  universal gaz sabitidir.  $M$  ise ideal gazın mol ağırlığının ifadesidir. Entalpi ve ideal gazın hal denklemi kullanılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$h = u + Pv \quad (1.25)$$

$$h = u + R \quad (1.26)$$

Burada  $u = u(T)$  olduğundan, ideal gazın entalpisi yalnızca sıcaklığa ait bir fonksiyondur.

### 1.2.6.1. İdeal Gazların Entropi Değişimleri

Bir hal değişimi sırasında ideal gazların entropi değişimleri aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir.

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1.27)$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_p(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1.28)$$

### 1.2.6.2. İdeal Gaz Karışımları

Yanma sistemlerinin çözümlenmesi durumunda gaz karışımlarının özelliklerinin belirlenmiş olması büyük öneme sahiptir. Bir gaz karışımında, karışımın özelliği genel olarak karışımı oluşturan her bileşenin ayrı ayrı özelliklerinin bilinmesi ile hesaplanır.

Gaz karışımlarının iç enerji, entropi, entalpi ve özgül ısıları kütlesele ve molar olarak aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır (Çengel ve ark., 2008):

$$u = \sum_{i=1}^N y_i u_i \text{ (kJ/kg)} \quad (1.29)$$

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{u}_i \text{ (kJ/kmol)} \quad (1.30)$$

$$s = \sum_{i=1}^N y_i s_i \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)} \quad (1.31)$$

$$\bar{s} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{s}_i \text{ (kJ/kmol} \cdot \text{K)} \quad (1.32)$$

$$h = \sum_{i=1}^N y_i h_i \text{ (kJ/kg)} \quad (1.33)$$

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{h}_i \text{ (kJ/kmol)} \quad (1.34)$$

$$C_v = \sum_{i=1}^N y_i C_{v,i} \text{ (kj/kg} \cdot \text{°C)} \quad (1.35)$$

$$\bar{C}_v = \sum_{i=1}^N y_i \bar{C}_{v,i} \text{ (kj/kmol} \cdot \text{°C)} \quad (1.36)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N y_i C_{p,i} \text{ (kj/kg} \cdot \text{°C)} \quad (1.37)$$

$$\bar{C}_p = \sum_{i=1}^N x_i \bar{C}_{p,i} \text{ (kj/kmol} \cdot \text{°C)} \quad (1.38)$$

### 1.2.7. Ekserji

Enerji, genel bir ifade olarak iş ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Ancak bu tanımı daha özel bir hale getirecek olursak enerjinin, hareket ya da hareket üretme yeteneği olarak tanımlanması daha doğru olacaktır. Bunun yanında, ekserji, iş ya da iş yapabilme yeteneği olmalıdır. Enerji bir sistemde her zaman korunmakta iken ekserji ise daima tersinir sistemlerde korunmaktadır.

Enerjinin faydalı olan kısmı yani kullanılabilen kısmını ekserji oluşturmaktadır. Enerjinin kullanılmayan kısmına ise anerji denir. Buna göre;

Enerji = Ekserji + Anerji bağıntısı ortaya çıkar. Bu tanımlardan yola çıkarak termodinamiğin birinci ve ikinci yasası şu şekilde, basit olarak ifade edilebilir. Birinci yasa;

- Termodinamiğin bütün süreçlerinde ekserji ve anerjinin toplamı değişmez, sabit kalır.

İkinci yasa ise;

- Ekserji, tersinir süreçlerde sabit kalır.
- Anerji, ekserjiye dönüşmez.
- Tersinmez olan süreçlerde ekserjinin tamamı ya da bir kısmı anerjiye dönüşür.

şeklinde açıklanabilir (Çomaklı, 2003).

Enerji verimliliği açısından enerji, yaşamı konforlu hale getiren paradır. Kısaca, enerjinin para, ya da nakit para olarak tanımlanması önerilebilir. Ekserji; enerji, çevre ve sürdürülebilir gelişmenin bir karışımı olarak ortaya çıkar. Termodinamik bakış açısına göre ekserji, referans çevre ile denge haline gelirken, bir sistem veya enerji akışıyla üretilebilecek en üst düzeyde iş olarak tanımlanabilir. Enerjiden farklı olarak, ekserji; korunum kanununa uğramaz (tersinmez veya ideal sistemler hariç olmak üzere). Ekserji genelde, gerçek sistemlerdeki tersinmezliklerden dolayı, tüketilir veya yok edilir. Bir sistem sürecinde

ekserji tüketimi, sistemle ilişkili olan tersinmezliklerden dolayı ortaya çıkan entropi ile orantılıdır. Ekserji ve enerji kavramları ile ilgili olarak Tablo 1.1’de karşılaştırma yapılmıştır (Hepbaşlı ve ark., 2003).

**Tablo 1. 1.** Ekserji ve enerji kavramlarının kıyaslanması (Özgener ve Hepbaşlı, 2003).

| Ekserji                                                                                                                                  | Enerji                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Madde ve çevresel faktörlerin her ikisine de bağlıdır.                                                                                   | Yalnızca madde faktörüne bağlı olup, çevresel faktörlerden bağımsızdır.                   |
| Çevreyle denge durumunda (ölü hal) sıfıra eşittir.                                                                                       | Sıfırdan farklı değerler alabilir (Einstein’ denklemine göre, $mc^2$ ye eşit durumdadır). |
| Yalnızca tersinir sistemler için termodinamiğin birinci kanunuyla ifade edilebilir. Tersinmez sistemlerde, tamamen veya kısmen yok olur. | Bütün sistemler için termodinamiğin birinci kanunu ile ifade edilir.                      |
| Termodinamiğin ikinci kanunu sebebiyle tersinir sistemler için sınırlı değildir.                                                         | Tüm sistemler için termodinamiğin ikinci kanunu ile sınırlıdır.                           |
| İş veya iş üretme yeteneğidir.                                                                                                           | Hareket veya hareketi üretme yeteneğidir.                                                 |
| Tersinir sistemlerde daima korunur, ancak tersinmez sistemlerde daima tüketilir.                                                         | Sistemde daima korunur; vardan yok veya yoktan var edilemez.                              |
| Miktarın ve entropi sebebi ile niteliğin bir ölçüsü durumundadır.                                                                        | Miktarın bir ölçüsü durumundadır.                                                         |

Ekserji ve enerji karşılaştırıldıktan sonra, ekserji analizi yapmanın önemini şöyle sıralayabiliriz (Hepbaşlı ve ark., 2003):

-Daha çok verimli kaynak kullanılması hedefini destekleyen bir tekniktir. Belirlenmesine ihtiyaç duyulan kayıpların yerleri, tipleri ve reel büyüklükleri ortaya çıkarılır.

-Enerji sistemlerinin tasarlanması ve analiz edilmesi için termodinamiğin ikinci kanunu ile birlikte enerji ve kütle korunumu kurallarını kullanan etkili bir yöntemdir.

-Sürdürülebilir gelişimin oluşturulmasında kilit bir role sahiptir.

-Mevcut proseslerdeki verimsizliklerin ortaya çıkarılmasında ve bu durumun azaltılarak, daha verimli enerji sistemlerinin tasarlanmasının olanaklı olup olmadığını belirleyen önemli bir teknik konumundadır.

-Enerji politikalarının belirlenmesinde kullanılacak önemli bir yöntemdir.

**Ölü hal:** Bir sistemin çevresiyle termodinamik dengede olması demektir. Ölü halde iken sistem, çevresi ile eşit basınç ve sıcaklıktadır. Yani sistem, çevresiyle mekanik ve ısı yönlerinden denge durumundadır. Ayrıca sistemin, çevreye göre potansiyel ve kinetik enerjileri sıfıra eşittir. Ölü hal durumunda sistem, çevresi ile kimyasal olarak reaksiyona girmez. Sistemin ölü hal durumundaki özellikleri  $P_0, T_0, h_0, u_0, s_0$ 'dır. Burada;

$$P_0 = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K' dir.}$$

Referans çevre özellikleri; atmosferdeki gaz oranları, deniz suyu, kireç ve alçı taşına göre alınmıştır (Çomaklı, 2001).

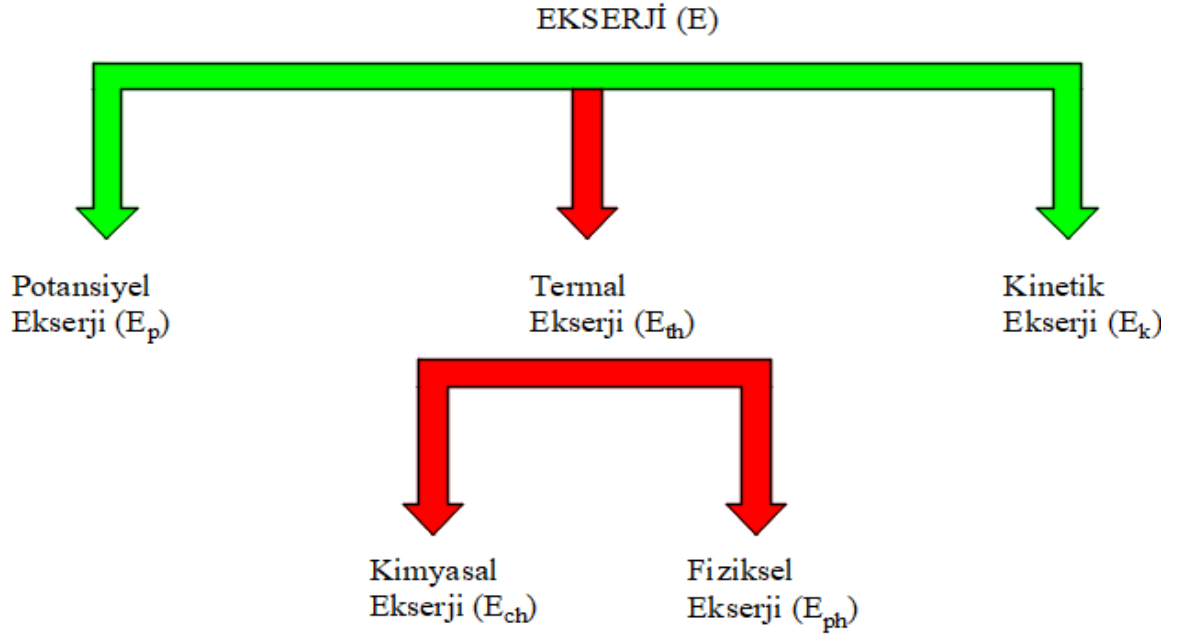
Bu maddelerin mol oranları ve buldukları faz durumları Tablo 1.2'de verilmiştir.

**Tablo 1. 2.** Referans çevre özelliklerine göre maddelerin mol oranları ve buldukları fazlar (Çomaklı, 2003).

| Gaz Fazları      | Mol Oranları |
|------------------|--------------|
| N <sub>2</sub>   | 0,7567       |
| H <sub>2</sub> O | 0,0303       |
| O <sub>2</sub>   | 0,2035       |
| CO <sub>2</sub>  | 0,0003       |
| Ar               | 0,0091       |

### 1.2.8.Ekserji Çeşitleri

Bir sistemin ekserjisi üç temel bölümden oluşur. Bunlar kinetik ekserji, potansiyel ekserji ve termal ekserjidir. Termal ekserji de kendi içinde fiziksel ve kimyasal ekserji olmak üzere iki kısımdan oluşur. Şekil 1.5'te ekserji çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1. 5. Ekserji çeşitleri (Çomaklı, 2003).

### 1.2.8.1. Fiziksel Ekserji

Tersinir süreçlerde herhangi bir fiziksel olayın gerçekleşmesi durumunda giriş basıncı  $P$  ve giriş sıcaklığı  $T$  ilk halinden,  $P_0$  ve  $T_0$  çevre koşulları ile denge durumuna getirildiği zaman elde edilen maksimum iş olarak tanımlanır.

$$\varepsilon_{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (1.39)$$

İdeal gazların fiziksel ekserjileri ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\varepsilon_{ph} = c_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (1.40)$$

### 1.2.8.2. Kimyasal Ekserji

Çevresiyle kimyasal olarak denge haline gelen bir maddenin, ısı transferi ve madde alışverişi sebebiyle yaptığı maksimum iş olarak tanımlanır.

## **2. MATERYAL ve YÖNTEM**

### **2.1. Bölgesel Isıtma Sistemleri**

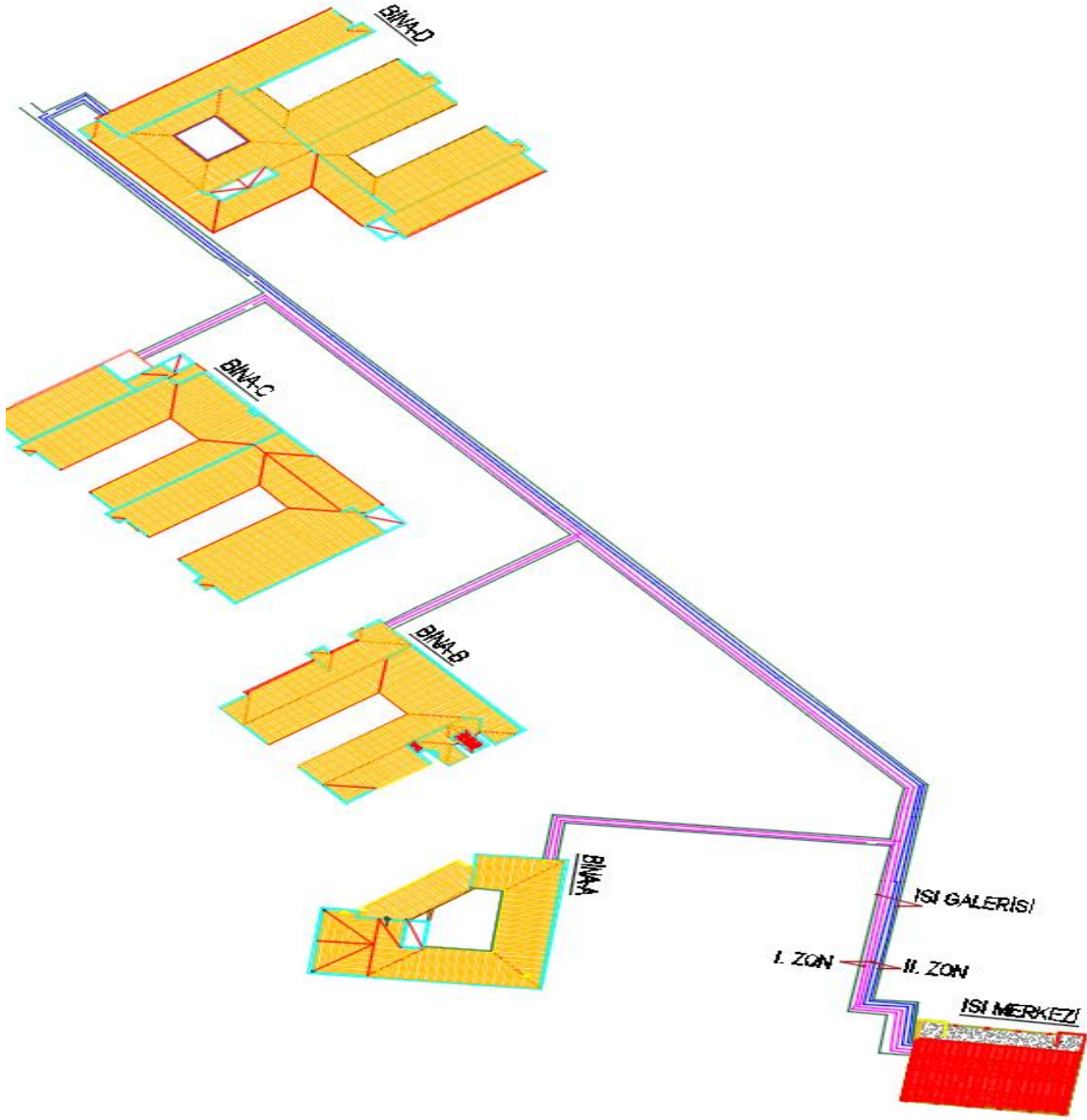
Bölgesel ısıtma; ısınma, sıcak su veya endüstriyel sistemler için gerekli olan ısının bir merkezde üretilerek boru şebekesi ve aracı akışkan yardımı ile geniş bir alan içerisinde bulunan kullanım yerlerine ulaştırılmasıdır. Kullanım alanı site, üniversite kampüsü, mahalle veya bir şehrin tamamını kapsar.

