

**BİR TERMİK SANTRALİN TERMÖEKONOMİK  
ANALİZİ**

**2012  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Cüneyt UYSAL**

**BİR TERMİK SANTRALİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

**Cüneyt UYSAL**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2012**

Cüneyt UYSAL tarafından hazırlanan “BİR TERMİK SANTRALİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hüseyin KURT

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/ 01/ 2012

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ziyaeddin RECEBLİ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Hüseyin KURT (KBÜ)

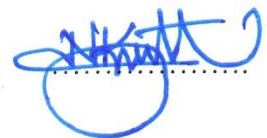
.....

...../...../2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Cüneyt UYSAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **BİR TERMİK SANTRALİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

**Cüneyt UYSAL**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Hüseyin KURT**

**Ocak 2012, 78 sayfa**

Bu çalışmada, Zonguldak Çatalağzı'nda kurulu bulunan 160 MW kapasiteli termik santralin ekserji ve termoeconomik analizi yapılarak performansı değerlendirilmiştir. Ekserji analizinde, sistem ve bileşenleri için ekserji verimleri, ekserji yıkımları ve iyileştirme potansiyelleri hesaplanmıştır. Termoeconomik analizde ise SPECO ve MOPSA metotları kullanılmış ve her iki metoda göre termik santralden üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti belirlenmiştir. Ekserji analizi sonucunda, sistemde en düşük ekserji verimine sahip ekipmanların sırasıyla %29.95 ile kondanser ve %33.24 ile kazan olduğu tespit edilmiş, sistemin toplam ekserji verimi ise %39.89 olarak bulunmuştur. Sistemde en yüksek ekserji yıkımının sırasıyla 166492.26 kW ile kazanda ve 11608.33 kW ile kondanserde meydana geldiği tespit edilmiştir. Sistemdeki toplam ekserji yıkımı ise 217773.65 kW olarak bulunmuştur. Sistemde, 111150.23 kW ile kazan ve 8131.64 kW ile kondanserin en yüksek iyileştirme potansiyeline sahip ekipmanlar olduğu belirlenmiştir. Sistemin toplam iyileştirme

potansiyeli ise 130903.74 kW olarak bulunmuştur. Santralde üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti, SPECO metoduna göre 12.14 \$/GJ olarak bulunurken, MOPSA metoduna göre ise 14.06 \$/GJ olarak bulunmuştur. Üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti için farklı sonuçlar elde edilmesinin nedenleri; her iki metodun farklı prensiplere sahip olması ve her iki metod için yapılması gereken farklı kabullerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Anahtar Sözcükler** : Termik santraller, ekserji analizi, termoekonomik analiz, SPECO metodu, MOPSA metodu.

**Bilim Kodu** : 914.1.131

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THERMOECONOMIC ANALYSIS OF A POWER PLANT**

**Cuneyt UYSAL**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc.Prof.Dr.Huseyin KURT**

**January 2012, 78 pages**

In this study, the performance of the power plant with 160 MW capacity located in Zonguldak Catalagzi was evaluated by performing exergy and thermoeconomics analysis. Exergy efficiencies, exergy destructions and improvement potentials for the system and its components were calculated in the exergy analysis. As for thermoeconomics analysis, SPECO and MOPSA methods were used and the unit exergy cost of electricity produced by plant was defined in respect to both methods. As a result of exergy analysis, it was determined that the equipments having minimum exergy efficiency in the system are the condenser with %29.95 and the boiler with %33.24 and the overall exergy efficiency of the system was found to be %39.89. It was determined that the highest exergy destruction in the system occurs in the boiler with 166492.26 kW and in the condenser with 11608.33 kW, respectively. The overall exergy destruction of the system was found to be 217773.65 kW. It was defined that the equipments having highest improvement potential in the system are

the boiler with 111150.23 kW and the condenser with 8131.64 kW. The overall improvement potential of the system was found to be 130903.74 kW. The unit exergy cost of electricity produced by plant was found to be 14.06 \$/GJ in respect to MOPSA, while it was found to be 12.14 \$/GJ in respect to SPECO. It is thought that the reasons of obtaining different results for the unit exergy cost electricity produced are result from that both methods have different principles and different assumptions are required for both methods.

**Key Word** : Power plants, exergy analysis, thermoeconomic analysis, SPECO methodology, MOPSA methodology

**Science Code** : 914.1.131



## TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım boyunca benden hibir yardımı esirgemeyen ve bu tezin ortaya çıkmasında en az benim kadar emeği bulunan danıŐmanım Sayın Doç.Dr. Hüseyin KURT'a,

Çalışmada yer alan kuvvet santralinin incelenmesinde ve kullanılan verilerin elde edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Fatih DİLAVER'e

Ülkesine davet etme nezaketini gösterip kendisiyle çalışma onurunu ve heyecanını yaşatan, tecrübeleriyle çalıŐmama ışık tutan ve her türlü yardımı esirgemeyen Chung-Ang Üniversitesi'nden Sayın Prof.Dr. Ho-Young KWAK'a,

Her zaman ve her konuda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım ArŐ.Gör. Hasan ÖZCAN, ArŐ.Gör. Abdullah UĞUR, ArŐ.Gör. Hüseyin ÇETİN ve ArŐ.Gör. Cihan MIZRAK'a

Bana her konuda manevi destek veren aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| KABUL.....  | ii                  |
| ÖZET.....   | iv                  |
| ABSTRACT.....                                       | vi                  |
| TEŞEKKÜR.....                                       | viii                |
| İÇİNDEKİLER .....                                   | ix                  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                | xii                 |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                             | xiii                |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                | xiv                 |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 1 .....                                       | 1                   |
| GİRİŞ .....   | 1                   |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 2 .....                                       | 4                   |
| LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....                            | 4                   |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 3 .....                                       | 9                   |
| TERMİK SANTRALLER .....                             | 9                   |
| 3.1. TERMİK SANTRALLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....      | 9                   |
| 3.2. TERMİK SANTRAL TASARIMI.....                   | 10                  |
| 3.3. TÜRKİYEDE TERMİK SANTRALLERİN DURUMU.....      | 11                  |
| <br>  |                     |
| BÖLÜM 4 .....                                       | 14                  |
| MATERYAL VE YÖNTEM .....                            | 14                  |
| 4.1. EKSERJİ ANALİZİ .....                          | 14                  |
| 4.1.1. Referans Çevrenin Tanımlanması.....          | 17                  |
| 4.2. KONTROL HACİMLERİ İÇİN DENGE DENKLEMLERİ ..... | 18                  |
| 4.2.1. Kütlelerin Korunumu .....                    | 19                  |

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 4.2.2. Enerjinin Korunumu .....   | 19                  |
| 4.2.3. Entropi Denge Denklemi .....   | 19                  |
| 4.2.4. Ekserji Denge Denklemi .....   | 20                  |
| 4.3. EKONOMİK ANALİZ .....  | 20                  |
| 4.3.1. Paranın Zaman Değeri .....   | 20                  |
| 4.3.2. Paranın Gelecekteki Değeri .....   | 20                  |
| 4.3.3. Paranın Şimdiki Değeri ve Şimdiki Değer Faktörü .....                                | 21                  |
| 4.3.4. Yıllık Ödemeler .....  | 21                  |
| 4.3.5. İlk Yatırım Maliyeti Geri Kazanım Faktörü .....                                      | 22                  |
| 4.3.6. Hurda Değer Hesabı .....   | 22                  |
| 4.3.7. Ekonomik Değerlerin Hesaplanması .....   | 22                  |
| 4.4. TERMOEKONOMİK ANALİZ .....   | 24                  |
| 4.4.1. Özgül Ekserji Maliyeti (SPECO) Metodu .....  | 25                  |
| 4.4.1.1. F ve P Kuralları .....   | 27                  |
| 4.4.2. Modifiye Edilmiş Üretim Yapısı Analizi (MOPSA) Metodu .....                          | 28                  |
| <br>BÖLÜM 5 .....   | <br>31              |
| TERMİK SANTRAL UYGULAMASI .....   | 31                  |
| 5.1. SİSTEMİN TANIMLANMASI .....  | 31                  |
| 5.1.1. Sistem Analizi İçin Yapılan Kabuller .....   | 33                  |
| 5.1.2. Yanma Tepkimesi .....  | 34                  |
| 5.2. SİSTEMİN EKSERJİ ANALİZİ .....   | 36                  |
| 5.2.1. Sistem Noktalarının Ekserji Değerlerinin Hesaplanması .....                          | 36                  |
| 5.2.2. Sistem Ekipmanları İçin Ekserji Denge Denklemleri ve Ekserji Verimi Formülleri ..... | 39                  |
| 5.2.3. Ekserji Performans Değerlendirme Parametreleri .....                                 | 45                  |
| 5.3. SİSTEMİN EKONOMİK ANALİZİ .....  | 47                  |
| 5.4. SİSTEMİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ .....   | 50                  |
| 5.4.1. SPECO Maliyet Denge Denklemleri ve Çözümlenmeleri .....                              | 50                  |
| 5.4.2. MOPSA Maliyet Denge Denklemleri ve Çözümlenmeleri .....                              | 61                  |