Bölgesel ısıtma sistemi, ısı merkezi, boru hatları ve eşanjör dairelerinden oluşmaktadır. İletim hatları olan borulardan akışkan olarak buhar veya su kullanılır. Buhar genellikle endüstriyel tesislerde kullanılır. Su sıcaklığı 100 °C'ye kadar olan sistemlere sıcak sulu sistemler, 110-180 °C arasındaki sistemlere ise kızgın sulu sistemler denir. Üniversitemizdeki bölgesel ısıtma sisteminde kızgın sulu ısıtma sistemi kullanılmaktadır.

### **2.2. Kızgın Sulu Bölgesel Isıtma Sistemi**

Kızgın sulu ısıtma sistemlerinde genellikle 180 °C'ye kadar ısıtılmış kızgın su kullanılmaktadır. Isı santralinde üretilmiş olan ısı, kızgın sulu taşıyıcı akışkan ile eşanjör dairelerine iletilir. Kızgın sulu bölgesel ısıtma sisteminde iki devre bulunmaktadır. Bunlardan primer devre olarak adlandırılan birinci devre ısı santrali ile eşanjörler arasındaki devredir. İkinci devre ise eşanjörler ile radyatörler arasındaki sekonder devredir. Bu sistemler bölge veya şehir gibi büyük kapasiteli yerleşimlerin ısıtılmasında kullanılır.

Şekil 2.1'de üniversitemize ait yerleşke planı ve ısıtma merkezi ile yerleşkeler arasındaki boru iletim hatlarının şematik gösterimi bulunmaktadır. Buna göre, sistemdeki ısıtma boruları ısı merkezinden mevcut yerleşkelere kadar ısı galerileri kullanılarak taşınmaktadır. Binalarda eşanjör daireleri bulunmaktadır. Bu sayede primer devredeki kızgın su, sıcak su haline getirilerek sekonder devre ile ısıtma mahaline ulaşmaktadır.



Şekil 2. 1. Kızgın sulu bölgesel ısıtma sistemi şematik hali (Orijinal).

Sistemde suyun buharlaşmasını önlemek için suya sürekli olarak karşı basınç uygulanır. Kızgın sulu bölgesel ısıtma sisteminde basınçlandırma önem sırasına göre mekanik (asal gazlar-azot), buhar ve pompa ile basınçlandırma olmak üzere üç gruba ayrılır. Üniversitemizde kullanılan yöntem ise azotla basınçlandırmadır.

**Tablo 2. 1.** Munzur Üniversitesi ısıtma merkezi komponentlerine ait bilgiler (Orijinal).

| <b>KAZAN</b>                                     |                                                                                         |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Marka ve özellik/Adet:                           | ALFA/ASSF-K/Sıvı-Gaz Yakıtlı Silindirik, Skoç Tip, Üç Geçişli Kızgın Su Kazanı/3adet.   |
| Kapasite:                                        | 5.300.000 kcal/sa                                                                       |
| $T_1 - T_2$ :                                    | 110-90 °C                                                                               |
| Isı Gücü (Q)/ İşletme Basıncı:                   | 6163 kW/12 bar                                                                          |
| Kazan Yüzeyi Yalıtım Cinsi ve Yalıtım Kalınlığı: | Taş yünü/8-10 cm                                                                        |
| Kazan çap / uzunluk (D/L):                       | D=2.75 m / L=6.50 m                                                                     |
| <b>BRÜLÖR</b>                                    |                                                                                         |
| Marka:                                           | Baltur (çift yakıtlı)                                                                   |
| Debi:                                            | 224-941 Kg/sa (2500-10500 Kw)<br>Fuel-Oil: 750 kg/Sa-Doğal Gaz: 800 Nm <sup>3</sup> /sa |
| <b>BACA</b>                                      |                                                                                         |
| Özellik:                                         | Çift cidarlı, Paslanmaz çelik.                                                          |
| Yalıtım Cinsi /Kalınlığı:                        | Taş yünü / 5 cm                                                                         |
| Baca çapı (φ)/ yüksekliği (h):                   | 1350 mm / 20 m                                                                          |
| <b>GENLEŞME TANKI-1</b>                          |                                                                                         |
| Özellik:                                         | Yatık silindirik kapalı genleşme deposu                                                 |
| Basınçlandırma Tipi:                             | Azot                                                                                    |
| Kapasite:                                        | 26000 L                                                                                 |
| Basıncı:                                         | 16 Atü                                                                                  |
| Çap (φ )/Uzunluk(L):                             | 2000 mm/8500 mm                                                                         |
| <b>GENLEŞME TANKI-2</b>                          |                                                                                         |
| Özellik:                                         | Dik Silindirik kapalı genleşme deposu                                                   |
| Basınçlandırma Tipi:                             | Azot                                                                                    |
| Kapasite:                                        | 1000 L                                                                                  |
| Basıncı:                                         | 16 Atü                                                                                  |
| Çap (φ )/Uzunluk(L):                             | 900 mm/1600 mm                                                                          |
| <b>YAKIT</b>                                     |                                                                                         |
| Özellik:                                         | Fuel-Oil (No:4/Kalyak)                                                                  |
| Yıllık Yakıt Miktarı:                            | 500 Ton                                                                                 |
| <b>YAKIT TANKI-1 (Ana Tank)</b>                  |                                                                                         |
| Özellik/miktar:                                  | Dik silindirik/1 adet                                                                   |
| Kapasite:                                        | 500 m <sup>3</sup>                                                                      |
| Çapı (φ)/ yüksekliği (h):                        | 10000 mm/6500 mm                                                                        |
| <b>YAKIT TANKI-2</b>                             |                                                                                         |
| Özellik/miktar:                                  | Yatık silindirik, ısıtıcılı/2 adet                                                      |
| Çap (φ )/Uzunluk(L):                             | 2000 mm/9600 mm                                                                         |
| Kapasite-Serpantin alanı:                        | 30000 L/100000 kcal/ sa -30 m <sup>2</sup>                                              |
| <b>YAKIT TANKI-3 (Günlük Tank)</b>               |                                                                                         |
| Özellik/miktar:                                  | Yatık silindirik, ısıtıcılı/1 adet                                                      |
| Çap (φ )/Uzunluk(L):                             | 1200 mm/5400 mm                                                                         |
| Kapasite-Serpantin alanı:                        | 6000 L/40000 kcal/sa-20 m <sup>2</sup>                                                  |

### 2.2.1. Kazanlar

Kazanlar, içerisindeki yakıtın yanması sonucu oluşan enerjiyi (ısı), sistemde iş yapan akışkana aktaran kontrol elemanlarıdır. Yanma sonucunda meydana gelen ısının tamamı akışkana iletilmemektedir. Isının bir kısmı baca gazıyla, diğer kısmı ise kazanın yüzeyinden atmosfere bırakılmaktadır. Burada, atmosfere atılarak kullanılmayan ısı kazan ve sistem verimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu duruma bağlı olarak kullanılan yakıt tüketimi de bu verime göre değişmektedir. Bu nedenlerle kazanların hem enerji hem de ekserji yönünden verimlerinin incelenmesi gerekmektedir. Kazanlarda ki en önemli olay yakıtın hava ile yanması şeklindedir.

#### 2.2.1.1. Yakıtlar Ve Yanma

Yanma, yakıtın oksijen ile reaksiyona girmesi olayıdır. Buradaki oksijen havadan karşılanır. Mol oranı (hacimsel oran) olarak, kuru hava %20,9 oksijen, %78,1 azot, %0,9 argon ve çok az miktarda karbondioksit, helyum, neon ve hidrojen oluşur. Buradan yola çıkarak az miktarda oluşan bileşenler ihmal edilerek kuru havayı oluşturan karışımların mol oranları yaklaşık olarak %21 oksijen ve %79 azot olarak kabul edilmiştir. Böylece yanma işleminde kullanılan her mol oksijen için 3,76 mol azot bulunur.



Yanma işlemi esnasında yakıtın içindeki karbonun tamamı karbondioksite, hidrojenin tamamı su buharına ve kükürtün tamamı kükürtdioksite dönüşüyor ve yanma gazları içinde oksijen bulunuyorsa, oluşan yanma tam yanma olarak kabul edilir.

Yanma için yeterli oksijenin olmaması durumunda veya yakıt ve havanın homojen karışmaması durumunda eksik yanma meydana gelir.

Yanma işlemleri içinde hava/yakıt oranı da kullanılmaktadır. Hava/yakıt oranı birim yakıt için gerekli olan hava miktarını belirlemede kullanılır. Genellikle kütleli olarak hesaplanmaktadır.

$$H/Y = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \quad (2.1)$$

Yakıtın tam olarak yanabilmesi için gerekli olan minimum hava miktarına teorik hava miktarı veya stokiometrik adı verilir. Bu durumda yanma ürünlerinin içinde oksijen bulunmaz.

Gerçek yanma işlemlerinde ise, yanmanın tam olmasını sağlamak için genellikle teorik hava miktarından daha fazla hava kullanılır. Fazla hava ise hava fazlalık katsayısı olarak ifade edilir. Tablo 2.2’de çeşitli yakıtlar için optimum hava fazlalık katsayıları verilmiştir.

$$HFK = \lambda = \frac{(H/Y)_{Gerçek}}{(H/Y)_{Teorik}} \quad (2.2)$$

**Tablo 2. 2.** Bazı yakıtlar için HFK değerleri (Çomaklı, 2003).

| Yakıt     | Ocak ve Brülör Tipi                                        | Fazla Hava (%) |
|-----------|------------------------------------------------------------|----------------|
| Kömür     | Hareketli ızgara                                           | 15-20          |
| Fuel-Oil  | -Yüksek verimli/kapasiteli brülör<br>-Endüstriyel fırınlar | 15-20<br>10-20 |
| Doğal Gaz | Recister tip brülör                                        | 5-10           |

Bir yanma reaksiyonu genel olarak;

Yakıt + Hava (oksijen) → Reaksiyon ürünleri + Isı

bağıntısı ile belirlenmektedir. Yanma olayında Termodinamiğin birinci, ikinci ve kütle korunumu kanunları geçerlidir.

### 2.2.1.2. Yanma Analizi

Yanma esnasında ekserjinin hesaplanabilmesi için, yanma sonunda ortaya çıkan yanma ürünlerinin miktarları ve hava yakıt miktarının bilinmesi gerekir. Sistemin performansı bu değerlere bağlıdır.

Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’te sırasıyla yakıtın kütle analizi ve yakıtta ait maddelerin mol kütleleri verilmiştir.

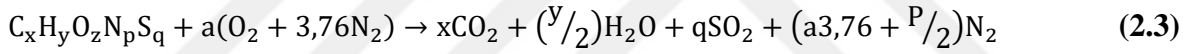
**Tablo 2. 3.** Yakıtın kütleli analizi (Çomaklı, 2003).

| C  | H  | O   | N    | S    | Hu    | Ex    |
|----|----|-----|------|------|-------|-------|
| %  | %  | %   | %    | %    | kJ/kg | kJ/kg |
| 84 | 11 | 1,1 | 2,55 | 1,35 | 42650 | 45458 |

**Tablo 2. 4.** Bazı maddelerin mol kütleleri (Eyriboyun, 2009).

| Madde    | Simgesi          | Mol Kütle (kg/kmol) | Yuvarlatılmış Mol Kütle (kg/kmol) |
|----------|------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Karbon   | C                | 12,011              | 12                                |
| Hidrojen | H                | 1,008               | 1                                 |
| Oksijen  | O                | 15,999              | 16                                |
| Azot     | N                | 14,008              | 14                                |
| Kükürt   | S                | 32,064              | 32                                |
| Su       | H <sub>2</sub> O | 18,015              | 18                                |
| Hava     | (Karışım)        | 28,964              | 29                                |

100 kg yakıtın teorik tam yanması sonucunda oluşan gazlar hacimsel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.