|                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------|---------------------|
| BÖLÜM 6 .....              | 73                  |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... | 73                  |
| KAYNAKLAR .....            | 75                  |
| ÖZGEÇMİŞ .....             | 78                  |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Şekil 1.1. 2009 yılı için dünyadaki elektrik üretiminde kullanılan yakıtların kullanım oranları .....                    | 3                   |
| Şekil 2.1. Farklı metotların kullanılmasıyla elde edilen elektrik ve buhar maliyetleri .....                             | 7                   |
| Şekil 3.1. Rankine çevrimine göre çalışan basit bir termik santralin bileşenleri .....                                   | 9                   |
| Şekil 3.2. EÜAŞ'ye ait termik santrallerin kurulu güç dağılımları .....  | 12                  |
| Şekil 5.1. Analizi yapılan termik santralin şematik gösterimi .....  | 32                  |
| Şekil 5.2. Termik santralin Grassmann diyagramı .....  | 47                  |
| Şekil 5.3. Ekserji terimlerinin matris tanımlaması .....   | 68                  |
| Şekil 5.4. Bilinmeyen ifadelerin birim ekserji maliyetlerinin ve ekipmanların maliyet akımlarının matris gösterimi ..... | 69                  |
| Şekil 5.5. Sistemde üretilen elektriğin maliyetinin sistemde kullanılan yakıtın birim maliyeti ile değişimi .....        | 72                  |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| Çizelge 3.1. Türkiye’de kurulu bazı termik santrallerin kurulu güçleri, yakıt türleri ve 2010 yılı elektrik üretimleri.....            | 12                  |
| Çizelge 4.1. Sıcaklığa bağlı sabit basınçtaki özgül ısının hesaplanabilmesi için bazı bilinen gazlara ait a, b, c, d katsayıları ..... | 16                  |
| Çizelge 4.2. Referans çevre modeli için hava bileşenleri .....   | 18                  |
| Çizelge 5.1. Sistemde kullanılan kömürün fiziksel ve kimyasal analizi.....   | 34                  |
| Çizelge 5.2. Termik santrale ait termodinamik değerler.....  | 37                  |
| Çizelge 5.3. Ekipmanların ekserji performans parametreleri.....  | 46                  |
| Çizelge 5.4. Termik santrali ekipmanlarının alış fiyatları ve giydirilmiş alış fiyatlarına göre toplam maliyet akımları.....           | 49                  |
| Çizelge 5.5. Termik santral noktalarına ait ekserji, ekserji maliyeti akışı ve ortalama birim ekserji maliyet değerleri .....          | 59                  |
| Çizelge 5.6. MOPSA metoduna göre bilinmeyen ifadelerin birim ekserji maliyet değerleri.....  | 70                  |
| Çizelge 5.7. Termik santralde her bir ekipman için ekserji türlerinin maliyet akışları .....   | 71                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|            |   |
|------------|---|
|            | : kül oranı (%)                             |
| <i>AC</i>  | : yıllık ödemeler (\$)                      |
| <i>Ar</i>  | : argon                                     |
| <i>c</i>   | : ortalama birim ekserji maliyeti (\$/GJ)   |
|            | : saatlik maliyet akışı (\$/h)              |
|            | : sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)         |
| <i>CRF</i> | : ilk yatırım maliyeti geri kazanım faktörü |
|            | : karbondioksit                             |
| <i>ex</i>  | : özgül ekserji (kJ/kg)                     |
|            | : ekserji akımı (kW)                        |
|            | : yıllık yakıt maliyeti (\$/yıl)            |
| <i>FW</i>  | : paranın gelecekteki değeri (\$)           |
| <i>g</i>   | : yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )      |
| <i>h</i>   | : özgül entalpi (kJ/kg)                     |
|            | : hidrojen                                  |
|            | : su/ su buharı                             |
|            | : iyileştirme potansiyeli (kW)              |
| <i>i</i>   | : bileşik faiz oranı (%)                    |
| <i>LHV</i> | : alt ısı değer (kJ/kg)                     |
| <i>m</i>   | : kütle (kg)                                |
|            | : kütleli debi (kg/s)                       |
| <i>M</i>   | : molar ağırlık (kg/kmol)                   |
| <i>n</i>   | : mol sayısı (kmol)                         |
| <i>n</i>   | : sistem ömrü (yıl)                         |
|            | : azot                                      |
|            | : oksijen                                   |

|       |   |
|-------|---|
|       | : oksijen oranı (%)                                   |
| $P$   | : basınç (kPa)  |
| $PEC$ | : ekipman alış fiyatı (\$)                            |
|       | : yakıt maliyeti (\$/kg)                              |
| $PW$  | : paranın şimdiki değeri (\$)                         |
| $PWF$ | : paranın şimdiki değer faktörü                       |
|       | : ısı enerjisi (kW)                                   |
| $R$   | : evrensel gaz sabiti (kJ/kgK)                        |
| $s$   | : özgül entropi (kJ/kgK)                              |
|       | : kükürtdioksit                                       |
| $SV$  | : hurda değeri (\$)                                   |
| $T$   | : sıcaklık (K)  |
| $TCI$ | : toplam ilk yatırım maliyeti (\$)                    |
|       | : iş enerjisi/ekserjisi akımı (kW)                    |
|       | : nem oranı (%)                                       |
| $V$   | : hız (m/s)   |
| $y$   | : ekserji yıkımının yakıt ekserjisine oranı (%)       |
| $y^*$ | : ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımına oranı (%) |
| $z$   | : yükseklik (m)                                       |
|       | : seviyelendirilmiş maliyet akımı (\$/h)              |

Yunan harfleriyle:

|       |   |
|-------|---|
|       | : bakım maliyet faktörü                 |
| $\mu$ | : hurda değer oranı (%)                 |
|       | : özgül hacim (m <sup>3</sup> /kg)      |
|       | : sistemin bir yılda çalışma süresi (h) |
|       | : ekserji verimi (%)                    |

Alt indisler:

|        |                 |
|--------|-----------------|
| $BOUN$ | : sistem sınırı |
| $dest$ | : yıkım         |
| $E$    | : elektrik      |



|            |                             |
|------------|-----------------------------|
| <i>F</i>   | : yakıt                     |
| <i>in</i>  | : giriş                     |
| <i>KH</i>  | : kontrol hacmi             |
| <i>out</i> | : çıkış                     |
| <i>P</i>   | : mekanik                   |
| <i>q</i>   | : ısı                       |
| <i>S</i>   | : entropi                   |
| <i>T</i>   | : termal                    |
| <i>w</i>   | : mekanik/elektrik          |
| <i>O</i>   | : referans şartlardaki hali |

Üst indisler:

|            |              |
|------------|--------------|
| <i>CHE</i> | : kimyasal   |
| <i>KN</i>  | : kinetik    |
| <i>P</i>   | : mekanik    |
| <i>PH</i>  | : fiziksel   |
| <i>PT</i>  | : potansiyel |
| <i>T</i>   | : termal     |

## KISALTMALAR

|       |  |
|-------|--|
| AP    | : hava ön ısıtıcısı                      |
| COMB  | : buhar kazanı                           |
| COND  | : kondanser                              |
| CPUMP | : kondanser pompası                      |
| CT    | : kondanser tankı                        |
| CYC   | : siklon                                 |
| ECO   | : ekonomizer                             |
| ETKB  | : Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı    |
| FWT   | : su besleme tankı                       |
| G     | : jeneratör                              |
| HPH   | : yüksek basınç ısı değiştiricisi        |
| HPT   | : yüksek basınç buhar türbini            |
| IEA   | : Uluslararası Enerji Ajansı             |
| LPH   | : alçak basınç ısı değiştiricisi         |
| LPT   | : alçak basınç buhar türbini             |
| RH    | : yeniden ısıtma ünitesi                 |
| SH    | : buhar ısıtıcısı                        |
| TEİAŞ | : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi |
| TEP   | : ton eşdeğer petrol                     |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Enerji, toplumların sosyal ve ekonomik gelişimlerinde ve sürdürülebilir kalkınmalarında, bireylerin yaşam standartlarının yükselmesinde en belirleyici faktördür. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının büyük kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların yenilenemeyen enerji kaynakları olmalarından ve çevreye olan zararlı etkilerinden dolayı fosil yakıt kullanılan sistemlerde enerjinin verimli kullanılması büyük bir önem taşımaktadır.

Ülkemizde gelişen ekonomi ve artan nüfus ile birlikte meydana gelen enerji tüketimindeki artış enerji kullanımında dış ülkelere olan bağımlılığımızı gittikçe pekiştirmekte ve ülke ekonomisine zarar vermektedir. Bu bağlamda mevcut veya yeni kurulacak olan sistemlerde enerjinin verimli kullanılarak enerji tüketiminin azaltılmasıyla çevresel sorunlar azalacağı gibi ekonomik bir kazanç sağlanacaktır.

Uluslararası projeksiyonlara göre, mevcut tüketim hızıyla bilinen petrol rezervleri 46-50 yıl arasında tükeneyeceği tahmin edilirken, doğalgaz rezervlerinin tükenme ömrü 63-119 yıl arasında, kömür rezervlerinin tükenme ömrünün ise 119-176 yıl arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bundan dolayı kömür enerji güvenliği açısından diğer kaynaklara göre daha avantajlı konumdadır.

Ülkemiz rezerv ve üretim miktarları açısından linyitte dünya ölçeğinde orta düzeyde, taşkömüründe ise alt düzeyde değerlendirilebilir. Toplam dünya linyit rezervinin yaklaşık %1.6'sı ülkemizde bulunmaktadır. Türkiye'nin toplam linyit rezervi 12.4 milyar ton seviyesinde olup işletilebilir rezerv miktarı ise 3.9 milyar ton düzeyinde bulunmaktadır. Bununla birlikte linyitlerimizin büyük kısmının ısı değeri düşük olduğundan termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmıştır. Ülkemiz linyit rezervinin yaklaşık %46'sı Afşin-Elbistan havzasında bulunmaktadır. Ülkemizin en

önemli taşkömürü rezervleri ise Zonguldak ve civarındadır. Zonguldak Havzası'ndaki toplam taşkömürü rezervi 1.322 milyar ton, buna karşılık görünür rezerv ise 519 milyon ton düzeyinde bulunmaktadır (ETKB, 2010).

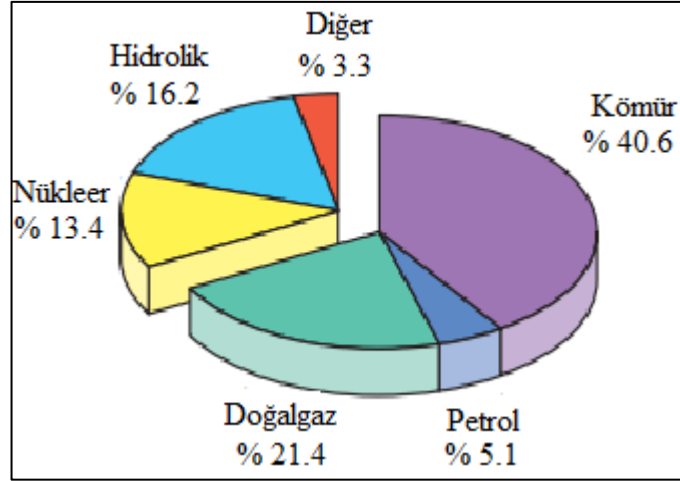
2008 yılında 106 milyon TEP olan ülkemizin toplam birincil enerji tüketiminde kömürün payı %28'dir. 2008 yılında yapılan 33 milyon ton toplam kömür satışının, %82'si termik santrallere, %12'si ise ısınma ve sanayiye olmuştur. Ülkemizde 2008 yılı sonu itibariyle linyite dayalı termik santrallerimizin kurulu gücü 8205 MW olup bu değer toplam kurulu gücümüzün %19.6'sını karşılamaktadır. Kömürün toplamda kurulu güce katkısı 10191 MW olup bu değer toplam kurulu gücümüzün %24'ünü oluşturmaktadır. Taşkömürüne dayalı termik santralimizin kurulu gücü 335 MW olup, toplam kurulu gücümüzün %0.8'ine karşılık gelmektedir (ETKB, 2010).

2010 yılında ise ülkemizde brüt elektrik enerjisi üretiminde, %9.1 taşkömür, %17 linyit, %1 fuel-oil, %46.5 doğalgaz, %0.2 yenilebilir enerji ve atık geri kazanımı, %24.5 hidrolik ve %1.7 jeotermal ve rüzgar enerjisi kullanılmıştır (TEİAŞ, 2011).

Dünya üzerindeki tüm ülkeler enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla önceliği yerli kaynaklara vermektedirler. Ülkemizde ise ithal bir kaynak olan doğalgaza elektrik üretiminde ağırlık verilmesi, ülkemiz sanayi sektörlerinin gelişmesinde son derece sakıncalıdır ve ayrıca üretilen elektriğin maliyetini arttıran bir unsurdur.

Enerji güvenliği bakımından diğer kaynaklara göre daha avantajlı olan kömür, bu özelliği nedeniyle dünya elektrik üretiminde Şekil 1.1.'den de görüldüğü gibi en fazla kullanılan yakıt durumundadır. Ayrıca, kömürün diğer enerji kaynaklarına göre maliyet avantajı bulunmaktadır. Bundan dolayı, kömürden elde edilen elektriğin birim maliyeti diğer kaynaklara göre daha düşüktür.

Termoekonomik analiz, termal bir sistemde üretilen ürünlerin maliyetlerini hesaplamada termodinamik ve ekonomik analiz sonuçlarını kullanan bir mühendislik dalıdır. Termodinamik analiz ile sistemlerde belirlenen ekserji akışları, termoekonomik analiz yöntemleri kullanılarak maliyetlendirilir ve sistemdeki her bir ekserji akışı maliyet cinsinden ifade edilir.



Şekil 1.1. 2009 yılı için dünyadaki elektrik üretiminde kullanılan yakıtların kullanım oranları (IEA,2012).

Hali hazırda kurulu sistemler için, maliyetlendirilen her bir ekserji akımı sayesinde sistemdeki maliyet akışları ve sistem ekipmanlarındaki ekserji kayıplarının maliyetleri belirlenerek sistemde yapılacak iyileştirme çalışmalarının ne ölçüde faydalı olabileceği ve sistemden üretilen ürünün maliyetine ne ölçüde etki ettiği tespit edilebilir. Yeni kurulacak sistemlerde ise termoekonomik analiz yardımıyla, satın alınacak ekipmanların maliyetlerinin ve performanslarının sistemden üretilen ürünün maliyetine etkileri belirlenerek sağlıklı bir ekipman seçimi yapılabilir. Bazı durumlarda, yüksek verimliliğe sahip bir ekipmanın sağlayacağı avantaj bu ekipmanın yüksek ilk yatırım maliyetinin oluşturduğu dezavantajın yanında etkisiz kalabilir. Bundan dolayı termoekonomik analiz ekipman seçiminde, ekipmanın verimliliği ve maliyeti arasında karar vermeye yarayan bir araçtır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Abusoglu ve Kanoglu (2009,a) yaptıkları çalışmada; kombine ısı ve güç üretiminin optimizasyonu ve termoekonomik analizi üzerine yapılan çalışmalarını incelemişlerdir. Literatürdeki başlıca termoekonomik metodolojileri açıklamışlar ve CGAM problemi sayesinde, bu metotların birbirlerine göre avantajlarını ve dezavantajlarını kıyaslamışlardır.

Abusoglu ve Kanoglu (2009b,c) yaptıkları çalışmada; 25,3 MW elektrik ve 170 'de 8.1 ton/h buhar üretim kapasitesine sahip dizel motorlu bir kojenerasyon sisteminin ve ekipmanlarının ekserji ve termoekonomik analizi için geliştirdikleri denklemleri belirtmişler ve uygulamışlardır. Yapılan çalışmada SPECO termoekonomik analiz metodu kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda; sistemin ekserji verimi % 40.6, sistem tarafından üretilen elektrik ve buharın özgül birim ekserji maliyetleri ise sırasıyla 10.31 ve 33.71 \$/GJ olarak hesaplanmıştır.

Kim vd. (1998) yaptıkları çalışmada; kompleks enerji sistemlerinin ekserji ve ekonomik analizinin bir kombinasyonu olan, MOPSA adı verilen yeni bir ekserji maliyet metodu sunmuşlar ve 1000 kW'lık gaz türbinli kojenerasyon sistemine uygulamışlardır. Yapılan çalışmada, madde akımının ekserjisi termal, mekanik, kimyasal ekserji akımları ve entropi üretim akımına ayrılmış ve bu her bir akımın birim ekserji maliyeti hesaplanmıştır.

Kwak vd. (2004) yaptıkları çalışmada; MOPSA metodunu kullanarak sistemin maliyet yapısının, sistemin alt bileşenlerini belirten seçilen birleştirme seviyesi tarafından nasıl etkilendiğini tespit etmek için üç farklı seçilen birleştirme seviyesine göre CGAM kojenerasyon sisteminin maliyet yapısını incelemişlerdir. Ürünlerin birim maliyetinin, ancak entropi akımı da ürünlerin birim maliyetini belirleyen

parametrelerden biri olarak dikkate alındığında sistemin seçilen birleştirme seviyesine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Kwak vd. (2003), 500 MW elektrik gücü üreten kombine çevrimli bir sistemin ekserji analizini ve MOPSA metodunu kullanarak termoekonomik analizini yapmışlar ve sistem ekipmanları arasındaki üretim etkileşimini ve maliyet oluşum işlemini göstermişlerdir. Yapılan çalışmada göz önüne alınan sistemin gaz türbinli kojenerasyon sistemi ve gaz türbini olarak da kullanılabilceği belirtilmiş ve farklı çalışma kapasiteleri için analizler yapılmıştır. Sistemin kapasitesi arttırıldıkça, gaz türbinli kojenerasyon durumunda ekserji veriminin % 51.35'den % 59.69'a kadar yükseldiği, üretilen elektriğin birim ekserji maliyetinin ise 16.95 \$/GJ'den 10.45 \$/GJ'e kadar azaldığı belirtilmiştir. Gaz türbini durumunda ise ekserji verimi %27.46'dan %34.91'e kadar yükselirken, üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti 30.51 \$/GJ'den 17.4 \$/GJ'e kadar azalma göstermiştir. Ayrıca yapılan analizler sonucunda, buhar türbininden üretilen elektriğin birim ekserji maliyetinin gaz türbininden üretilen elektriğinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Balli vd. (2010a,b), 6.5 MW kapasiteli gaz-dizel motorlu bir trijenerasyon sisteminin termodinamik ve termoekonomik analizini yapmışlardır. Sistemin termoekonomik analizi SPECO metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla % 58.97 ve 36.13 olarak bulunurken, sistemden üretilen elektriğin özgül birim ekserji maliyeti 45.94 \$/GJ olarak hesaplanmıştır.

Rosen ve Dincer (2003), enerji ve ekserji kayıpları ve yatırım maliyetleri arasında bazı termodinamik ilişkiler geliştirmişler ve 500 MW'lık modern bir kömür yakmalı elektrik üretim santraline uygulamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, yatırım maliyeti ve ekserji kaybı arasında sistematik bir ilişki bulunurken, yatırım maliyeti ve enerji kayıpları arasında bir uyum olmadığı gözlemlenmiştir.

Lozano ve Valero (1993), basit bir termal kuvvet santralinin termoekonomik analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada, enerji tasarrufu için alternatiflerin değerlendirilmesi, maliyet dağılımı, çalışma optimizasyonu, alt sistemlerin lokal optimizasyonu ve ekipmanlardaki aksaklıklardan (malfunctions) kaynaklanan ilave

yakıt tüketiminin değerlendirilmesi ve enerji bilançosu gibi konular termoekonomik analiz sayesinde incelenmiştir.

Modesto ve Nebra (2009), elektrik ve zaman zaman proses buharı üreten, yüksek fırın gazı ve kok fırını gazı kullanan bir rejeneratif Rankine çevrimli güç üretim sisteminin ekserji maliyet teorisini (TEC) kullanarak termoekonomik analizini yapmışlardır. Her bir ekipmanın sistem maliyetlerinin yapısındaki etkilerini belirlemek ve enerji ve proses buharının üretim maliyetlerini azaltmanın en iyi yolunu bulmak için maliyet değişimi, bağıl maliyet değişimi ve ekserjiekonomik faktör gibi parametreler hesaplanmıştır.

Zaleta vd. (2007), buhar türbinlerinde pürüzlülük, sızıntı ve kaçak, aşınma ve tortulaşma gibi iç aksaklıkların ekserji maliyetine (yakıt tüketim maliyetine) etkisini incelemek için 300 MW'lık bir klasik güç santralının ekserji maliyet teorisi yardımıyla termoekonomik analizini yapmışlar ve meydana gelen her bir aksaklık için ürün ve yakıt değişimlerini karakterize etmişlerdir. Maksimum ekonomik kayıpların nozul alanının artmasından ve nozul yüzeyinin pürüzlülüğünden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

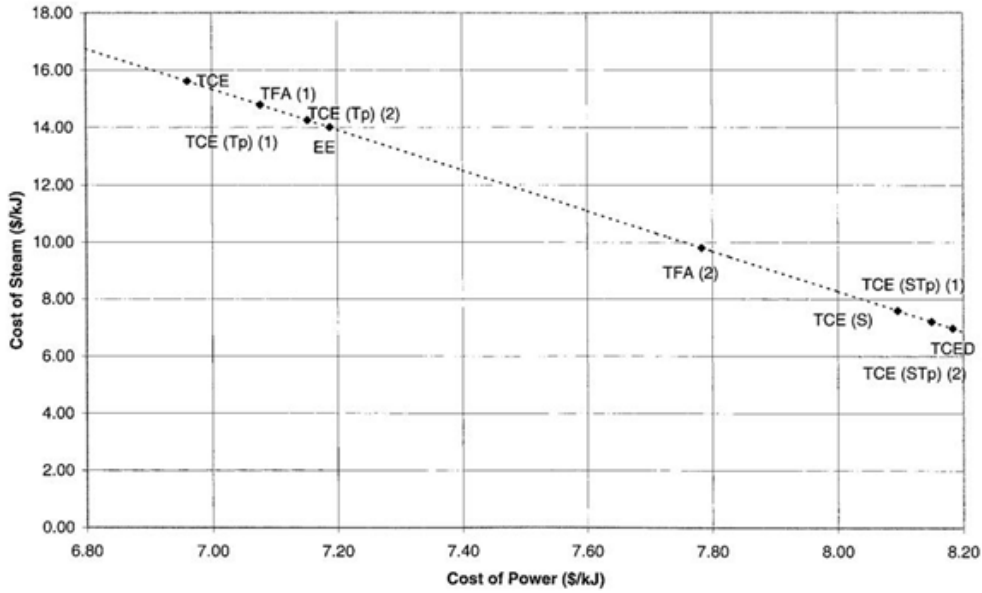
Ozdemir vd. (2010), akışkan yataklı kömür yakma sistemi içeren bir buhar kuvvet santralının SPECO metodunu kullanarak ekserjiekonomik analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada sistemin ekserji verimi 1.861 kg/s buhar debisi için % 20.28 olarak hesaplanırken, en yüksek ekserji yıkımı ise % 89.2'lik tersinmezlik oranı ile akışkan yataklı kazanda gözlemlenmiştir. Sistem tarafından üretilen buharın birim ekserji maliyeti, ekserji maliyeti ve birim maliyeti sırasıyla 17.88 \$/GJ, 93.57 \$/h ve 1.397 ¢/kg olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada buhar basıncının artmasıyla buharın birim ekserji maliyetinin azaldığı ve dış hava sıcaklığının artmasıyla buharın birim maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Colpan ve Yeşin (2006), gaz/buhar kombine çevrim kojenerasyon sisteminin SPECO metodunu kullanarak termoekonomik analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada; sistemden salınan buharın debisi 1.5 kg/s' den 10 kg/s' ye kadar arttırıldığında, proses buharının maliyeti 210 \$/h' den 890 \$/h'e kadar artarken, üretilen elektriğin



maliyeti 2399 \$/h'den 1700 \$/h'e kadar azalmıştır. Ekserji kayıp maliyeti, 15 t/h'lik proses buharı için, 135 \$/h olarak hesaplanmış ve bu değerin proses buharı ihtiyacı ile önemli derecede değişmediği gözlemlenmiştir.