Denklemden oksijen dengesinden teorik hava miktarı (a) bulunur.

$$a = x + q + \left(\frac{y}{4}\right) - \left(\frac{z}{2}\right) \quad (2.4)$$

$$x = \frac{100}{12} c \quad (2.5)$$

$$y = \frac{100}{1} h \quad (2.6)$$

$$z = \frac{100}{16} o \quad (2.7)$$

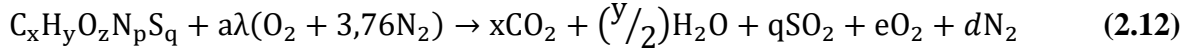
$$p = \frac{100}{14} n \quad (2.8)$$

$$q = \frac{100}{32} s \quad (2.9)$$

$$a = x + q + \left(\frac{y}{4}\right) - \left(\frac{z}{2}\right) \quad (2.10)$$

$$a = x + q + \left(\frac{y}{4}\right) - \left(\frac{z}{2}\right) \quad (2.11)$$

Yanmanın fazla hava ile yani gerçek yanma ( $\lambda > 1$ ) olması durumunda;



$$e = 25(\lambda - 1) \left( \frac{c}{3} + \frac{s}{8} + h - \frac{o}{8} \right) \quad (2.13)$$

$$d = 94\lambda \left( \frac{c}{3} + \frac{s}{8} + h - \frac{o}{8} + \frac{n}{\lambda \cdot 52,64} \right) \quad (2.14)$$

Kütlesel duman gazı miktarı;

$$V_{KDF} = 44x + 18(y/2) + 64q + 32e + 28d \quad (2.15)$$

Duman gazını oluşturan gazların kütleli oranları;

Karbondioksit oranı:

$$y_{CO_2} = \frac{44x}{V_{KDF}} \quad (2.16)$$

Su buharı oranı:

$$y_{H_2O} = \frac{18y}{2 \cdot V_{KDF}} \quad (2.17)$$

Kükürtdioksit oranı:

$$y_{SO_2} = \frac{64q}{V_{KDF}} \quad (2.18)$$

Oksijen oranı:

$$y_{O_2} = \frac{32e}{V_{KDF}} \quad (2.19)$$

Azot oranı:

$$y_{N_2} = \frac{28d}{V_{KDF}} \quad (2.20)$$

### 2.2.1.3. Yanma Gazları Özgül Isıları

Yanma gazları ideal gaz kabul edilip, özgül ısıları sıcaklığın fonksiyonu olarak kütleli birimde hesaplanacaktır. Yanma gazlarının karışımına ait özgül ısı kütleli olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

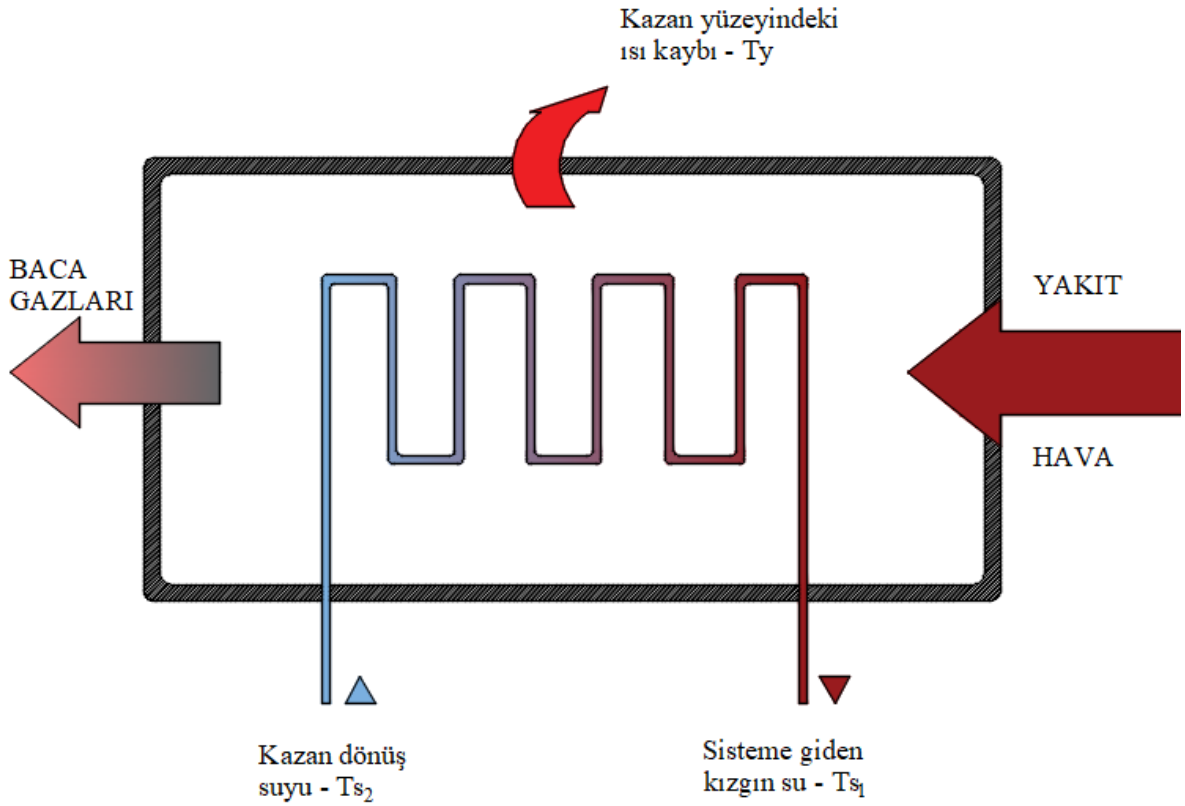
$$C_p = y_{CO_2} C_{p CO_2} + y_{H_2O} C_{p H_2O} + y_{SO_2} C_{p SO_2} + y_{O_2} C_{p O_2} + y_{N_2} C_{p N_2} \text{ kJ/kg} \quad (2.21)$$

Özgül ısı sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, baca gazlarına ait sıcaklık ortalama 150 °C kabul edilmiştir.

$$\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \text{ kJ/kmol} \cdot K \quad (2.22)$$

#### 2.2.1.4. Kazan İçin Enerji ve Ekserji Analizi

Kazanlardaki çalışma prensibi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Buna göre sistemin verimli çalışması için, hava fazlalık katsayısının yakıtın cinsine göre optimum değerde seçilmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2. 2. Kazanın şematik gösterimi (Orijinal).

$T_0, P_0$  Koşullarında yakıt ve havanın kazana girdiği kabul edilerek, enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_y = \Delta \dot{E}_s + \dot{E}_b + \dot{E}_k \quad (2.23)$$

$\dot{E}_y$ , yakıt enerjisidir.

$$\dot{E}_y = \dot{m}_y \cdot H_u \quad (2.24)$$

$\dot{E}_b$ , baca gazları ile dışarı atılan enerjidir.

$$\dot{E}_b = \dot{m}_b \cdot C_{pb}(T_b - T_o) \quad (2.25)$$

$\dot{E}_k = Q_k$ , kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kaybını gösterir.

$$\dot{E}_k = Q_k = A \cdot h(T_{ky} - T_o) + [\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_y \cdot (T_{ky}^4 - T_o^4)] \quad (2.26)$$

$\Delta \dot{E}_s$ , kazandan suya aktarılan enerjiyi ifade eder.

$$\Delta \dot{E}_s = \dot{m}_s \cdot C_{ps}(T_{sç} - T_{sg}) \quad (2.27)$$

Yukarıdaki bağıntılardan hareketle suyun debisi şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_y \cdot H_u - [\dot{m}_b \cdot C_{pb}(T_b - T_h)] - [A \cdot h(T_{ky} - T_o)]}{C_{ps}(T_{sç} - T_{sg})} \quad (2.28)$$

**Ekserji analizi:**

$$\dot{E}_{XY} = \Delta \dot{E}_{XS} + \dot{E}_{X,Kyüzey} + \dot{E}_{XB} + \dot{E}_{Xkayıp} \quad (2.29)$$

**Yakıt ekserjisi;**

$$\dot{E}_{XY} = \dot{m}_y \cdot \phi \cdot H_u \quad (2.30)$$

$\phi$ : yakıt ekserjisinin alt ısıl değere oranıdır ve yakıtların kimyasal bileşimlerinden hesaplanmaktadır.

**Kazan yüzeylerinden olan ekserji kayıpları;**

$$\dot{E}_{X,Kyüzey} = Q_k \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_y}\right) \quad (2.31)$$

**Baca gazı ekserjisi:** Kimyasal ve fiziksel ekserjiden oluşur. Baca gazını oluşturan bileşenlerin ideal gaz olarak kabul edildiği göz önüne alındığında karışımın fiziksel ve kimyasal ekserjileri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır.

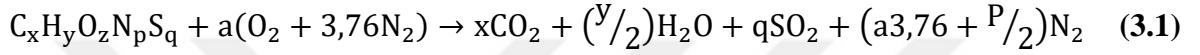
$$\dot{E}_{XB} = \dot{E}_{X,kim} + \dot{E}_{X,fiz} \quad (2.32)$$

$$\dot{E}_{XB} = \dot{n}_T \left( \sum_k X_k \varepsilon_k^0 + \bar{R} T_o \sum_k X_k \ln X_k \right) + (T_B - T_o) \sum_k \dot{n}_k C_{p,kB}^E \quad (2.33)$$

### 3. BULGULAR

Bu çalışmada Munzur Üniversitesi ısıtma merkezinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yıllık ortalama 500 ton özel kalorifer yakıtı kullanılan sistemde kazan, yakıt ve baca gazlarının enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

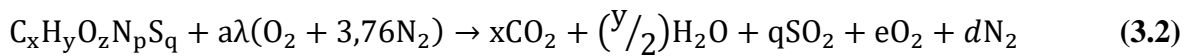
100 kg yakıtın teorik tam yanması sonucunda oluşan gazlar molar ve kütleli olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır. Tablo 3.1’de bu sonuçlar gösterilmiştir.



**Tablo 3. 1.** Yanma sonucunda oluşan gazların molar ve kütleli analizi (Orijinal).

| Yakıtın Kimyasal Formül Değerleri                                 | $\dot{n}$ (kmol/100 kg <sub>y</sub> ) | m (kg) |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| $x = \frac{100}{12}c$                                             | 7                                     | 84     |
| $y = \frac{100}{1}h$                                              | 11                                    | 11     |
| $z = \frac{100}{16}o$                                             | 0,068                                 | 1,1    |
| $p = \frac{100}{14}n$                                             | 0,18                                  | 2,55   |
| $q = \frac{100}{32}s$                                             | 0,042                                 | 1,35   |
| $a = x + q + \left(\frac{y}{4}\right) - \left(\frac{z}{2}\right)$ | 9,758                                 | 87,55  |

Yanmanın fazla hava ile yani gerçek yanma ( $\lambda \geq 1$ ) olması durumunda;



$$e = 25(\lambda - 1) \left(\frac{c}{3} + \frac{s}{8} + h - \frac{o}{8}\right) \quad (3.3)$$

$$d = 94\lambda \left( \frac{c}{3} + \frac{s}{8} + h - \frac{o}{8} + \frac{n}{\lambda \cdot 52,64} \right) \quad (3.4)$$

Baca gazı içerisindeki oksijen ve azot miktarları formül 3.3 ve 3.4 ile hesaplanmıştır. Tablo 3.2’de hava fazlalık katsayısına göre bu değişimler verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.3’de hava fazlalık katsayısına göre yanma sonucunda oluşan duman gazı miktarları, Tablo 3.4 ve 3.5’te duman gazlarını oluşturan gazların kütleli ve molar oranları verilmiştir.

**Tablo 3. 2.** Hava fazlalık katsayısına göre yanma sonucundaki oksijen ve azot değerleri (Orijinal).

| Oksijen ve Azot değerleri | Hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) |               |               |               |               |               |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                           | $\lambda=1$                           | $\lambda=1.1$ | $\lambda=1.2$ | $\lambda=1.3$ | $\lambda=1.4$ | $\lambda=1.5$ |
| e (kmol)                  | 0                                     | 0,976         | 1,951         | 2,927         | 3,903         | 4,879         |
| d (kmol)                  | 36,735                                | 40,404        | 44,073        | 47,742        | 51,411        | 55,080        |

Kütleli duman gazı miktarı;

$$\begin{aligned}
 V_{KDF} &= 44x + 18(y/2) + 64q + 32e + 28d \\
 &= 44 * 7 + 18 * \frac{11}{2} + 64 * 0.042 + 32 * 1.951 + 28 * 44.073 \\
 &= 1706.176 \text{ kg}/100 \text{ kg}_y \\
 &= 1706.176 * \frac{500000}{100} = 8530880 \text{ kg}/500 \text{ ton}_y
 \end{aligned}$$

Molar duman gazı miktarı;

$$\begin{aligned}
 V_{DF} &= x + y/2 + q + e + d \text{ kmol}/100 \text{ kg}_y \\
 &= 7 + 11/2 + 0.042 + 1.951 + 44.073 \\
 &= 58.566 \text{ kmol}/100 \text{ kg}_y \\
 &= 58.566 * \frac{500000}{100} = 292830 \text{ kmol}/500 \text{ ton}_y
 \end{aligned}$$

**Tablo 3. 3.** Hava fazlalık katsayısına göre duman gazı miktarları (Orijinal).

| Duman Gazı Miktarı                    | Hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) |               |               |               |               |               |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                       | $\lambda=1$                           | $\lambda=1.1$ | $\lambda=1.2$ | $\lambda=1.3$ | $\lambda=1.4$ | $\lambda=1.5$ |
| $V_{KDF}$ (kg/500 ton <sub>y</sub> )  | 0                                     | 0,976         | 1,951         | 2,927         | 3,903         | 4,879         |
| $V_{DF}$ (kmol/500 ton <sub>y</sub> ) | 36,735                                | 40,404        | 44,073        | 47,742        | 51,411        | 55,080        |

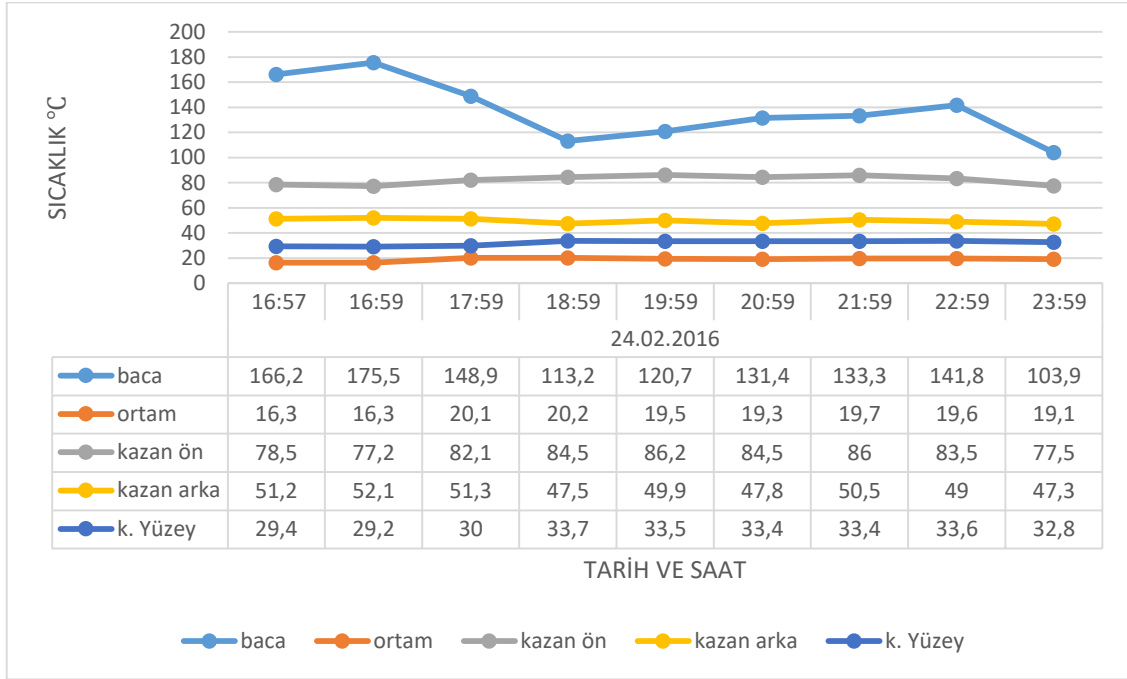
**Tablo 3. 4.** Duman gazlarını oluşturan gazların kütle oranları (Orijinal).