Cerqueira ve Nebra (1999) tarafından yapılan çalışmada, basit bir gaz türbini kojenerasyon sistemine dört farklı termoekonomik metot uygulanmış ve sonuçları kıyaslanmıştır. Ayrıca ekserjinin termal ve mekanik bileşenlerine bölünmesinin önemi ve dış tersinmezliğin maliyetinin dağıtımını tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Farklı metotların kullanılmasıyla elde edilen elektrik ve buhar maliyetleri (Cerqueira ve Nebra, 1999).

Yapılan çalışmada kullanılan metotlar ve yapılan kabuller ise;

TFA(1); dış tersinmezliklerin kompresör, ön ısıtıcı ve yanma odasındaki termal ekserji artışlarının toplandığı hayali bir ekipmana (junction) dayandırıldığı durum için Termoekonomik Fonksiyonel Yaklaşım,

TFA(2); dış tersinmezliklerin sistemin son ekipmanına dayandırıldığı durum için Termoekonomik Fonksiyonel Yaklaşım,

TCE; fiziksel ekserjinin bileşenlerine ayrılmadığı klasik Ekserji Maliyet Teorisi,

TCE (TP)(1); kompresörün görevi hem termal hem de mekanik ekserjiyi arttırmak olarak kabul edilen durum için Ekserji Maliyet Teorisi,

TCE (TP)(2); kompresörün görevi sadece mekanik ekserjiyi arttırmak olarak kabul edilen durum için Ekserji Maliyet Teorisi,

TCE (S); dışsallıkların maliyetini bölüştürmek için negentropinin kullanımına izin vermek için hayali ünitenin ısı geri kazanım buhar jeneratörünün çıkışında olduğu kabul edildiği durum için Ekserji Maliyet Teorisi,

TCE (STp)(1); hem TCE(S) hem de TCE (TP)(1)'deki kabullerin yapıldığı durum için Ekserji Maliyet Teorisi,

TCE (STp)(2); hem TCE(S) hem de TCE (TP)(2)'deki kabullerin yapıldığı durum için Ekserji Maliyet Teorisi,

TCED; Ekserji Maliyet Teorisi-Ayrıştırma Metodu,

EE; Ekserjiekonomik Metot,

olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışmada ise Zonguldak Çatalağzı'nda kurulu bulunan 160 MW elektrik üretim kapasitesine sahip, katı yakıtlı bir termik santralin ekserji ve termoeekonomik analiz yoluyla performansı değerlendirilmiştir. Termoeekonomik analizde, SPECO ve MOPSA metotları kullanılarak, her iki metoda göre santralde üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti belirlenmiştir.

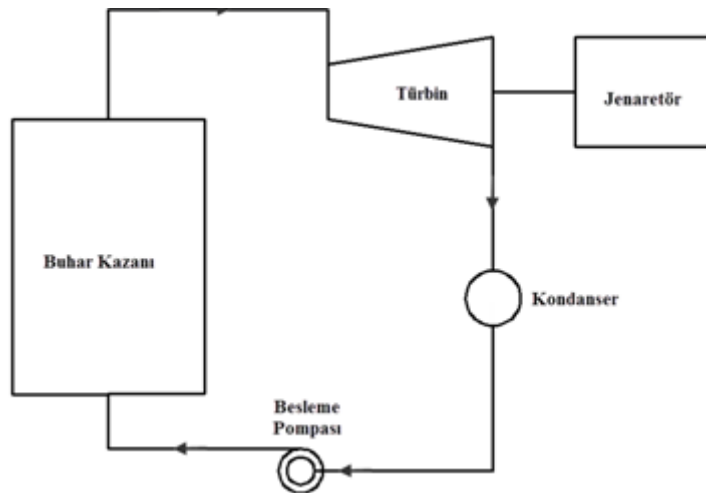
## BÖLÜM 3

### TERMİK SANTRALLER

Yakıt hücreleri, rüzgar enerjisi ve fotovoltaik piller gibi yeni geliştirilen teknolojiler gelecekte önemli elektrik üretim kaynakları olabilirler. Fakat, günümüzde elektrik üretiminin büyük çoğunluğu bazı buhar çevrimlerinde termal enerjinin dönüşümü ile sağlanır (Elliot vd., 1998). Termik santraller; sisteme tedarik edilen yakıtın kimyasal enerjisinin, sistemde dolaşan çalışma akışkan vasıtasıyla termal enerjiye, çalışma akışkanın termal enerjisinin türbin yardımıyla mekanik enerjiye, mekanik enerjinin jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir.

#### 3.1. TERMİK SANTRALLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Termik santraller, elektrik üreten enerji dönüşüm sistemleridir. Rankine su-buhar çevrimine göre çalışan basit bir termik santralin şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Rankine çevrimine göre çalışan basit bir termik santralin bileşenleri

Buhar kazanına giren su, yakıtın yanmasıyla açığa çıkan enerji sayesinde buhar fazına geçerek buhar kazanını terk eder. Buhar kazanından yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine sahip olarak çıkan buhar, türbine girerek türbin kanatları sayesinde türbin rotorunun dönmesine neden olur. Bu sayede, termal enerji türbinde mekanik enerjiye dönüştürülmüş olur. Türbinden düşük sıcaklık ve basınçta çıkan buhar, kondanserde ikinci bir akışkan kullanılarak sıcaklığı düşürülür ve sıvı fazına dönüştürülür. Kondanserden çıkan su, kazan besleme pompası ile basıncı artırılarak buhar kazanına gönderilir. Bu sayede çalışma akışkanının sistemde sirkülasyonu sağlanır ve çevrim tamamlanmış olur. Türbinden üretilen iş bir jeneratöre aktırılır ve bu sayede elektrik üretimi gerçekleşir.

### **3.2. TERMİK SANTRAL TASARIMI**

Temel termik santral tasarımı enerjinin bir formdan başka bir forma dönüşümünü belirten temel prensiplerin uygulamasıyla başlar. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları, çalışma akışkanlarının ardışık işlemlerinde sıcaklığın, basıncın, entalpinin ve entropinin bir fonksiyonu olarak termik santral tasarımına sayısal bir metot sağlar. Fakat, modern bir termik santralin tasarımı sadece termodinamik verilerin uygulamasından çok daha fazlasını gerektirir. Termik santral tasarımı, ekonomik değerlendirmeler ile termal performans kriterlerinin birleşimidir (Elliot vd., 1998).

Endüstriyel bir termik santral inşa edilmeden önce, elektrik ve termal yükler belirlenerek tesisin fizibilite analizini içeren bir mühendislik çalışması yapılmalıdır. Bazı durumlarda, termik santrali inşa eden organizasyon, hazırlık çalışmalarını yapmak, teklif ve ihaleleri incelemek ve yapımı gözetlemek için yeterli sayıda ve deneyimde mühendis kadrosuna sahip olabilir. Buna rağmen, detaylı tasarım genellikle ayrı bir mühendislik şirketi tarafından yapılabilir (Elliot vd., 1998).

Fizibilite çalışması sermaye fonunun yetkisini elde etmek için hazırlanmalıdır. Fizibilite çalışması toplam yatırım maliyetinin yanı sıra işletme, bakım, amortisman, sigorta, faiz ve vergiler gibi unsurları da içermelidir. Fizibilite çalışması mühendislikten ziyade finans veya hukukta arka plandaki kişiler tarafından aşılması amacıyla yapılmalıdır. Rapor ister yeni bir termik santralle ilgili olsun, ister mevcut

bir termik santrali kapsasın, ekonomik analiz tarihsel buhar ve güç ihtiyaçlarının belgelendirilmesini gerektirir. Hazırlık raporunun önemli bir kısmı; kış, yaz, hafta içi, hafta sonu ve tatiller için günlük yük değerleri gibi farklı koşullar için ön görülen yüklerin grafiklendirilmesidir (Elliot vd., 1998).

Termik santral tasarımında öncelikli olarak sistem çevrimine, kullanılacak yakıtın türüne, yardımcı ekipmanların sayısına ve türlerine, kullanılacak kontrol ekipmanlarına karar verilmelidir. Yeni bir sistem tasarımında, kullanılacak termal çevrim seçimine dikkat edilmelidir. Eğer mevcut bir sistem büyütülecekse, sistemdeki mevcut buhar türbininin gaz türbini veya yeni bir buhar türbini ile birleştirilip birleştirilmeyeceğine dikkat edilmelidir (Elliot vd., 1998).

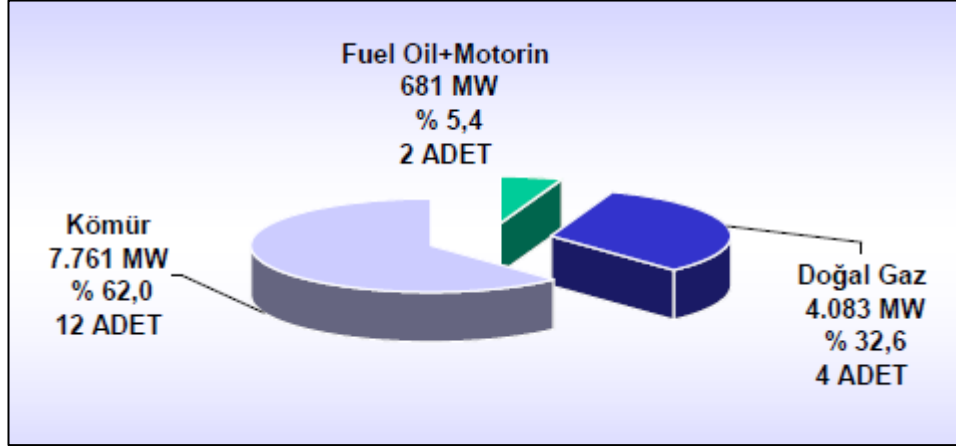
Yakıt seçimi temin edilebilirlik, maliyet, yasal düzenlemeler ve işletme gereksinimleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Birçok endüstriyel termik santralde ticari olarak kolaylıkla temin edilebilen ve yan ürünleri atık olarak atılmaktan ziyade yakıt olarak yakılabilecek yakıtlar kullanılmaktadır (Elliot vd., 1998).