| Duman gazlarının kütle analiz formülü | Duman gazlarının kütle oranları | %    |
|---------------------------------------|---------------------------------|------|
| $y_{CO_2} = \frac{44x}{V_{KDF}}$      | 0,181                           | 18.1 |
| $y_{H_2O} = \frac{18y}{2 * V_{KDF}}$  | 0,058                           | 5.8  |
| $y_{SO_2} = \frac{64q}{V_{KDF}}$      | 0,002                           | 0,2  |
| $y_{O_2} = \frac{32e}{V_{KDF}}$       | 0,037                           | 3,7  |
| $y_{N_2} = \frac{28d}{V_{KDF}}$       | 0,722                           | 72,2 |

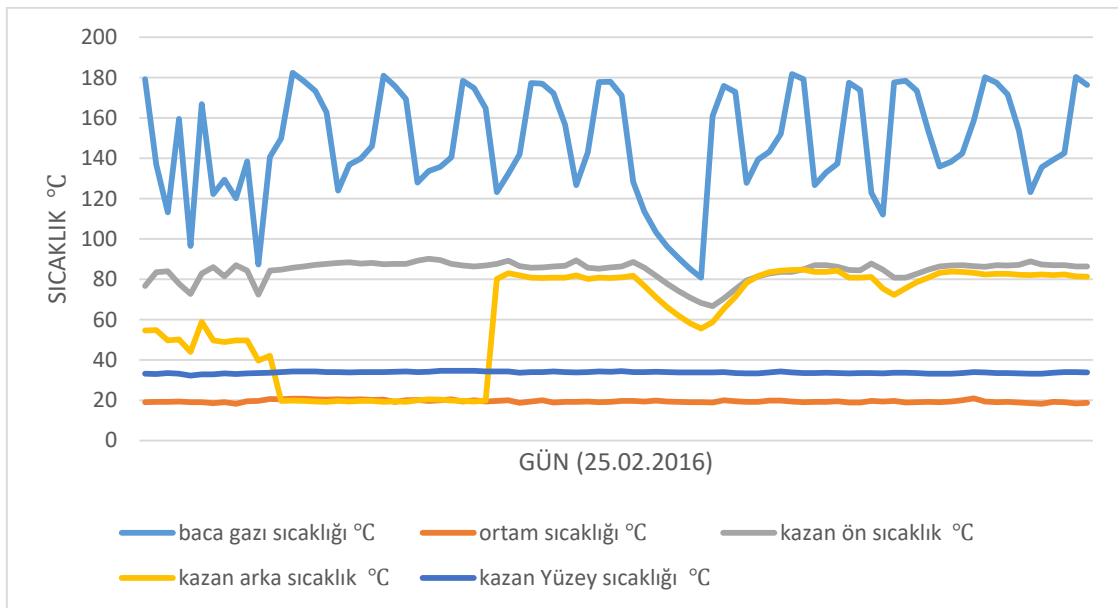
**Tablo 3. 5.** Duman gazlarını oluşturan gazların molar oranları (Orijinal).

| Duman gazlarının hacimsel analiz formülü | Duman gazlarının hacimsel (molar) oranları | %    |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|------|
| $X_{CO_2} = \frac{x}{V_{DF}}$            | 0,120                                      | 12   |
| $X_{H_2O} = \frac{y}{2 * V_{DF}}$        | 0,094                                      | 9,4  |
| $X_{SO_2} = \frac{q}{V_{DF}}$            | 0,001                                      | 0,1  |
| $X_{O_2} = \frac{e}{V_{DF}}$             | 0,033                                      | 3,3  |
| $X_{N_2} = \frac{d}{V_{DF}}$             | 0,752                                      | 75,2 |

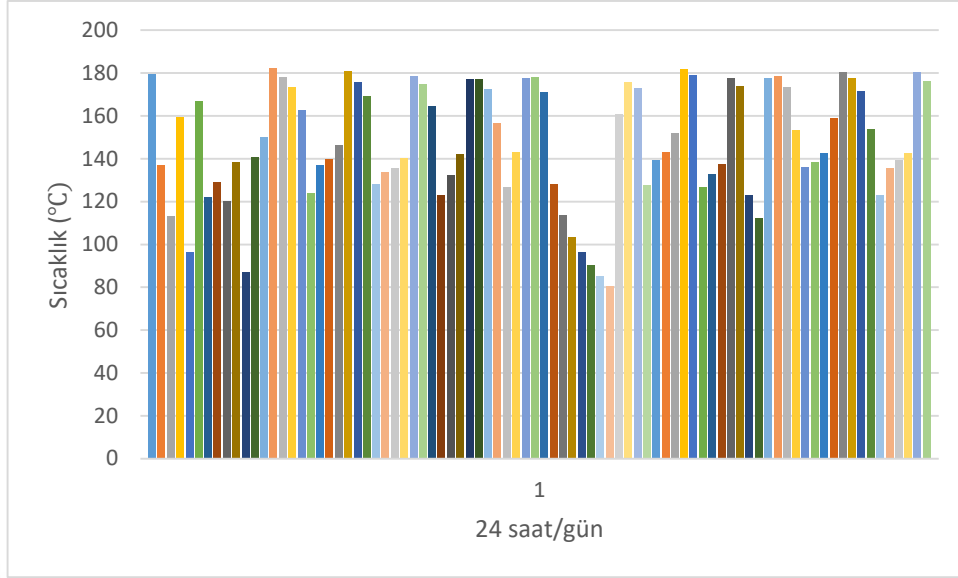
Baca gazı sıcaklığı şekil 3.1, 3.2 ve 3.3'deki ölçümler dikkate alınarak  $T = 150^{\circ}\text{C} + 273,15 = 423,15\text{ K}$  şeklinde hesaplanmıştır. Tablo 3.6'da verilen baca gazlarına ait molar özgül ısı değerleri kullanılarak baca gazı özgül ısı değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3. 1. 2016 yılı ısıtma merkezi saatlik sıcaklık analizi (Orijinal).



Şekil 3. 2. 2016 yılı ısıtma merkezi bir günlük sıcaklık analizi (Orijinal).



Şekil 3. 3. 2016 yılı ısıtma merkezi bir günlük baca gazı sıcaklık analizi (Orijinal).

Tablo 3. 6. Bazı gazların özgül ısı değerleri (Çengel, 2012).

| GAZ            | a                                                                                | b                        | c                        | d                        |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Azot           | 28,900                                                                           | $-0,157 \times 10^{-2}$  | $0,8081 \times 10^{-5}$  | $-2,873 \times 10^{-9}$  |
| Oksijen        | 25,480                                                                           | $1,52000 \times 10^{-2}$ | $-0,7155 \times 10^{-5}$ | $1,312 \times 10^{-9}$   |
| Hava           | 28,110                                                                           | $0,19670 \times 10^{-2}$ | $0,4842 \times 10^{-5}$  | $-1,966 \times 10^{-9}$  |
| Karbonmonoksit | 28,160                                                                           | $0,16750 \times 10^{-2}$ | $0,5372 \times 10^{-5}$  | $-2,222 \times 10^{-9}$  |
| Karbondioksit  | 22,260                                                                           | $5,98100 \times 10^{-2}$ | $-3,501 \times 10^{-5}$  | $7,469 \times 10^{-9}$   |
| Su buharı      | 32,340                                                                           | $0,19230 \times 10^{-2}$ | $1,055 \times 10^{-5}$   | $-3,595 \times 10^{-9}$  |
| Kükürtdioksit  | 25,780                                                                           | $5,7950 \times 10^{-2}$  | $-3,812 \times 10^{-5}$  | $8,612 \times 10^{-9}$   |
| Hidrojen       | 29,110                                                                           | $-0,1916 \times 10^{-2}$ | $0,4003 \times 10^{-5}$  | $-0,8704 \times 10^{-9}$ |
|                | $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \text{ kJ/kmolK}$ Sıcaklık aralığı: 273-1800 K |                          |                          |                          |

Tablo 3.7 de ise baca gazlarının molar ve kütleli özgül ısı değerleri hesaplanarak gösterilmiştir.

**Tablo 3. 7.**  $T_b = 150$  °C için baca gazlarının molar ve kütleli özgül ısı analizleri (Orijinal).

| $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$ (kJ/kmol · K) |                    |                    |                   |                   |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| $\bar{C}_{p CO_2}$                               | $\bar{C}_{p H_2O}$ | $\bar{C}_{p SO_2}$ | $\bar{C}_{p O_2}$ | $\bar{C}_{p N_2}$ |
| 41,866                                           | 34,770             | 44,128             | 30,730            | 29,465            |
| $C_p = \bar{C}_p/M$ (kJ/kg · K)                  |                    |                    |                   |                   |
| $C_{p CO_2}$                                     | $C_{p H_2O}$       | $C_{p SO_2}$       | $C_{p O_2}$       | $C_{p N_2}$       |
| 0,951                                            | 1,932              | 0,689              | 0,960             | 1,052             |

Yapılan ve kullanılan değerlerden faydalanarak baca gazının kütleli bazda özgül ısı kapasitesi,

$$\begin{aligned} C_{pb} &= y_{CO_2} C_{p CO_2} + y_{H_2O} C_{p H_2O} + y_{SO_2} C_{p SO_2} + y_{O_2} C_{p O_2} + y_{N_2} C_{p N_2} \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (3,5) \\ &= (0,181 \cdot 0,951) + (0,058 \cdot 1,932) + (0,002 \cdot 0,689) + (0,037 \\ &\quad \cdot 0,960) + (0,723 \cdot 1,052) = 1,082 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned}$$

şeklinde hesaplanmıştır. Yakıt enerjisi  $\dot{E}_y$  ve baca gazları ile dışarı atılan enerji  $\dot{E}_b$  yi

$$\dot{E}_y = \dot{m}_y \cdot H_u = 500000 \cdot 42650 = 21325000000 \text{ kJ/yıl}$$

$$\dot{E}_b = \dot{m}_b \cdot C_{pb}(T_b - T_o) = 8530880 \cdot 1,082 \cdot (423 - 293)$$

$$= 1218414405 \text{ kJ/500 ton yakıt şeklinde hesaplayabiliriz.}$$

$\dot{E}_k = Q_k$ , kazan yüzeylerinden çevreye olan ısı kaybını gösterir. Kazanın ön, arka ve yan yüzeylerinde farklı sıcaklıklar ölçüldüğü için kayıp ısı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Doğal taşınım katsayısı kaynaklardan 5 W/m<sup>2</sup>K alınmıştır. Ayrıca ışınlama ile ısı transferi de eklenmiştir.

$$\dot{E}_k = \dot{Q}_k = A \cdot h \cdot (T_k - T_o) + [\varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_k^4 - T_o^4)] \quad (3,6)$$

$$h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\varepsilon = 0,17$$

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Kazan ön bölgesinden olan ısı kaybı,

$$\begin{aligned} Q_{k\ddot{o}} &= A_{\ddot{o}} \cdot h \cdot (T_{k\ddot{o}} - T_o) + [\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\ddot{o}} \cdot (T_{k\ddot{o}}^4 - T_o^4)] \\ &= \left(3,14 \cdot \frac{2,70^2}{4}\right) \cdot 5 \cdot (353 - 291) \\ &\quad + \left[0,17 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(3,14 \cdot \frac{2,70^2}{4}\right) \cdot (353^4 - 291^4)\right] = 2236,185 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Kazan arka bölgesinden olan ısı kaybı,

$$\begin{aligned} Q_{kA} &= A_A \cdot h \cdot (T_{kA} - T_o) + [\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_A \cdot (T_{kA}^4 - T_o^4)] \\ &= \left(3,14 \cdot \frac{2,70^2}{4}\right) \cdot 5 \cdot (323 - 291) \\ &\quad + \left[0,17 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(3,14 \cdot \frac{2,70^2}{4}\right) \cdot (323^4 - 291^4)\right] = 1120,936 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Kazan yüzey bölgesinden olan ısı kaybı,

$$\begin{aligned} Q_{ky} &= A_y \cdot h \cdot (T_{ky} - T_o) + [\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_y \cdot (T_{ky}^4 - T_o^4)] \\ &= (3,14 \cdot 2,70 \cdot 6,50) \cdot 5 \cdot (303 - 291) \\ &\quad + [0,17 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (3,14 \cdot 2,70 \cdot 6,50) \cdot (303^4 - 291^4)] \\ &= 3976,666 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Hesaplanmış, tüm kazan yüzeylerinden kaybolan ısı bu üç değer toplamıdır.

$$\begin{aligned} Q_k &= Q_{k\ddot{o}} + Q_{kA} + Q_{ky} \\ &= 2236,185 + 1120,936 + 3976,666 \\ &= 7333,787 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Kazan, günde ortalama 12 saat ve yılda 1812 saat çalıştığından kazan yüzeylerinden kaybolan enerji;

$$\dot{E}_k = \dot{Q}_k = 7333,787 \cdot 3600 \cdot 1812 = 47839759 \text{ kJ/yıl}$$

Kazandan suya aktarılan enerjiyi  $\Delta \dot{E}_s$  olarak ifade edersek, 3.11 bağıntısı ile hesaplayabiliriz

$$\Delta \dot{E}_s = \dot{m}_s \cdot C_{ps} (T_{s\check{c}} - T_{sg}) \quad (3.11)$$

Yukarıdaki bağıntılardan hareketle suyun debisi 3.12 bağıntısı ile hesaplanır:

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= (E_y - E_b - E_k) / C_{ps} (T_{s\check{c}} - T_{sg}) \quad (3.12) \\ &= \frac{21325000000 - 1218414405 - 47839759}{4,18 \cdot (383 - 363)} = 239937151 \text{ kg/yıl} \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{E}_s = \dot{m}_s \cdot C_{ps} \cdot (T_{s\check{c}} - T_{sg}) = 239937151 \cdot 4,18 \cdot 20 = 20058745824 \text{ kJ/yıl}$$

**Ekserji analizi:** Yakıt ve hava kazana  $T_0, P_0$  şartlarında girdiği kabul edilerek genel ekserji denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{E}_{X,Y} = (\dot{E}_{X,S\check{C}} - \dot{E}_{X,SG}) + \dot{E}_{X,K} + \dot{E}_{X,B} + \sum_i \dot{I}_i \quad (3.13)$$

- Yakıt ekserjisi ( $\dot{E}_{X,Y}$ ):

$$\dot{E}_{X,Y} = \dot{m}_y \cdot \phi \cdot H_u \quad (3.14)$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_0}{H_u} \text{ veya,} \quad (3.15)$$

$$\phi = 1,0401 + \left(0,1728 \frac{h}{c}\right) + \left(0,0432 \frac{o}{c}\right) + \left(0,2169 \frac{s}{c}\right) \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c}\right) \quad (3.16)$$

$$= 1,0401 + \left(0,1728 \frac{0,11}{0,84}\right) + \left(0,0432 \frac{0,011}{0,84}\right) + \left(0,2169 \frac{0,0135}{0,84}\right) \left(1 - 2,0628 \frac{0,11}{0,84}\right)$$

$$= 1,07$$

$$\dot{E}_{X,Y} = 500000 \cdot 1,07 \cdot 42650 = 2,282 \cdot 10^{10} \text{ kJ/yıl}$$

- Kazan yüzeylerinden olan ekserji kayıpları ( $\dot{E}_{X,K}$ ):

$$\dot{E}_{X,K} = Q_k \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_y}\right) \quad (3.17)$$

$$T_y = \frac{T_{k\ddot{o}} + T_{kA} + T_{ky}}{3} = \frac{353 + 323 + 303}{3} = 326,3 \text{ K}$$

$$\dot{E}_{X,K} = 47839759 \cdot \left(1 - \frac{291,15}{326,3}\right) = 5153440 \text{ kJ /yıl}$$

- Baca gazı ekserjisi ( $\dot{E}_{X,B}$ ):

$$\dot{E}_{X,B} = \dot{n}_T (\sum_K X_K \epsilon_K^0 + \bar{R} T_0 \sum_K X_K \ln X_K) + (T_b - T_0) \sum_K \dot{n}_K C_{p,KB}^E \quad (3.18)$$

( $\bar{R}$ : Evrensel gaz sabiti ( $\bar{R} = 8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ )).

$$\begin{aligned} \dot{E}_{X,B} = \dot{n}_T [ & (X_{CO_2} \cdot \epsilon_{CO_2}^0 + X_{H_2O} \cdot \epsilon_{H_2O}^0 + X_{SO_2} \cdot \epsilon_{SO_2}^0 + X_{O_2} \cdot \epsilon_{O_2}^0 + X_{N_2} \cdot \epsilon_{N_2}^0) + \bar{R} T_0 (X_{CO_2} \cdot \\ & \ln X_{CO_2} + X_{H_2O} \cdot \ln X_{H_2O} + X_{SO_2} \cdot \ln X_{SO_2} + X_{O_2} \cdot \ln X_{O_2} + X_{N_2} \cdot \ln X_{N_2}) ] + \\ & (T_b - T_0) (\dot{n}_{CO_2} \cdot C_{p,CO_2}^E + \dot{n}_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O}^E + \dot{n}_{SO_2} \cdot C_{p,SO_2}^E + \dot{n}_{O_2} \cdot C_{p,O_2}^E + \dot{n}_{N_2} \cdot C_{p,N_2}^E) \end{aligned}$$

$$\dot{n}_T = 7 + 5,5 + 0,042 + 1,951 + 44,073 = 58,566 \text{ kmol}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{X,B} = 58,566 [ & (0,120 \cdot 20140 + 0,094 \cdot 11710 + 0,001 \cdot 303500 + 0,033 \cdot 3970 \\ & + 0,753 \cdot 720) + (8,314 \cdot 291,15) (0,120 \cdot \ln 0,120 + 0,094 \cdot \ln 0,094 \\ & + 0,001 \cdot \ln 0,001 + 0,033 \cdot \ln 0,033 + 0,753 \cdot \ln 0,753) ] + (423,15 \\ & - 291,15) (7 \cdot 6,82 + 5,5 \cdot 5,52 + 0,042 \cdot 7,04 + 1,951 \cdot 4,86 + 44,073 \\ & \cdot 4,87) = 188339 \text{ kJ / yıl} \end{aligned}$$

Tablo 3.8’de optimum baca gazı sıcaklığındaki bazı gazların ısı kapasiteleri, Tablo 3.9’da ise baca gazlarına ait bileşenlerin molar kimyasal ekserjileri verilmiştir.

**Tablo 3. 8.** 101 kPa, 150 °C şartları için bazı gazların ısı kapasiteleri (Çomaklı, 2003).

| GAZLAR | $C_p^E$<br>(kJ/kmol · K) |
|--------|--------------------------|
| $CO_2$ | 6,82                     |
| $H_2O$ | 5,52                     |
| $SO_2$ | 7,04                     |
| $O_2$  | 4,86                     |
| $N_2$  | 4,87                     |

**Tablo 3.9.** Baca gazı bileşenlerinin molar standart kimyasal ekserjileri (Filiz, 2012).

| Baca Gazı Bileşenleri | Standart Molar Kimyasal Ekserjisi<br>(kJ/kmol) ( $\epsilon^0$ ) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $CO_2$                | 20140                                                           |
| $H_2O$                | 11710                                                           |
| $O_2$                 | 3970                                                            |
| $N_2$                 | 720                                                             |
| $SO_2$                | 303500                                                          |

- Kızgın suyun ekserjisi ( $\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}$ ):

$$\begin{aligned}\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG} &= \dot{m}_s \left[ C_{ps}(T_{Sç} - T_{sg}) - T_0 C_{ps} \ln \frac{T_{Sç}}{T_{sg}} \right] & (3.19) \\ &= 240037065 \cdot \left[ 4,18 \cdot (383,15 - 363,15) - 291,15 \cdot 4,18 \cdot \ln \frac{383,15}{363,15} \right] \\ &= 4404176534 \text{ kJ/yıl}\end{aligned}$$

- Kazanda oluşan toplam tersinmezlikler ( $\sum_i \dot{I}_i$ ):

$$\begin{aligned}\dot{I}_T &= \dot{m}_y \cdot \phi \cdot H_u - \dot{m}_s \cdot C_{ps} \left[ (T_{Sç} - T_{sg}) - T_0 \ln \frac{T_{Sç}}{T_{sg}} \right] & (3.20) \\ &= (500000 \cdot 1,07 \cdot 42650) - (240037065 \\ &\quad \cdot 4,18) \left[ (383,15 - 363,15) - 291,15 \cdot \ln \frac{383,15}{363,15} \right] \\ &= 1,841 \cdot 10^{10} \text{ kJ/yıl}\end{aligned}$$

veya,

$$\dot{E}_{X,Y} = (\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}) + \dot{E}_{X,K} + \dot{E}_{X,B} + \sum_i \dot{I}_i \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_T &= \dot{E}_{X,Y} - (\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}) - \dot{E}_{X,K} - \dot{E}_{X,B} & (3.22) \\ &= 2,282 \cdot 10^{10} - 4404176534 - 5153440 - 188339 \\ &= 1,841 \cdot 10^{10} \text{ kJ/yıl}\end{aligned}$$

- Kazanın Enerji ve Ekserji verimleri:

Kazanın enerji verimi;

$$\begin{aligned}\eta_i &= \frac{\dot{m}_s \cdot C_{ps}(T_{Sç} - T_{sg})}{\dot{m}_y \cdot H_u} & (3.23) \\ &= \frac{240037065 \cdot 4,18 \cdot (383 - 363)}{500000 \cdot 42650} = 0,94 = \%94\end{aligned}$$

Kazanın ekserji verimi;

$$\eta_u = \Psi = \frac{\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}}{\dot{E}_{X,Y}} = 1 - \frac{\dot{I}_T}{\dot{E}_{X,Y}} \quad (3.24)$$

$$= 1 - \frac{1,841 \cdot 10^{10}}{2,282 \cdot 10^{10}} = 0,193 = \%19,3$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda aşağıdaki tablolar oluşturulmuştur. Hava fazlalık katsayısındaki değişimler ve baca gazı sıcaklığındaki değişimlere göre oluşturulan tablolarda enerji ve ekserji verimlerindeki değişimler incelenmiştir. Tablo 3.10. ve 3.11.'de hava fazlalık katsayısına göre yakıt bileşenlerinin kütleli ve molar oranları hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 3.10.'da baca gazı özgül ısıları verilmiştir. Tablo 3.12.'den Tablo 3.16.'ya kadar hava fazlalık katsayılarına göre farklı baca gazı sıcaklıklarındaki enerji verimleri hesaplanmıştır. Tablo 3.17.'de her bir baca gazı bileşeninin farklı sıcaklıklardaki ekserjetik ısı kapasiteleri verilmiştir. Tablo 3.18.'den Tablo 3.21.'e kadar hava fazlalık katsayılarına göre farklı sıcaklıklardaki ekserji verimi ve suyun debisine ait hesaplamalar yapılmıştır.

**Tablo 3. 10.** Hava fazlalık katsayısına göre yakıt bileşenlerinin kütleli oranları ve baca gazı özgül ısı değerleri (Orijinal).

| HFK<br>(λ) | Kütleli Duman Gazı<br>Miktarı<br>$V_{KDF}(kg/500 \text{ ton yakıt})$ | Duman Gazları Kütleli Oranları |            |            |           |           | Baca<br>Gazı<br>Özgül<br>Isısı<br>$C_{pb}(kJ/kg \cdot K)$ |
|------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------------------------------------------------------|
|            |                                                                      | $y_{CO_2}$                     | $y_{H_2O}$ | $y_{SO_2}$ | $y_{O_2}$ | $y_{N_2}$ |                                                           |
| 1,0        | 7191340                                                              | 0,214                          | 0,069      | 0,0018     | 0         | 0,715     | 1,090                                                     |
| 1,1        | 7861160                                                              | 0,196                          | 0,063      | 0,0017     | 0,020     | 0,720     | 1,086                                                     |
| 1,2        | 8530880                                                              | 0,181                          | 0,058      | 0,0016     | 0,037     | 0,723     | 1,082                                                     |
| 1,3        | 9200640                                                              | 0,167                          | 0,054      | 0,0015     | 0,051     | 0,726     | 1,077                                                     |
| 1,4        | 9870460                                                              | 0,156                          | 0,050      | 0,0014     | 0,063     | 0,729     | 1,073                                                     |
| 1,5        | 10540280                                                             | 0,146                          | 0,047      | 0,0013     | 0,074     | 0,732     | 1,071                                                     |

**Tablo 3. 11.** Hava fazlalık katsayısına göre yakıt bileşenlerinin molar oranları (Orijinal).

| HFK<br>( $\lambda$ ) | Duman Gazı Miktarı<br>$V_{DF}(\text{kmol}/500 \text{ ton yakıt})$ | Duman Gazları Hacimsel Oranları |            |            |           |           |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
|                      |                                                                   | $X_{CO_2}$                      | $X_{H_2O}$ | $X_{SO_2}$ | $X_{O_2}$ | $X_{N_2}$ |
| 1,0                  | 246385                                                            | 0,142                           | 0,112      | 0,0008     | 0         | 0,745     |
| 1,1                  | 269610                                                            | 0,130                           | 0,102      | 0,0007     | 0,018     | 0,749     |
| 1,2                  | 292830                                                            | 0,120                           | 0,094      | 0,001      | 0,033     | 0,753     |
| 1,3                  | 316055                                                            | 0,111                           | 0,087      | 0,0006     | 0,046     | 0,755     |
| 1,4                  | 339280                                                            | 0,103                           | 0,081      | 0,0006     | 0,058     | 0,758     |
| 1,5                  | 362505                                                            | 0,097                           | 0,076      | 0,0005     | 0,067     | 0,760     |

**Tablo 3. 12.** 120 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi (Orijinal).

| $T_b = 120 \text{ °C} = 393,15 \text{ K}$ |                    |                              |                                |                                             |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| HFK<br>( $\lambda$ )                      | $E_b \text{ (kj)}$ | $\dot{m}_s \text{ (kg/yıl)}$ | $\Delta\dot{E}_s \text{ (kj)}$ | Kazan Enerji Verimi<br>$\eta_l \text{ (%)}$ |
| 1,0                                       | 799533181          | 244947692                    | 20477627051                    | 96,0                                        |
| 1,1                                       | 870796416          | 244095261                    | 20406363820                    | 95,6                                        |
| 1,2                                       | 941502040          | 243249500                    | 20335658200                    | 95,3                                        |
| 1,3                                       | 1010727107         | 242421449                    | 20266433136                    | 95,0                                        |
| 1,4                                       | 1080282365         | 241589448                    | 20196877853                    | 94,7                                        |
| 1,5                                       | 1151441268         | 240738265                    | 20125718954                    | 94,3                                        |

**Tablo 3. 13.** 130 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi (Orijinal).

| $T_b = 130 \text{ °C} = 403,15 \text{ K}$ |                    |                              |                                |                                             |
|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
| HFK<br>( $\lambda$ )                      | $E_b \text{ (kj)}$ | $\dot{m}_s \text{ (kg/yıl)}$ | $\Delta\dot{E}_s \text{ (kj)}$ | Kazan Enerji Verimi<br>$\eta_l \text{ (%)}$ |
| 1,0                                       | 877918787          | 244010065                    | 20399241434                    | 95,6                                        |
| 1,1                                       | 956168613          | 243074063                    | 20320991667                    | 95,2                                        |
| 1,2                                       | 1033806162         | 242145384                    | 20243354102                    | 94,9                                        |
| 1,3                                       | 1109817999         | 241236151                    | 20167342224                    | 94,5                                        |
| 1,4                                       | 1186192401         | 240322582                    | 20090967855                    | 94,2                                        |
| 1,5                                       | 1264327667         | 239387949                    | 20012832536                    | 93,8                                        |