### **3.3. TÜRKİYEDE TERMİK SANTRALLERİN DURUMU**

Ülkemiz elektrik üretimi 2009 yılı için 194.1 milyar kWh iken elektrik tüketimi ise 193.3 milyar kWh'dir. 2009 yılında elektrik üretimimizin, %48.6'sı doğal gazdan, %28.3'ü kömürden, %18.5'i hidrolikten, %3.4'ü sıvı yakıtlardan ve %1.1'i yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiştir. 2009 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin kurulu gücü içerisinde Elektrik Üretim A.Ş. %54.2, üretim şirketleri %16.4, yap-işlet santralleri %13.7, otoprodüktörler %8.1, yap-işlet-devret santralleri %5.5, işletme hakkı devredilen santraller %1.5 ve mobil santraller %0.6'lık paya sahiptir (ETKB, 2010).

Elektrik Üretim A.Ş. tarafından 2010 yılında üretilen elektrik enerjisinin %56.69'u termik santrallerden, %43.31'i ise hidrolik santrallerden sağlanmıştır. Elektrik Üretim A.Ş.'ye ait termik santrallerin 2010 yılı için termik santralde kullanılan yakıtı göre kurulu güç dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Şekil3.2'den de görüldüğü

gibi Elektrik Üretim A.Ş.'ye ait santralden üretilen elektriğin %62'si kömür yakıtlı termik santrallerden üretilmektedir.



Şekil 3.2. EÜAŞ'ye ait termik santrallerin kurulu güç dağılımları (EÜAŞ, 2010)

Ülkemizde kurulu bulunan bazı termik santrallerin kurulu güç kapasiteleri, kullanılan yakıt türleri ve 2010 yılı elektrik üretim değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Türkiye'de kurulu bazı termik santrallerin kurulu güçleri, yakıt türleri ve 2010 yılı elektrik üretimleri (EÜAŞ, 2010)

| Termik Santral   | Yakıt Türü | Kurulu Güç (MW) | Elektrik Üretimi (GWh) |
|------------------|------------|-----------------|------------------------|
| Afşin-Elbistan-A | Linyit     | 1335            | 2042                   |
| Afşin-Elbistan-B | Linyit     | 1440            | 7694                   |
| Seyitömer        | Linyit     | 600             | 3623                   |
| Kangal           | Linyit     | 457             | 2313                   |
| Tunçbilek        | Linyit     | 365             | 1659                   |
| Çatalağzı        | Taşkömürü  | 300             | 1883                   |
| Orhaneli         | Linyit     | 210             | 1174                   |
| 18 Mart Çan      | Linyit     | 320             | 2141                   |
| Bursa            | Doğal gaz  | 1432            | 7098                   |
| Ambarlı          | Doğal gaz  | 1350            | 7941                   |
| Aliğa            | Doğal gaz  | 180             | 251                    |
| Ambarlı          | Fuel Oil   | 630             | 62                     |
| Hamitabat        | Doğal gaz  | 1120            | 5750                   |
| Soma A-B         | Linyit     | 1034            | 3897                   |
| Kemerköy         | Linyit     | 630             | 2720                   |
| Yeniköy          | Linyit     | 420             | 1308                   |
| Yatağan          | Linyit     | 630             | 2599                   |

Ülkemiz elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması açısından büyük önem arz eden ve uzun yıllardır çeşitli nedenlerle yeterli bakım ve yenileme yapılamayan termik santrallerimizde; üretim kapasitesinin geri kazanılması, emreamedilik ve güvenilirliklerin arttırılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve bunların yanı sıra çevre ile daha uyumlu çalıştırılması maksatlarıyla, kapsamlı büyük bakım ve onarım, revizyon ve iyileştirmeler yapılmaktadır (EÜAŞ, 2010).

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 4.1. EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji; bir sistemin sadece çevreyle etkileşim içinde olacağı prosesler vasıtasıyla çevre ile termodinamik dengeye getirilmesiyle elde edilen maksimum teorik yararlı iş olarak tanımlandığı gibi enerjinin form değiştiren kısmı olarak da tanımlanabilir (Sciubba ve Wall, 2007). Nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilmesi etkilerinin bulunmadığı durumda, bir sistemin toplam ekserjisi fiziksel ekserji, kinetik ekserji, potansiyel ekserji ve kimyasal ekserji olmak üzere dört bileşene ayrılabilir (Bejan vd., 1996).

(4.1)

Çevreye göre değerlendirildiğinde, bir sistem çevre koşullarına getirilirken sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri prensipte tamamen işe dönüştürülebilir. Bundan dolayı, sistemin sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerjileri o sistemin kinetik ve potansiyel ekserjilerine karşılık gelir. Birim kütle için kinetik ve potansiyel ekserjiler sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

–

(4.3)

Termomekanik ekserji olarak da tanımlanan fiziksel ekserji, bir akımın veya maddenin belirli bir sıcaklık ve basınç değerindeki durumu ile çevre koşullarındaki durumu arasındaki farklılık olarak ifade edilebilir.



(4.4)

Termomekanik ekserji akımı ekserjinin termal ve mekanik bileşenlerine ayrılabilir (Kim vd., 1998; Kwak vd., 2003; Abam ve Moses, 2011).

Termomekanik ekserjinin termal bileşeni, bir akımın veya maddenin belirli bir sıcaklık ve basınç değerindeki durumu ile aynı basınç ve çevre sıcaklığındaki durumu arasındaki farklılık olarak ifade edilebilir.

(4.5)

(4.6)

Termomekanik ekserjinin mekanik bileşeni ise, zaten sıcaklığı çevre sıcaklığına getirilmiş olan akım veya maddenin sahip olduğu basınç değerindeki durumu ile çevre sıcaklığı ve basıncındaki durumu arasındaki farklılık olarak ifade edilebilir.

(4.7)

(4.8)

Bir akımın veya maddenin termal ve mekanik ekserji bileşenlerinin toplamı fiziksel veya termomekanik ekserjisine eşittir.

(4.9)

İdeal gazların özgül fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Kotas,1995).

— —

İdeal gazların fiziksel ekserjisinin termal ve mekanik bileşenleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir (Abam ve Moses, 2011).

Yapılan bu çalışmada, hava ve baca gazı akımları için ideal gaz varsayımı yapılmıştır. Ayrıca bu akımların sabit basınçtaki özgül ısılarının sıcaklık ile değiştiği göz önüne alınmıştır. Mükemmel gazların sabit basınçtaki özgül ısılarının sıcaklıkla değişimi aşağıdaki genel denklem ile ifade edilir.

$$(4.13)$$

Burada  $T$  sıcaklığı göstermektedir ve birimi (K)'dir.  $a$  ise sabit basınçta özgül ısıyı göstermektedir ve birimi ( $\text{kJ kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )'dir.

Bu çalışmada, bazı gazların sabit basınçtaki özgül ısıları, Çizelge 4.1'de verilen a, b, c, d katsayılarının değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Sıcaklığa bağlı sabit basınçtaki özgül ısının hesaplanabilmesi için bazı bilinen gazlara ait a, b, c, d katsayıları (Çengel ve Boles, 1996).

| Madde          | Kimyasal Formülü | a     | b<br>( ) | c<br>( ) | d<br>( ) |
|----------------|------------------|-------|----------|----------|----------|
| Azot           |                  | 28.9  | 0.1571   | 0.8081   | 2.873    |
| Oksijen        |                  | 25.48 | 1.520    | 0.7155   | 1.312    |
| Karbondiyoksit |                  | 22.26 | 5.981    | 3.501    | 7.469    |
| Su Buharı      |                  | 32.24 | 0.1923   | 1.055    | 3.595    |
| Kükürtdiyoksit |                  | 25.78 | 5.795    | 3.812    | 8.612    |

Suyun özgül fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Suyun fiziksel ekserjisinin termal ve mekanik bileşenleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

(4.15)

—

Analiz edilen prosesler kimyasal reaksiyon içermiyorsa ve çevre ile madde değişimi yok ise kontrol yüzeyinden geçen akımların bileşimlerinde değişim yoktur ve bu durumda ekserjinin kimyasal bileşimi sifıra indirgenebilir (Kotas, 1995). Kimyasal ekserji, kimyasal reaksiyon içeren proseslerde dikkate alınır. Bundan dolayı bu çalışmada sadece sistemde kullanılan kömürün kimyasal ekserjisi hesaplanmıştır.

Kömürün kimyasal ekserjisi aşağıdaki denklemden hesaplanabilir (Stepanov, 1995).

—————

Yukarıdaki denklemden kömür içeriğindeki oksijen oranını, nem oranını, kül oranını,  $LHV$  ise kömürün alt ısıl değerini ifade etmektedir. Bu denklemden kömürün as-received olarak tanımlanan elementer analizinden elde edilen sonuçlar kullanılmaktadır.

#### **4.1.1. Referans Çevrenin Tanımlanması**

Ekserji referans bir çevreye göre değerlendirilir. Bundan dolayı referans çevrenin özellikleri bir akımın veya sistemin ekserjisini belirler. Referans çevre kararlı durumdadır. Çevre bileşenleri arasında kimyasal reaksiyon meydana gelmeyebilir. Referans çevre, sonsuz bir sistem gibi rol alır, ısı ve maddeler için bir alıcı ve kaynaktır. Referans çevrenin ekserjisi sıfırdır ve referans çevre ile dengede olan bir sistemin ve akımın da ekserjisi sıfırdır (Dincer ve Rosen, 2007).

Doğal çevre, bir referans çevrenin teorik karakteristiklerine sahiptir. Doğal çevre dengede değildir ve özellikleri mekana ve zamana bağlı değişimler sergiler. Doğal çevrede birçok kimyasal reaksiyon engellenir, çünkü dengeye ulaşmak için gerekli transport mekanizmaları çevre koşullarında çok yavaştır. Böylece, doğal çevrenin ekserjisi sıfır değildir. Sonuç olarak, referans çevrenin teorik gereksinimleri ve doğal çevrenin gerçek davranışı arasında bir uyum elde etmek amacıyla referans çevre için modeller kullanılır (Dincer ve Rosen, 2007).