**Tablo 3. 14.** 140 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi (Orijinal).

| <b><math>T_b = 140\text{ °C} = 413,15\text{ K}</math></b> |                              |                                        |                                          |                                                            |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>HFK<br/>(<math>\lambda</math>)</b>                     | <b><math>E_b</math> (kJ)</b> | <b><math>\dot{m}_s</math> (kg/yıl)</b> | <b><math>\Delta\dot{E}_s</math> (kJ)</b> | <b>Kazan Enerji<br/>Verimi<br/><math>\eta_l</math> (%)</b> |
| 1,0                                                       | 956304393                    | 243072438                              | 20320855817                              | 95,2                                                       |
| 1,1                                                       | 1041540811                   | 242052864                              | 20235619430                              | 94,8                                                       |
| 1,2                                                       | 1126110284                   | 241041267                              | 20151049921                              | 94,4                                                       |
| 1,3                                                       | 1208908892                   | 240050854                              | 20068251394                              | 94,1                                                       |
| 1,4                                                       | 1292102437                   | 239055715                              | 19985057774                              | 93,7                                                       |
| 1,5                                                       | 1377214065                   | 238037634                              | 19899946202                              | 93,3                                                       |

**Tablo 3. 15.** 150 °C Baca gazı sıcaklığında kazan enerji verimi (Orijinal).

| <b><math>T_b = 150\text{ °C} = 423,15\text{ K}</math></b> |                              |                                        |                                          |                                                            |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>HFK<br/>(<math>\lambda</math>)</b>                     | <b><math>E_b</math> (kJ)</b> | <b><math>\dot{m}_s</math> (kg/yıl)</b> | <b><math>\Delta\dot{E}_s</math> (kJ)</b> | <b>Kazan Enerji<br/>Verimi<br/><math>\eta_l</math> (%)</b> |
| 1,0                                                       | 1034689999                   | 242134812                              | 20242470283                              | 94,9                                                       |
| 1,1                                                       | 1126913008                   | 241031666                              | 20150247278                              | 94,4                                                       |
| 1,2                                                       | 1218414405                   | 239937151                              | 20058745824                              | 94,0                                                       |
| 1,3                                                       | 1307999785                   | 238865556                              | 19969160482                              | 93,6                                                       |
| 1,4                                                       | 1398012473                   | 237788849                              | 19879147776                              | 93,2                                                       |
| 1,5                                                       | 1490100464                   | 236687318                              | 19787059785                              | 92,7                                                       |

**Tablo 3. 16.** Hava fazlalık katsayısına göre kazan enerji verimi (Orijinal).

| <b>HFK (<math>\lambda</math>) = 1, 2</b>              |                              |                                        |                                          |                                                            |
|-------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Baca gazı<br/>sıcaklığı / <math>T_b</math> (K)</b> | <b><math>E_b</math> (kJ)</b> | <b><math>\dot{m}_s</math> (kg/yıl)</b> | <b><math>\Delta\dot{E}_s</math> (kJ)</b> | <b>Kazan Enerji<br/>Verimi<br/><math>\eta_l</math> (%)</b> |
| 393,15 (120 °C)                                       | 941502040                    | 243249500                              | 20335658200                              | 95,4                                                       |
| 403,15 (130 °C)                                       | 1033806162                   | 242145384                              | 20243354102                              | 94,9                                                       |
| 413,15 (140 °C)                                       | 1126110284                   | 241041267                              | 20151049921                              | 94,5                                                       |
| 423,15 (150 °C)                                       | 1218414405                   | 239937151                              | 20058745824                              | 94,0                                                       |
| 433,15 (160 °C)                                       | 1310718527                   | 238833035                              | 19966441726                              | 93,6                                                       |

**Tablo 3. 17.** Her Bir Baca Gazının Ekserjetik Isı Kapasitesi ( $C_p^E$ ).

| Baca Gazı Sıcaklıkları (K) | Her Bir Baca Gazının Ekserjetik Isı Kapasitesi ( $C_p^E$ )<br>(kJ/kmol · K) |                |                |               |               |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
|                            | $C_{P,CO_2}^E$                                                              | $C_{P,H_2O}^E$ | $C_{P,SO_2}^E$ | $C_{P,O_2}^E$ | $C_{P,N_2}^E$ |
| 393,15 (120 °C)            | 5,21                                                                        | 4,48           | 5,54           | 3,96          | 3,85          |
| 403,15 (130 °C)            | 5,70                                                                        | 4,88           | 6,06           | 4,32          | 4,19          |
| 413,15 (140 °C)            | 6,16                                                                        | 5,25           | 6,54           | 4,64          | 4,50          |
| 423,15 (150 °C)            | 6,82                                                                        | 5,52           | 7,04           | 4,86          | 4,87          |
| 433,15 (160 °C)            | 7,08                                                                        | 5,96           | 7,49           | 5,29          | 5,12          |

**Tablo 3. 18.** 150 °C Sıcaklıktaki baca gazı ekserji değerleri (Orijinal).

| $T_b = 150\text{ °C} = 423,15\text{ K}$<br>$T_o = 18\text{ °C} = 291,15\text{ K}$ |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| HFK ( $\lambda$ )                                                                 | $\dot{E}_{X,B}$ (kJ) |
| 1,1                                                                               | 196178               |
| 1,2                                                                               | 188339               |
| 1,3                                                                               | 171206               |
| 1,4                                                                               | 163188               |
| 1,5                                                                               | 156304               |

**Tablo 3. 19.** Baca gazı sıcaklıklarına göre baca gazı ekserji değerleri (Orijinal).

| HFK ( $\lambda$ )=1,2      |                      |
|----------------------------|----------------------|
| Baca Gazı Sıcaklıkları (K) | $\dot{E}_{X,B}$ (kJ) |
| 393,15 (120 °C)            | 172760               |
| 403,15 (130 °C)            | 177537               |
| 413,15 (140 °C)            | 182525               |
| 423,15 (150 °C)            | 188339               |
| 433,15 (160 °C)            | 193653               |

**Tablo 3. 20.** Hava fazlalık katsayısına göre kazan ekserji verimi (Orijinal).

| <b><math>T_b = 150\text{ }^\circ\text{C} = 423,15\text{ K}</math></b> |                                                         |                                                                                       |                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>HFK<br/>(<math>\lambda</math>)</b>                                 | <b>Suyun debisi<br/><math>\dot{m}_s</math> (kg/yıl)</b> | <b>Kızgın suyun ekserjisi<br/>(<math>\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}</math>) (kJ)</b> | <b>Kazan Ekserji Verimi<br/><math>\eta_u</math> (%)</b> |
| 1,0                                                                   | 242134812                                               | 4444515793                                                                            | 19,5                                                    |
| 1,1                                                                   | 241031666                                               | 4424266950                                                                            | 19,4                                                    |
| 1,2                                                                   | 239937151                                               | 4404176534                                                                            | 19,3                                                    |
| 1,3                                                                   | 238865556                                               | 4384506826                                                                            | 19,2                                                    |
| 1,4                                                                   | 237788849                                               | 4364743285                                                                            | 19,1                                                    |
| 1,5                                                                   | 236687318                                               | 4344524086                                                                            | 19,0                                                    |

**Tablo 3. 21.** Baca gazı sıcaklıklarına göre kazan ekserji verimi (Orijinal).

| <b>HFK (<math>\lambda</math>) = 1, 2</b>                  |                                                         |                                                                                       |                                                         |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Baca gazı<br/>sıcaklığı / <math>T_b</math><br/>(K)</b> | <b>Suyun debisi<br/><math>\dot{m}_s</math> (kg/yıl)</b> | <b>Kızgın suyun ekserjisi<br/>(<math>\dot{E}_{X,SÇ} - \dot{E}_{X,SG}</math>) (kJ)</b> | <b>Kazan Ekserji Verimi<br/><math>\eta_u</math> (%)</b> |
| 393,15 (120 °C)                                           | 243249500                                               | 4464976496                                                                            | 19,6                                                    |
| 403,15 (130 °C)                                           | 242145384                                               | 4444709848                                                                            | 19,5                                                    |
| 413,15 (140 °C)                                           | 241041267                                               | 4424443182                                                                            | 19,4                                                    |
| 423,15 (150 °C)                                           | 239937151                                               | 4404176534                                                                            | 19,3                                                    |
| 433,15 (160 °C)                                           | 238833035                                               | 4383909886                                                                            | 19,2                                                    |

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışmada Munzur Üniversitesi ısı merkezinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Sistemde bulunan kazan, yakıt, kızgın su komponentleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu komponentlerin mevcut çalışma şartlarında alınan sonuçlar yardımı ile farklı çalışma şartlarındaki sistem durumu incelenmiştir.

Üniversitemize ait ısı merkezinde bulunan kazanlar, kasım 2017-mayıs 2018 tarihleri arasındaki ısıtma sezonunda 166 gün çalışmıştır. Bu süre içerisinde toplam 500 ton fuel –oil (özel kalorifer yakıtı) tüketilmiştir. Kullanılan yakıtta ait özellikler kaynaklardan alınmış olup, Tablo 4.1. de verilmiştir.

**Tablo 4. 1.** Yakıtın kütleli analizi (Çomaklı, 2003).

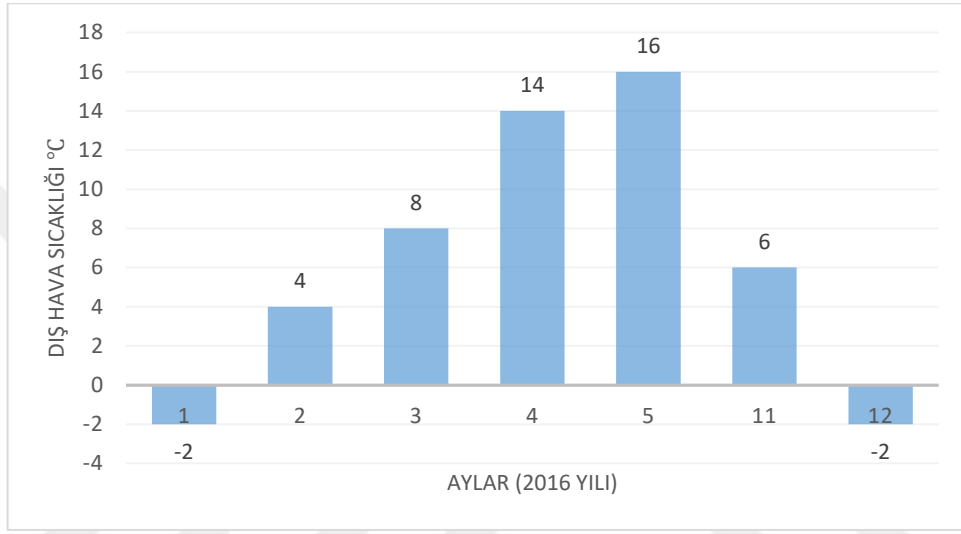
| C  | H  | O   | N    | S    | Hu    | Ex    |
|----|----|-----|------|------|-------|-------|
| %  | %  | %   | %    | %    | kJ/kg | kJ/kg |
| 84 | 11 | 1,1 | 2,55 | 1,35 | 42650 | 45458 |

Üniversitemiz ısıtma merkezinde dış hava şartlarına göre kızgın su sıcaklığını ayarlamak için Tablo 4.2. deki değerler kullanılmıştır. Bu değerlere göre kazan yakma işlemleri gerçekleştirildiğinden havanın sıcak olduğu zamanlarda gereğinden fazla yakıt yakılmasının önüne geçilmiştir. Ancak kazan günlük işletme kartı kullanılmadığından sistemde verilerle ilgili olarak sorunlar oluşmaktadır. Isıtma merkezinde kazan günlük işletme kartı kullanılmadığından dolayı gerekli verilere ulaşmak için günlük ölçümler yapılmıştır. Yapılan bu ölçümler doğrultusunda gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

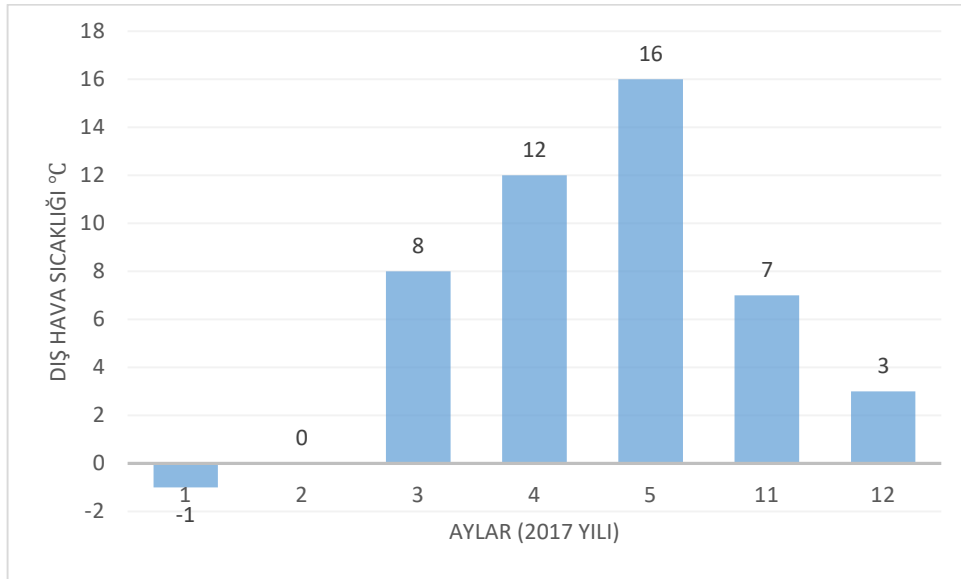
**Tablo 4. 2.** Kızgın sulu bölgesel ısıtma sistemi eşanjör sekonder devresi çıkış suyu sıcaklığının dış hava sıcaklığına göre ayar çizelgesi (Resmi gazete, 1999).

| Dış Hava Sıcaklığı (°C)   |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |    |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|----|
| 12                        | 11 | 10 | 9  | 8  | 7  | 6  | 5  | 4  | 3   | 2   | 1   | 0  |
| 45                        | 47 | 49 | 51 | 53 | 55 | 57 | 58 | 60 | 62  | 64  | 66  | 68 |
| Kazan Suyu Sıcaklığı (°C) |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |    |
| Dış Hava Sıcaklığı (°C)   |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |    |
| -1                        | -2 | -3 | -4 | -5 | -6 | -7 | -8 | -9 | -10 | -11 | -12 |    |
| 70                        | 72 | 73 | 75 | 77 | 79 | 81 | 83 | 84 | 86  | 88  | 90  |    |
| Kazan Suyu Sıcaklığı (°C) |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |    |

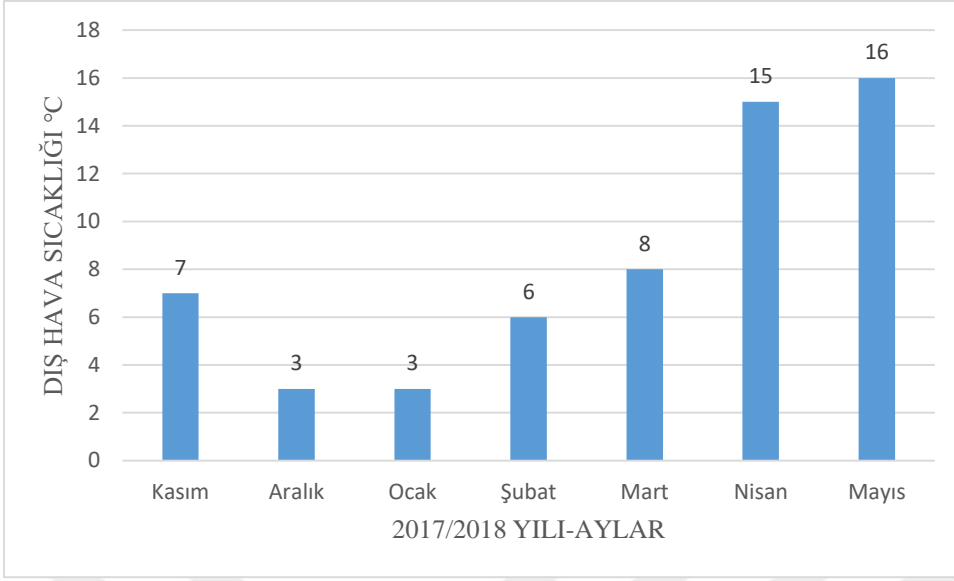
Şekil 4.1., 4.2., ve 4.3.'te dış hava sıcaklıkları ve şekil 4.4.'te dış hava sıcaklıklarına göre aylık ortalama yakıt tüketim değerleri gösterilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı gibi yakıt tüketim değerleri dış hava sıcaklıklarına göre değişim göstermektedir. Yapılan enerji ve ekserji hesaplamalarında bu veriler kullanılmıştır.



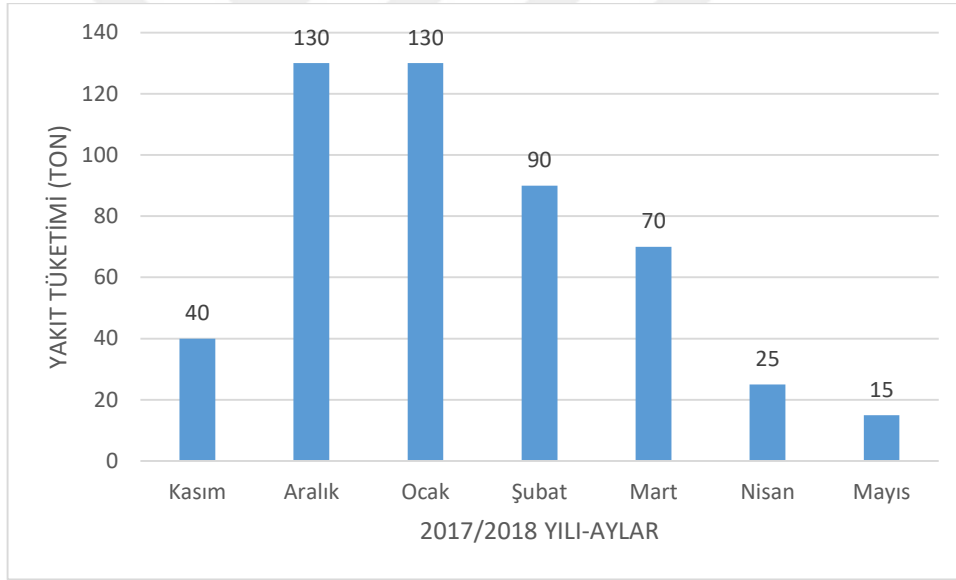
Şekil 4. 1. 2016 yılına ait dış hava sıcaklık ortalamalarının aylara göre değişimi (Orijinal).



Şekil 4. 2. 2017 yılına ait dış hava sıcaklık ortalamalarının aylara göre değişimi (Orijinal).

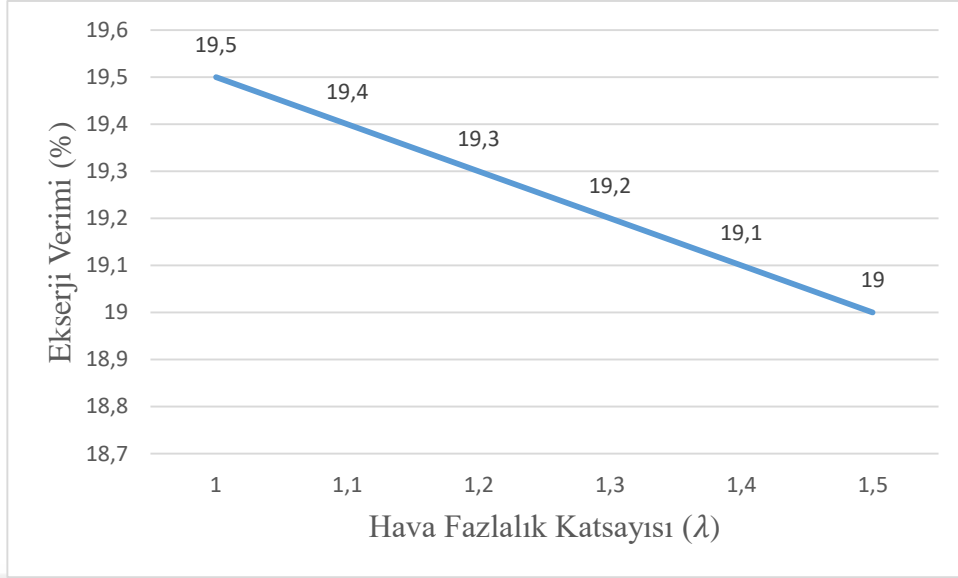


Şekil 4. 3. 2017-2018 yılı ısıtma dönemine ait aylık ortalama dış hava sıcaklıkları (Orijinal).

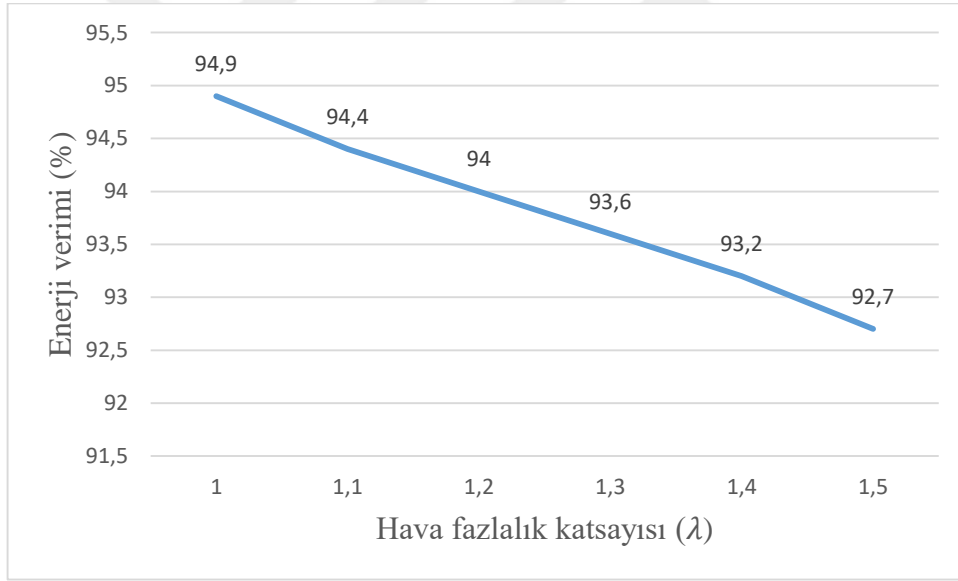


Şekil 4. 4. 2017-2018 yılı ısıtma dönemine ait aylık ortalama yakıt tüketimi (Orijinal).

Kazanlardaki enerji ve ekserji verimine etki eden en önemli faktör hava fazlalık katsayısıdır. Şekil 4.5., 4.6.'da kazanlarda enerji ve ekserji verimleri, hava fazlalık katsayısında meydana gelen artış ile azalmaktadır. Bu da, kazanlardaki yanma olaylarının minimum düzeyde hava fazlalık katsayısı ile gerçekleşmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

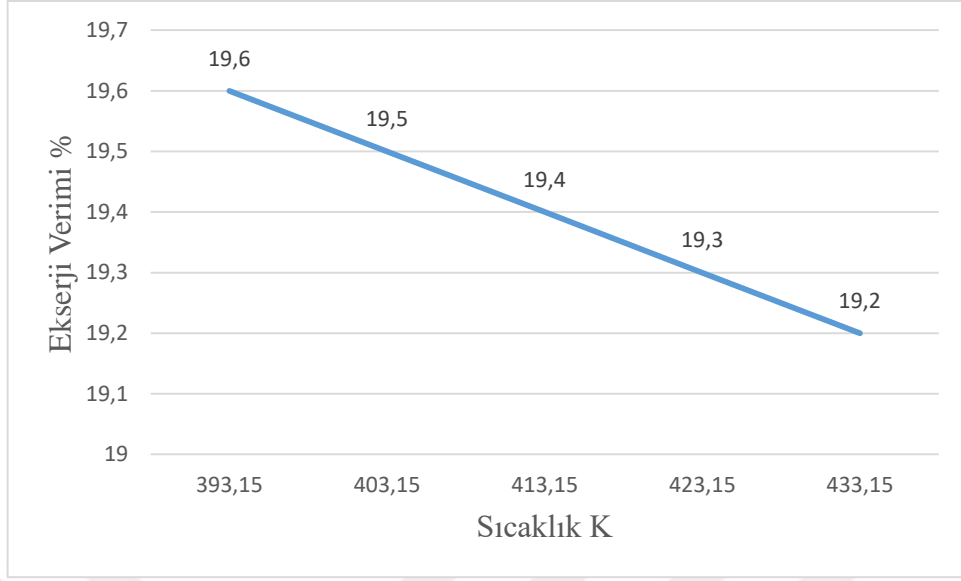


Şekil 4. 5. Hava fazlalık katsayısına göre ekserji verimi değişimi (Orijinal).

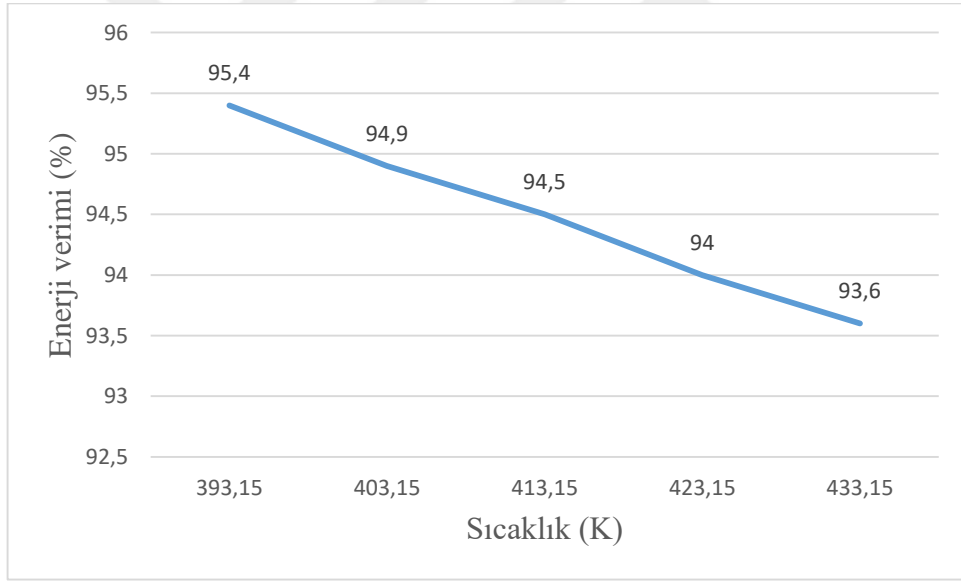


Şekil 4. 6. Hava fazlalık katsayısına göre enerji verimi değişimi (Orijinal).

Kazanlarda verimlere etki eden diğer bir faktör ise baca gazı sıcaklığıdır. Baca gazı sıcaklığı arttıkça ekserji kayıpları da artmaktadır. Sistemde baca gazı sıcaklığından yararlanılmadığından yüksek baca gazı sıcaklığı önemli ölçüde verim düşmesine sebep olmaktadır. Şekil 4.7.ve 4.8.'de baca gazı sıcaklığına göre enerji ve ekserji verimlerindeki değişim gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi baca gazı sıcaklığı yükseldikçe enerji ve ekserji verimlerinde azalma meydana gelmektedir.



Şekil 4. 7. Baca gazı sıcaklıklarına göre ekserji verimi değişimi (Orijinal).



Şekil 4. 8. Baca gazı sıcaklıklarına göre enerji verimi değişimi (Orijinal).

## 5. SONUÇLAR

Bölgemizde enerji tüketiminin büyük bir kısmı konut ısıtmasında kullanılmaktadır. Munzur Üniversitesi ısıtma merkezinde yaptığımız inceleme ve araştırma çalışmaları doğrultusunda yaklaşık olarak 500 ton yakıt harcanmakta ve üniversite bütçesinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi değerlendirilebilir.

- Isıtma sisteminde dış hava şartlarına bağlı olarak yakıt tüketiminin düzenli olarak değişimini sağlayacak dinamik otomatik kontrol sisteminin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Mevcut durumda otomasyon sistemi kullanılmakta olup, bu kontrol sisteminin dinamik değişimleri karşılamaması söz konusudur. Isıtma merkezinde kurulu olan otomasyon sistemi sadece dış hava şartlarını gösterebilen ve bu göstergelere dayalı olarak otomatik bir kontrol sağlayan pasif bir sistemdir. Dolayısıyla yakıt kontrolü yetkili kişilerce manuel olarak yapılmaktadır. Bu durum yakıt tüketiminin beşeri bir düzensizlik içinde olmasını sağlayacağından enerji ve ekserji verimlerinde düşüşe yol açacaktır. Bu faktörlerden dolayı maliyet yükselmesi ile karşı karşıya kalacaktır.