Yapılan bu çalışmada referans çevrenin sıcaklığı ve basıncı sırasıyla  $T = 288.15K$  ve  $P = 101.325 kPa$  olarak kabul edilmiştir. Referans çevre modeli için hava bileşenleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Referans çevre modeli için hava bileşenleri (Dincer ve Rosen, 2007)

| Hava bileşenleri | Mol Oranları |
|------------------|--------------|
|                  | 0.7567       |
|                  | 0.2035       |
|                  | 0.0303       |
| Ar               | 0.0091       |
|                  | 0.0003       |
|                  | 0.0001       |

## 4.2. KONTROL HACİMLERİ İÇİN DENGE DENKLEMLERİ

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içinde zamanla değişiklik olmaz. Bu nedenle, analizler sırasında sistem sınırlarının içindeki durum ile ilgilenilmez. Kontrol hacmi içinde zamanla değişiklik olmaması çözümlenmeyi oldukça kolaylaştırır.

#### 4.2.1. Kütlenin Korunumu

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Bu durumda, kütlenin korunumu ilkesi uyarınca kontrol hacmine giren toplam kütlenin, kontrol hacminden çıkan toplam kütleyle eşit olması gerekir.

#### 4.2.2. Enerjinin Korunumu

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacminin toplam enerjisi sabittir, zamanla değişmez. Bundan dolayı, sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması gerekir.

—

—

#### 4.2.3. Entropi Denge Denklemi

Sürekli akışlı açık sistemlerde, sisteme birden çok kütle giriş ve çıkışının olduğu ve sistemin ve sıcaklığındaki çevre ile ısı alışverişinde bulunduğu kabulü ile entropi denge denklemi,

—

şeklinde yazılabilir (Çengel ve Boles, 1996). Bu ifadede sol taraftaki terim kontrol hacmindeki entropi üretimini ifade ederken, ifadenin sağ tarafındaki birinci ve ikinci terimler sırasıyla sisteme giren ve çıkan kütleler ile taşınan entropiyi, üçüncü terim ise kontrol hacmi yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi sonucu taşınan entropiyi ifade etmektedir.

#### 4.2.4. Ekserji Denge Denklemi

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içindeki toplam ekserjisi sabittir. Sisteme birden çok kütle giriş ve çıkışının olduğu, sistemin çevresinden ısı kazandığı ve iş ürettiği kabulü yapılan bir kontrol hacmi için ekserji denge denklemi,

—

bağıntısı ile ifade edilir. Bu ifadede terimi kontrol hacmindeki tersinmezlikler sonucu meydana gelen ekserji yıkımını ifade etmektedir (Bejan vd., 1996).

### 4.3. EKONOMİK ANALİZ

Başarılı bir termal sistem tasarımı; ekonomi, teknoloji ve yasal düzenlemeler ile ilgili olan çeşitli kabulleri ve tahminleri dikkate alarak ve mühendislik ekonomisi tekniklerini kullanarak projede bulunan başlıca maliyetlerin tahminini gerektirir. Ekonomik analizin amacı, ekserji değerine sahip olmayan parametrelerin termoekonomik analizde kullanılması gereken maliyet akımlarını hesaplamaktır.

#### 4.3.1. Paranın Zaman Değeri

Belirli bir miktar para geçmişte, günümüzde ve gelecekte enflasyon ve faiz hareketlerine bağlı olarak farklı satın alma güçlerine sahip olacaktır. Bundan dolayı, bir projenin maliyet değerlendirmesi farklı zaman noktalarında para hareketlerinin kıyaslanmasını gerektirdiği için paranın zaman üzerindeki değerini hesaplama gereği duyulur.

#### 4.3.2. Paranın Gelecekteki Değeri

Eğer günümüzdeki değeri  $PW$  olan bir miktar para,  $n$  zaman periyoduna bağlı olarak,  $i$  bileşik faizi ile bir hesaba yatırıldığında, bu para gelecekteki bir  $FW$  değerine büyüyecektir ve bu değer

(4.22)

bağıntısından hesaplanır. Bu ifadeye faiz terimi  $i$  ondalık kesir olarak ifade edilir (Bejan vd., 1996).

#### **4.3.3. Paranın Şimdiki Değeri ve Şimdiki Değer Faktörü**

Projeler değerlendirilirken, gelecekte belirli periyotlarda harcanarak veya alınacak para kaynağının mevcut değerinin bilinmesine ihtiyaç duyulur. Gelecekteki bir miktarın şimdiki değeri, belirli bir faiz oranıyla hesaba yatırılan ve gelecekte bir tarihte FW değerine ulaşacak para miktarıdır.

---

Paranın şimdiki değer faktörü ise,

---

bağıntısından hesaplanır (Bejan vd., 1996).

#### **4.3.4. Yıllık Ödemeler**

Yıllık ödeme eşit zaman aralıklarında meydana gelen eşit miktardaki para hareketleridir. Zaman periyodu genellikle bir yıla karşılık gelir. İncelenen tesiste düzenli olarak her yıl meydana gelen yakıt ödemeleri, çalışan ücretleri, kredi ve sigorta gibi harcamaları kapsar ve

---

bağıntısı ile hesaplanır (Bejan vd., 1996).

#### 4.3.5. İlk Yatırım Maliyeti Geri Kazanım Faktörü

Bir yıllık ödemenin şimdiki değeri, yıllık ödeme zaman periyodunun sonundaki toplam yıllık ödeme miktarını sağlayan, efektif faiz oranıyla yıllık ödeme zaman periyodunun başlangıcında hesaba yatırılan para miktarı olarak tanımlanır ve

— —————

bağıntısından hesaplanır. Bu ifadenin tersi ise ilk yatırım maliyeti geri kazanım faktörüdür ve

— —————

olarak ifade edilir (Bejan vd., 1996).

#### 4.3.6. Hurda Değer Hesabı

Bir mülkün hurda değeri, bu mülkün ekonomik ömrünün sonundaki tahmin edilen ekonomik değeridir ve

(4.28)

olarak hesaplanır (Kwak vd., 2003). Burada *TCI* toplam ilk yatırım maliyetini, ise hurda değer yüzdesini ifade etmektedir.

#### 4.3.7. Ekonomik Değerlerin Hesaplanması

Bir sistemin şimdiki zaman değeri,

(4.29)



bağıntısından hesaplanır. Sistemin yıllık yatırım maliyeti ödemeleri ise,

$$AC = PW \times CRF \quad (4.30)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Yıllık yatırım maliyeti ödemeleri ise,

$$= \text{---} \quad (4.31)$$

bağıntısı kullanılarak sistemin saatlik ilk yatırım maliyet akımı hesaplanır. Bu denklemden sistemin bir yıl içerisindeki çalışma süresini, ise bakım maliyet faktörünü ifade etmektedir. Ekipmanların saatlik ilk yatırım maliyet akımı,

---

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Bu denklemden sistemin k'nci bileşeninin satın alma fiyatını ifade etmektedir. Sistemin k'nci bileşeninin giydirilmiş alış fiyatı,

$$= \times \text{---} \quad (4.33)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Sistemin k'nci bileşeninin saatlik seviyelendirilmiş ilk yatırım maliyeti,

$$= \times \text{---} \quad (4.34)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Sistemde kullanılan yakıtın yıllık maliyeti,

$$(4.35)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde yakıtın birim ağırlığının maliyetini, sistemde kullanılan yakıtın kütleli debisini ifade etmektedir. Yakıtın saatlik ekserji maliyeti ise,

— ———

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde yakıtın alt ısı değerini, ise yakıtın özgül ekserjisini ifade etmektedir.

#### **4.4. TERMOEKONOMİK ANALİZ**

Termoekonomi, sistem tasarımcısı veya operatörüne, uygun maliyetli bir sistemin tasarımı ve işletimi için klasik enerji analizi ve ekonomik değerlendirmelerle elde edilemeyen bilgileri sunan, ekserji analizi ve ekonomik değerlendirmeyi birleştiren mühendislik dalıdır. Termoekonomi, ekserji destekli maliyet azaltma olarak da tanımlanabilir (Bejan vd., 1996, Tsatsaronis, 1996).

Termodinamik analiz ile sistemdeki verimsizlikler tespit edilir. Bu verimsizliklerin maliyetlerinin ne kadar olduğu bilgisine sıklıkla ihtiyaç duyulur. Bu maliyetlerin bilinmesi sistemin maliyet etkinliğini iyileştirmek için ve sistem tarafından üretilen ürünlerin maliyetlerini azaltmak için yararlıdır (Bejan vd., 1996). Sistemdeki verimsizliklerin maliyetlendirilmesi ise termoekonomik analiz ile mümkündür.

Termoekonomik analiz,

- Termodinamik kayıpların (ekserji yıkımı ve ekserji kayıpları) gerçek kaynaklarını, rakamsal değerlerini ve konumlarının belirlenmesi,
- Herhangi bir sistem ekipmanında ekserji kayıpları ve ekserji yıkımı ile ilgili maliyetlerin hesaplanması,
- Birden fazla ürün üreten termal sistemlerde, her bir ürünün maliyet oluşumunun ayrı ayrı analiz edilebilmesi

amaçlarına sahiptir (Modesto ve Nebra, 2009).

Literatürde her biri farklı prensiplere dayanan ve bundan dolayı bir dereceye kadar farklı sonuçlar sunan birbirinden farklı termoekonomik analiz metotları sunulmuştur (Cerqueira ve Nebra, 1999; Abusoglu and Kanoglu, 2009a). Bunlar,

- Ekserji Ekonomik Yaklaşım (Exergy Economic Approach,EEA)
- Termoekonomik Fonksiyonel Analiz (Thermoeconomic Functional Analysis, TFA)
- İlk Ekserjiekonomik Yaklaşım (First Exergoeconomic Approach, FEA)
- Mühendislik Fonksiyonel Analizi (Engineering Functional Analysis, EFA)
- Ekserji Maliyet Teorisi (Theory of Exergetic Cost, TEC)
- Son Giren İlk Çıkar Prensibi (Last-in-First-out Principle, LIFO)
- Modifiye Edilmiş Üretim Yapısı Analizi (Modified Productive Structure Analysis, MOPSA)
- Termoekonominin Yapısal Teorisi (Structural Theory of Thermoeconomics, STT)
- Özgül Ekserji Maliyeti Metodu (Specific Exergy Costing, SPECO)
- Ekserji, Maliyet, Enerji ve Kütle Analizi (Exergy-Cost-Energy-Mass Analysis, EXCEM)

Yapılan bu çalışmada özgül ekserji maliyeti (SPECO) ve modifiye edilmiş üretim yapısı analizi (MOPSA) metotlarına göre termoekonomik analiz yapılacaktır.