- Sistemde enerji ve ekserji açısından en önemli komponent kazanlardır. Kazanlarda yakıtın fazla hava ile yanması enerjinin önemli bir kısmının gereksiz yere baca gazları ile atmosfere atılmasını sağlayacaktır. Bu ise istenmeyen bir durumdur. Sistemin optimum hava fazlalık katsayısı ile çalışması durumunda enerji veriminde %1,3 ve ekserji veriminde ise %0,3 'lük bir artış olacağı hesaplanmıştır. Bu, yılda yaklaşık olarak 7 ton kalorifer yakıtının tasarruf edileceği, başka bir deyişle bir ısıtma sezonu boyunca yaklaşık olarak 25.000 TL tasarruf sağlanacağı ortaya çıkmıştır. Bu miktar sadece ısı merkezinde yapılan tasarruf olarak değerlendirildiğinde, tüm sistem dikkate alındığında miktarın çok daha fazla olacağı göz önüne alınmalıdır (Kalorifer yakıt fiyatı 2018 yılı petrol ofisi güncel akaryakıt fiyat listeleri baz alınarak hesaplanmıştır).

- Üçüncü bölümde baca gazı sıcaklıkları ile ilgili yapılan ölçümler neticesinde grafik oluşturulmuştur. Grafiğe göre baca gazı sıcaklıkları sürekli değişkenlik göstermektedir. Yapılan ölçümler neticesinde optimum baca gazı sıcaklığı olan 150 °C sabit tutulmamakla birlikte çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklar ölçülmüştür.

Yakıt enerjisinin % 5,7'si baca gazları ile dışarı atılmaktadır. Bu oranın optimum seviyeye çekilebilmesi için iyileştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir.

## 6. ÖNERİLER

### - Baca Gazı Analizörü Kullanılması

Yakıt tüketiminin yüksek değerlere ulaştığı büyük kapasiteli kazanlarda, verimin kontrolü büyük önem taşımaktadır. Bu iş için tam otomatik mikro modülasyonlu yakma yönetim ve oksijen trim kontrol sistemleri geliştirilmiş bulunmaktadır. Bu sistem ile baca analizleri sürekli ve otomatik olarak yapılmakta,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  ve baca gazı sıcaklığı gibi baca gazı parametreleri ile yanma verimi sürekli izlenmektedir. Ayrıca bu sistem ile tüm veriler kayıt altında olacağından gerek kontrol açısından gerekse ekonomik açıdan şeffaf bir süreç gelişecektir.

### - Ekonomizer Kullanılması

Kazanda baca gazları ile birlikte önemli oranda enerji kullanılmadan atmosfere bırakılmaktadır. Özellikle baca gazı sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda bu oran daha da yüksek olacaktır. Bu olumsuz durumu gidermek için yüksek baca gazı sıcaklığından faydalanılacak bir sistemin kurulması gerekecektir. Normal şartlarda da baca gazı sıcaklığının, optimum değer olarak kabul edilen  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düşmemesi gerekmektedir. Bunun nedeni ise baca gazı içerisinde bulunan  $SO_2$  ve  $H_2O$  bileşenleridir. Bu bileşenler düşük sıcaklıklarda kimyasal reaksiyona girerek sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) oluşturmakta ve bunun sonucu olarak da kazanlarda korozyondan dolayı istenmeyen tahribatlar meydana gelmektedir.

Yukarıdaki açıklamalar neticesinde, enerji tasarrufu sağlamak adına sistemde ekonomizer kullanılması büyük önem taşımaktadır. Ekonomizerler, termal sistemlerde kazanlardan çıkıp bacaya giden duman gazları içerisinde bulunan ısının bir bölümünü geri kazanmak amacıyla kullanılan bir çeşit su borulu ısı eşanjörleridir.

Bacadan atmosfere atılacak olan baca gazlarından geri kazanılan ısı;

- Kazan besi suyuna verildiği zaman “Besi Suyu Ekonomizeri”,
- Kullanım suyuna verildiği zaman “Kullanım Suyu Ekonomizeri”,
- Brülör yakma havasını ön ısıtma ya da ortam havasını ısıtma amacıyla kullanıldığında “Hava Isıtıcı Ekonomizeri” adı verilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Arıcan, E.**, 2017. Bölgesel Isıtma Tarihçe ve Avrupa Uygulamaları. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 8. Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı, İstanbul, 11-12 Ocak.
- Akyol, T.**, 2006. Binaların Isı Yalıtımında Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Ballı, Ö.**, 2008. Kojenerasyon Sistemlerinin Enerji, Kullanılabilirlik (Ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Coşkun, C.**, 2007. Balıkesir İli Jeotermal Isıtma Sistemlerinin Enerjetik ve Ekserjetik Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Coşkun, V.**, 2006. Absorpsiyonlu Güneş Enerjili Sistemlerde Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çengel, Y., Boles M.A.**, 2012. Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla. Güven Yayınları, İstanbul.
- Çakmanus, İ.**, 2011. Düşük Enerjili Sistemler: Yüksek Performanslı Binalar ve Toplum. *Çakmanus Mühendislik Dergisi*, 6, Mart-Nisan.
- Çengel, Y.**, 2011. Isı ve Kütle Transferi-Pratik Bir Yaklaşım. Güven Yayınları, İzmir.
- Çomaklı, K., Karşlı, S., Yılmaz, M., Çomaklı, Ö.**, 2007. Termal Sistemlerde Ekserji Verimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2: 25-34.
- Çomaklı K., Yüksel B., Bakırcı, K.**, 2006. Bölgesel Isıtma Sistemleri Boru Hatlarında Meydana Gelen Enerji ve Ekserji Kayıpları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 91, 33-38.
- Çomaklı, K.**, 2003. Atatürk Üniversitesi Isıtma Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Doğan, V., Doğan İlhan, C.**, 2011. Kızgın Sulu Merkezi Isıtma Sistemleri, Sistemlerin Basınçlandırılması ve Genleşme Kabı Boyutu. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 126.
- Dilaver, Ö.**, 2010. Isı Değiştiricisi Kullanılmayan ve Güneş Enerjisi İle Çalışan Bir Su Isıtma Sisteminin Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dilek, M.**, 2007. Bir Lise Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Dincer, I., Rosen, M.A.,** 2004. Exergy as a Driver for Achieving Sustainability. *International Journal of Green Energy*, 1: 1-19.
- Ergün, A.,** 2010. 80 000 m<sup>2</sup>'lik Isıtma Soğutma İhtiyacı Olan Bir Alışveriş Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Filiz, Ç.,** 2012. Bir Buhar Kazanının Enerji ve Ekserji Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Güngör, A.,** 2013. Bir Kombine Çevrim Santralının Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Hepbaşlı, A., Özgener, L.,** 2003. HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliği ve Uygulamaları. *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 8-11 Ekim.
- Hepbaşlı, A.,** 2001. Sanayide Enerji Yönetimi Programlarının Temelleri. *Termoklima dergisi*, 106: 63-76.
- Hepbaşlı, A., Günerhan, H., Ülgen, K.,** 2001. Enerji Yönetim Sisteminin Altın Anahtarları: Enerji Denkliği ve Enerji Tasarrufu Etüdü. *V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 3-6 Ekim.
- Işık, E., Tuğan, V.,** 2017. Tunceli, Hakkari ve Kars İllerinin Optimum Isı Yalıtım Kalınlığının Hesaplanması. *İjpas Dergisi*, 3(2): 50-57.
- Karakoç, H., Karakoç, N., Erbay, B., Aras, H.,** 2012. Enerji Analizi. Anadolu Üniversitesi Web-Ofset Tesisleri, Eskişehir.
- Koçyiğit, E.,** 2004. Kayseri Şeker Fabrikası Şeker Üretim Proseslerinde Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özdemir, E.,** 2017. Bir Gaz Türbini Çevriminin Termodinamik Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Özsoy, A.,** 2005. Isıtma Sistemlerinden Isı Geri Kazanımında Isı Borularının Uygulanabilirliği, Ekserji ve Ekonomik Analizi. *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Patlar, Ö.,** 2006. Toprak Kaynaklı Isı Pompalarında Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.P.,** Ham Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu (2017). Yayın no: Mayıs 2017, Ankara, 2017.
- Tetik, T.,** 2011. Doğalgaz Yakıtlı Bireysel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Terhan, M.,** 2010. Atatürk Üniversitesi Isıtma Sistemi Kazan Bacalarında Isı Geri Kazanım Potansiyelinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Topaç, B.**, 2008. Kimyasal Ekserji Hesaplama Yöntemlerinin Petrol Türevi Hafif Yakıtlara Uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL-1**, 2018. [www.eralpkazan.com/ekonomizerler.html](http://www.eralpkazan.com/ekonomizerler.html) ekonomizerler. 12 mart 2018.
- URL-2**, 2018. [www.termodinamik.info/teknik/ekonomizerler](http://www.termodinamik.info/teknik/ekonomizerler). 02 nisan 2018.
- URL-3**, 2018. [www.arge7.com/](http://www.arge7.com/) makaleler 1 / Kazanlarda Enerji Verimliliği. 12 nisan 2018.
- Ünal, F.**, 2009. Bir Termik Santralin Ekserji Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yüksel, B., Kon, O.**, 2015. Binaların Isı Merkezlerinde Bulunan Kalorifer Kazanlarının Yanma Havası ve Hava Fazlalık Katsayılarına Göre Yanma Gazlarının Özelliklerindeki Değişim. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(2): 15-27.
- Yazıcı, H., Selbaş, R.**, 2011. Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Selçuk Teknik Dergisi, 10(1).
- Yalçın, H.**, 2005. Balıkesir İl Merkezinde Isıtma Sektöründe Kullanılan Yakıtların Enerji ve Ekserji Analizleri ve Çevresel Etkiler. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

## 8. EKLER

**Ek Tablo 1. 1.** Baca Gazları için  $C_p^e$  Değerleri (Çomaklı, 2003).

| Baca Gazları İçin $C_p^e$ Değerleri ( $T_0 = 298.15 K, P_0 = 101.325 kPa$ ) |        |        |        |        |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Sıcaklık (K)                                                                | $CO_2$ | $H_2O$ | $SO_2$ | $O_2$  | $N_2$ |
| 300                                                                         | 0.124  | 0.112  | 0.133  | 0.0982 | 0.097 |
| 350                                                                         | 3.015  | 2.645  | 3.218  | 2.330  | 2.281 |
| 400                                                                         | 5.562  | 4.767  | 5.909  | 4.215  | 4.094 |
| 450                                                                         | 7.845  | 6.589  | 8.299  | 5.843  | 5.636 |
| 500                                                                         | 9.916  | 8.186  | 10.44  | 7.272  | 6.973 |
| 550                                                                         | 11.81  | 9.607  | 12.39  | 8.544  | 8.150 |
| 600                                                                         | 13.56  | 10.88  | 14.18  | 9.687  | 9.201 |
| 650                                                                         | 15.18  | 12.06  | 15.82  | 10.72  | 10.15 |
| 700                                                                         | 16.69  | 13.13  | 17.33  | 11.67  | 11.01 |
| 750                                                                         | 18.11  | 14.14  | 18.74  | 12.54  | 11.80 |
| 800                                                                         | 19.43  | 15.07  | 20.05  | 13.35  | 12.54 |
| 850                                                                         | 20.68  | 15.96  | 21.27  | 14.10  | 13.23 |
| 900                                                                         | 21.85  | 16.80  | 22.40  | 14.80  | 13.87 |
| 950                                                                         | 22.96  | 17.59  | 23.47  | 15.46  | 14.47 |
| 1000                                                                        | 24.00  | 18.38  | 24.47  | 16.07  | 15.04 |

**Ek Tablo 1. 2.** Çeşitli gazlar için özgül ısı katsayıları (Çengel ve Boles, 2012).

| GAZ            | a                                                          | b                        | c                        | d                        |
|----------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Azot           | 28.900                                                     | $-0.157 \times 10^{-2}$  | $0.8081 \times 10^{-5}$  | $-2.873 \times 10^{-9}$  |
| Oksijen        | 25.480                                                     | $1.52000 \times 10^{-2}$ | $-0.7155 \times 10^{-5}$ | $1.312 \times 10^{-9}$   |
| Hava           | 28.110                                                     | $0.19670 \times 10^{-2}$ | $0.4842 \times 10^{-5}$  | $-1.966 \times 10^{-9}$  |
| Karbonmonoksit | 28.160                                                     | $0.16750 \times 10^{-2}$ | $0.5372 \times 10^{-5}$  | $-2.222 \times 10^{-9}$  |
| Karbondioksit  | 22.260                                                     | $5.98100 \times 10^{-2}$ | $-3.501 \times 10^{-5}$  | $7.469 \times 10^{-9}$   |
| Su buharı      | 32.340                                                     | $0.19230 \times 10^{-2}$ | $1.055 \times 10^{-5}$   | $-3.595 \times 10^{-9}$  |
| Kükürtdioksit  | 25.780                                                     | $5.7950 \times 10^{-2}$  | $-3.812 \times 10^{-5}$  | $8.612 \times 10^{-9}$   |
| Hidrojen       | 29.110                                                     | $-0.1916 \times 10^{-2}$ | $0.4003 \times 10^{-5}$  | $-0.8704 \times 10^{-9}$ |
|                | $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \text{ kJ/kmol} \cdot K$ |                          |                          |                          |

**Ek Tablo 1. 3.** Çeşitli malzemelerin yayma katsayıları (Çengel ve Boles, 2012).

| <b>Malzeme</b>              | <b>Yayıcılık</b> |
|-----------------------------|------------------|
| Alüminyum folyo             | 0.07             |
| Anodize alüminyum           | 0.82             |
| Parlatılmış bakır           | 0.03             |
| Parlatılmış altın           | 0.03             |
| Parlatılmış gümüş           | 0.02             |
| Parlatılmış paslanmaz çelik | 0.17             |
| Siyah boya                  | 0.98             |
| Beyaz boya                  | 0.90             |
| Beyaz kağıt                 | 0.92-0.97        |
| Asfalt döşeme               | 0.85-0.93        |
| Kırmızı tuğla               | 0.93-0.96        |
| İnsan derisi                | 0.95             |
| Ağaç                        | 0.82-0.92        |
| Toprak                      | 0.93-0.96        |
| Su                          | 0.96             |
| Bitkiler                    | 0.92-0.96        |

## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Elazığ'da doğdu. Lise öğrenimini Tunceli Endüstri Meslek Lisesi Elektrik bölümünde tamamladı. 2009 yılında Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi / Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme alanından mezun oldu. 2014-2015 yılında Tunceli Üniversitesi Mühendislik fakültesi / Makine Mühendisliği bölümünü bitirdi. 2012 yılında Tunceli Namık Kemal Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine Tesisat Teknolojisi ve İklimlendirme öğretmeni olarak atandı. Halen aynı okulda görev yapmaktadır.