#### **4.4.1. Özgül Ekserji Maliyeti (SPECO) Metodu**

Özgül ekserji maliyeti yani SPECO metodunda; bir ekipmanın yakıtı ve ürünü, sistemin bütün ekserji akımlarından ayrılan ve ilave edilen bütün ekserji akımlarının sistematik bir raporu alınarak tanımlanır ve maliyetler, işletmenin temel prensiplerinin uygulanmasıyla hesaplanır. Böylece, bir ekipman için yakıt ve ürün tanımları ve uygun maliyetlendirme denklemleri arasında doğrudan bir bağlantı kurulur (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006).

SPECO metodunda her bir madde ve enerji akımıyla ilgili maliyetler her bir sistem bileşeni için yazılan maliyet denklemleri ve yardımcı maliyet denklemleri yardımıyla çözülür. Genel olarak SPECO metodu aşağıdaki üç adımdan oluşur:

*Adım-1: Ekserji akımlarının belirlenmesi:* İlk olarak, ekipmanın analizine göre bir madde akımının toplam ekserjisinin ayrı formları mı kullanılacağı yoksa toplam ekserjisinin mi kullanılacağına karar verilmelidir. Alınan bu karardan sonra giren ve çıkan madde ve enerji akımlarıyla ilgili bütün ekserji akımları belirlenir ve ekserji değerleri hesaplanır.

*Adım-2: Yakıt ve ürünün tanımlanması:* Bir ekipmanın ürünü; ekipmanda üretilen bütün enerji akımlarının ekserjilerini içeren, ekipmanın çıkışındaki bütün ekserji akımlarının ve ekipmanın amacına uygun olarak ekserji ilavesi yapılan madde akımlarının giriş ve çıkışı arasındaki ekserji artışının toplamına eşittir. Bir ekipmanın yakıtı ise; ekipmanda tüketilen enerji akımlarının ekserjilerini içeren, ekipmanın girişindeki bütün ekserji değerleri ve ekipmanın amacına uygun olarak ekserji kaybeden madde akımlarının giriş ve çıkışları arasındaki ekserji farkının toplamı ile giriş ve çıkış arasındaki ekipmanın amacına uygun olmayan bütün ekserji artışlarının farkı olarak tanımlanır.

*Adım-3: Maliyet denklemleri:* Giren ve çıkan kütle akımlarının ekserjileri, işin ekserjisi ve ısı transferiyle gerçekleşen ekserji transferiyle ilgili maliyet akımları sırasıyla,

(4.37)

(4.38)

(4.39)

(4.40)

olarak ifade edilir. Burada  $\frac{C}{G}$ ,  $\frac{C}{J}$ ,  $\frac{C}{h}$  ifadeleri özgül ekserji maliyetlerini ifade etmektedir ve birimi \$/GJ'dir (Bejan vd., 1996).  $\frac{C}{G}$ ,  $\frac{C}{J}$ ,  $\frac{C}{h}$  ifadeleri ise ait oldukları ekserji akımlarının maliyet akımlarını ifade etmektedir ve birimi \$/h'dir.

Ekserjinin maliyetlendirilmesi her bir sistem bileşeni için ayrı ayrı formüle edilen maliyet denge denklemlerini içerir. Herhangi bir ekipmana uygulanan bir maliyet denge denklemi; ekipmandan çıkan bütün ekserji akımları ile ilgili maliyetlerin toplamının, ekipmana giren bütün ekserji akımlarının maliyetlerinin toplamı ve ilk yatırım ve bakım ve onarım harcamalarından kaynaklanan ücretlerin toplamına eşittir. Çevresinden ısı enerjisi alıp iş üreten bir ekipman için genel maliyet denklemi,

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada  $C_{0}$  terimi, ekipmanın ilk yatırım maliyeti ve bakım onarım masraflarından kaynaklanan maliyet akımı ifadesidir.

Ekipmanlar için yazılan maliyet denklemlerinin sayısı, sistemdeki ekserji akımlarının maliyet akımlarını hesaplamak için yeterli değildir. Bundan dolayı, sistemdeki ekserji akımlarının maliyet akımlarını hesaplayabilmek için  $F$  kuralları yardımıyla yardımcı denklemler yazılır.

#### **4.4.1.1. F ve P Kuralları**

##### *F (Fuel-Yakıt) Kuralı:*

F kuralı; incelenen bir ekipmanda bir ekserji akımının giriş ve çıkışı arasındaki ekserji farkı, o ekipmanın yakıt tanımlamasında göz önüne alınmıyorsa geçerlidir. F kuralına göre, ekipmanda yakıt olarak kullanılmak üzere bir ekserji akımından alınan ekserjinin birim maliyeti (  $\frac{C}{G}$  ), bu ekserjinin alındığı ekserji akımının ekipmanın girişindeki birim ekserji maliyetine eşittir. Bu kurala uyan her bir ekserji akımı için yardımcı maliyet denklemi yazılabilir. Sistem bileşenine giren bir ekserji akımının

giriş ve çıkışı arasındaki ekserji farkı, ekipmanın yakıt tanımlamasında göz önüne alınmıyorsa bu ekserji akımı için yardımcı maliyet denklemi gerekli değildir (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006).

#### P (Product-Ürün) Kuralı:

P kuralı; incelenen bir ekipmandaki ekserji akımına, ekserji ilavesi durumu ile ilişkilidir. P kuralı ekipmanın ürünü ile ilgili akımlara ilave edilen her bir ekserji biriminin aynı ortalama birim maliyette olduğunu ifade eder. İlave edilen her bir ekserji akımı çıkan bir ekserji akımına karşılık geldiği için, P kuralı tarafından sağlanan yardımcı denklemlerin sayısı, ürün tanımlamasına dahil olan çıkan ekserji akımlarının sayısının bir eksiğine eşittir (Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2006).

#### **4.4.2. Modifiye Edilmiş Üretim Yapısı Analizi (MOPSA) Metodu**

MOPSA metodu Kim vd. (1998) tarafından önerilen bir termoekonomik analiz metodudur. Önerilen bu metot, akış akımlarının maliyet hesaplamalarını içermeyen bir ekserji maliyetlendirme sistemine dayanmaktadır. Bu metotta, sistemin herhangi bir noktasındaki her bir bileşenine (termal, mekanik, kimyasal v.s.) ayrılmış ekserjiye bir birim ekserji maliyeti atanmasıyla, termal sistemlerin herhangi bir ekipmanına uygulanabilen bir maliyet denge denklemi elde edilir. Daha sonra, sistem için maliyet denge denklemlerinden oluşan bir denklem grubu elde edilir. Bu denklem grubu doğal olarak maliyetlendirme işleminde ekipmanlar arasındaki etkileşimleri içerir. Termal sistem için elektriğin üretim maliyetinin yanı sıra çeşitli ekserji maliyetlerinin parasal değerlendirmesi, denklem grubunun çözülmesiyle elde edilir. Ayrıca, sistemin her bir ekipmanı için entropi üretim proseslerine dayandırılan kayıp maliyetleri maliyet denge denklemlerinin çözülmesiyle elde edilir (Kim et al, 1998).

MOPSA metodu için genel maliyet denge denklemi,

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemdaki;  $\dot{Q}_{k1}$ ,  $\dot{Q}_{k2}$ ,  $\dot{Q}_{k3}$  ve  $\dot{Q}_{k4}$  ifadeleri sırasıyla kimyasal, termal ve mekanik ekserjilerin, entropi akışının ve sistemden üretilen işin birim maliyetlerini ifade etmektedir.  $\dot{Q}_{k1}$  ifadesi ise sistemde kondanser görevi gören ekipmanlarda ikinci akışkan olarak kullanılan ve sisteme dışarıdan tedarik edilip daha sonra tekrardan dışarı atılan akışkanların birim maliyetlerini ifade etmektedir. Denklem 4.42'den görüldüğü gibi, MOPSA metodunda termomekanik ekserji termal ve mekanik bileşenlerine ayrılır ve ayrı ayrı maliyetlendirilir.

Maliyet denge denklemi bir ekipmana uygulanırken, ekipmanın başlıca ürününe yeni bir birim maliyeti atanmalıdır ki bu birim maliyeti ifade eden terim koyu harfle gösterilir ve denklem numarasına göre numaralandırılır. Yeni bir birim maliyetin atanması, üretim yapısı analizine dayanan ekserji maliyetlendirme metodunda çok önemli bir noktadır (Kwak et al., 2003).

MOPSA metodunda ayrıca sistem sınırı için de bir maliyet denklemi yazılır. Sistem sınırı için maliyet denge denklemi yazarken, sadece sistem sınırından giren ve çıkan akışkanlar dikkate alınır. Sisteme giren yakıtın kimyasal ekserjisi ve sistemden üretilen iş sınır tanımlamasında dikkate alınmaz. Yapılan sistem sınırı tanımlamasında, entropinin birim maliyeti ( $\dot{Q}_{k1}$ ), sistem sınırının başlıca ürünü olarak belirlenir.

Sistem için tanımlanan birim ekserji maliyetlerinin hesaplanabilmesi için bilinmeyen birim ekserji maliyetlerinin sayısı, maliyet denge denklemlerinin sayısına eşit olmalıdır. Bundan dolayı ekipmanların başlıca ürünlerine atanan ve denklem numarası ile numaralandırılan birim maliyet ifadelerinin, ekserji formlarına göre ayrı ayrı, sisteme yerleştirilen hayali ekipmanlarda toplandığı kurgulanır ve bu hayali ekipmanlar için maliyet denklemi yazılır.

Elde edilen denklemlerdeki bilinmeyen birim maliyetleri hesaplamak için matris gösterimine ihtiyaç duyulur. Matris sisteminde; satırlara, maliyet denge denklemlerinin denklem numaralarına göre, sütunlara ise maliyet denge denklemlerinde tanımlanan başlıca ürünlere (koyu harfle gösterilen birim maliyet)

göre maliyet denge denklemlerindeki birim maliyet ifadelerinin katsayıları konumunda olan ekserji ifadeleri yerleştirilir.

Matris gösteriminde, her bir sütundaki ekserjiler sistemdeki ekipmanlar arasındaki etkileşimi göstermektedir. Matrisin köşegeni ekipmanların, hayali ekipmanların ve sistem sınırının başlıca ürünleridir ve sistemin ürünlerini içeren sütun hariç her bir sütundaki ekserjilerin toplamı sıfır olur.



## BÖLÜM 5

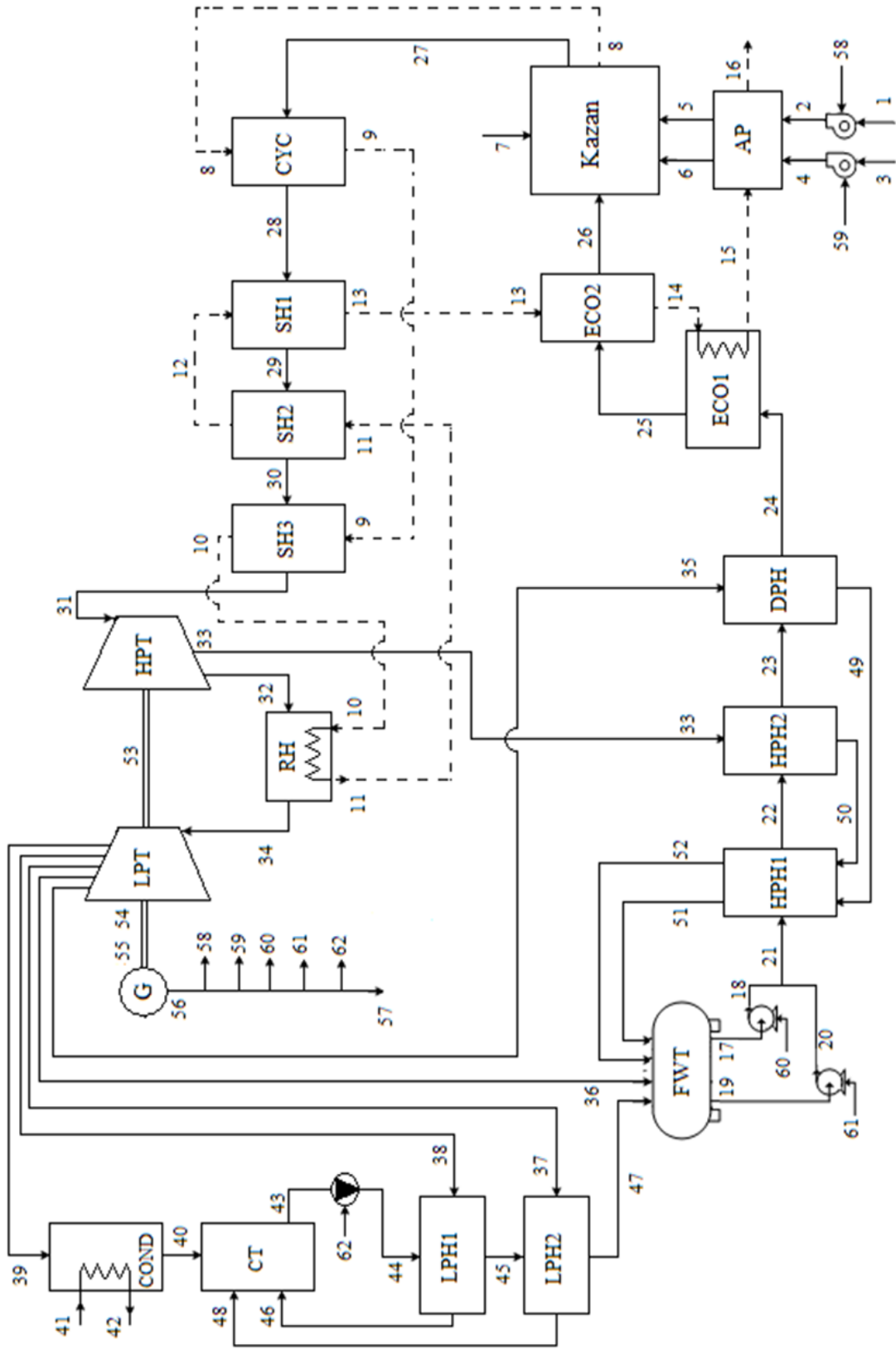
### TERMİK SANTRAL UYGULAMASI

Yapılan çalışmada, termik santrallerden üretilen elektriğin birim maliyetinin hesaplanabilmesi amacıyla Zonguldak Çatalağzı'nda kurulu bulunan 160 MW elektrik üretim kapasitesine sahip bir termik santralden alınan anlık ölçüm verileri kullanılarak ekserji ve termoekonomi analizi yapılmıştır. İlk olarak ekserji akımları belirlenerek ekserji performans değerlendirmesi yapılmış, daha sonra SPECO ve MOPSA termoekonomik analiz metotlarına göre sistemin ayrı ayrı termoekonomik analizi yapılmıştır.

#### 5.1. SİSTEMİN TANIMLANMASI

Termik santraller genel olarak buhar kazanı, türbin, kondanser ve kazan besleme pompasından oluşmaktadır. Analizi yapılan termik santralin şematik gösterimi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

Analizi yapılan sistemde, bir adet kömür beslemeli buhar kazanı bulunmaktadır. Kazanda, yanmanın sağlanması için gerekli olan hava birincil ve ikincil hava fanları yardımıyla tedarik edilir. Fanlar vasıtasıyla atmosferden alınan hava, buhar kazanının performansını arttırmak amacıyla bir ısı değiştiricide (AP) ön ısıtmaya tabi tutulur. Kazandan çıkan buhar ve yanma sonucu oluşan baca gazları siklona (CYC) gönderilir. Aynı zamanda ısı değiştirici olarak kullanılan siklonda, baca gazında bulunan çevreye zararlı katı partiküller çöktürülür ve baca gazının ısısından yararlanılarak buharın sıcaklığı artırılır. Siklondan çıkan buhar, üç adet ısı değiştiricisinden oluşan buhar ısıtma ünitesine (SH1, SH2, SH3) gönderilir ve burada yüksek sıcaklıklı baca gazı sayesinde kademe kademe sıcaklığı yükseltilir. Yüksek sıcaklıklı buhar yüksek basınç türbinine (HPT) gönderilir ve burada buharın



Şekil 5.1. Analizi yapılan termik santralin şematik gösterimi.

enerjisinden faydalanılarak iş üretilir. Yüksek basınç türbininde kullanılan buharın bir kısmı, enerjisinin yükseltilmesi için bir ısı değiştiriciden (RH) geçirilerek tekrardan ısıtılır ve alçak basınç türbinine (LPT) gönderilir. Alçak basınç türbininden buhar beş farklı kola ayrılarak çıkar. Beşinci kademedan çıkan buhar sistem tarafından tekrar kullanmaya elverişli duruma getirmek için hava soğutmalı kondansere gönderilerek su fazına geçirilir. Kondanserden çıkan su akımı kondanser tankında (CT) depolanır. Kondanser tankında toplanan su akımları kondanser pompası ile basıncı artırılarak alçak basınç ısı değiştiricilerine (LPH1 ve LPH2) gönderilerek sıcaklığı artırılır. Alçak basınç ısı değiştiricilerinde su akımının sıcaklığını arttırmak için sırasıyla alçak basınç türbininden çıkan dördüncü ve üçüncü buhar akımları kullanılır ve kondanser tankına gönderilir. Alçak basınç ısı değiştiricisinden ısıtılarak çıkan su akımı besleme suyu tankına (FWT) gönderilir. Su besleme tankında, ayrıca, alçak basınç türbininden çıkan ikinci akım, yüksek basınç türbininden çıkarak HPH2 ısı değiştiricisinde kullanılan buhar akımı ve alçak basınç türbininin birinci kademesinden çıkarak DPH ısı değiştiricisinde kullanılan buhar akımları gönderilir. Buradan çıkan su akımı iki adet besleme pompası ile basınçları yükselttilerek yüksek basınç ısı değiştiricilerine (HPH1 ve HPH2) gönderilir. Buradan da sırasıyla DPH ve ekonomizer ünitelerine (ECO1 ve ECO2) gönderilerek kazana gönderilmeden önce ön ısıtma uygulanır. Ekonomizer ünitesinde su akımının ısıtılması için baca gazı kullanılır. Ekonomizer ünitesinde çıkan baca gazı hava ön ısıtma ünitesine gönderilir ve burada havanın ön ısıtmasında kullanıldıktan sonra atmosfere salınır. Yüksek basınç türbininden ve alçak basınç türbininden üretilen iş, jeneratör (G) vasıtasıyla elektriğe dönüştürülür. Sistemdeki pompa ve fanların çalışması için gerekli olan elektrik ihtiyacı sistemden üretilen elektrik tarafından sağlanır. Kalan kısmı ise şebekeye gönderilir.

### **5.1.1. Sistem Analizi İçin Yapılan Kabuller**

Termik santralin ekserji ve termoeconomik analizi için yapılan kabuller aşağıda verilmiştir:

- Sistem zamanla değişmeyen açık sistem prensibine uygundur.
- Yanma reaksiyonu tam olarak gerçekleşmektedir.

- Hava ve yanma sonucu oluşan baca gazları ideal gaz prensibine uygundur.
- Çevre şartlarının sıcaklık ve basınç değerleri sırasıyla 288.15 K ve 101.325 kPa'dır.
- Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.

### 5.1.2. Yanma Tepkimesi

Analizi yapılan termik santralde yakıt olarak kömür kullanılmaktadır. Kömürün sabit bir kimyasal formülü bulunmamaktadır. Bundan dolayı, sistemde kullanılan kömürün kimyasal formülünü belirlemek için kömürün elementer analizi yapılmıştır. Elementer analiz sonucunda elde edilen değerler Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Sistemde kullanılan kömürün fiziksel ve kimyasal analizi

| Kimyasal Analiz (%)    |          | Fiziksel Analiz (%) |       |
|------------------------|----------|---------------------|-------|
| Toplam Nem             | 15.21    | Karbon ( C )        | 81.66 |
| Kül                    | 10.58    | Hidrojen ( H )      | 5.41  |
| Uçucu Madde            | 31.76    | Azot ( N )          | 1.81  |
| Sabit Karbon           | 42.45    | Oksijen ( O )       | 10.23 |
| Oksijen                | 7.59     | Kükürt ( S )        | 0.89  |
| Alt Isıl Değer (kJ/kg) | 23228.26 |                     |       |

Çizelge 5.1'de fiziksel analiz kısmında sunulan değerler kömür içindeki atomların kütleli dağılımlarını göstermektedir. Atomların mol sayıları,

—

ifadesi kullanılarak elde edilir. Bu ifadede  $n$ ,  $m$  ve  $M$  sırasıyla mol sayısını, kütleyi ve molar ağırlığı ifade etmektedir. Denklem 5.1 kullanılarak kömür içeriğindeki atomların molar dağılımları sırasıyla %52.45 karbon, %41.41 hidrojen, %0.99 azot, %4.94 oksijen ve %0.21 kükürt olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak kömürün kimyasal formülü,

(5.2)

olarak bulunmuştur. Bu gösterimde en düşük molar yüzdeye sahip olan kükürtün mol sayısı bire tamamlanmış ve buna bağlı olarak diğer atomların mol sayıları da aynı oranda genişletilmiştir. Kömürün molar ağırlığı ise,

ifadesi kullanılarak bulunmuştur. Bu ifadede kömür bileşimindeki her bir atomun mol sayısı molar ağırlığı ile çarpılmış ve her bir atom için elde edilen değerler toplanmıştır. Buna bağlı olarak, kömürün molar ağırlığı  $M = 3698.173$  kg/kmol olarak hesaplanmıştır.

Yanma için gerekli olan havanın bileşiminin ise molar olarak %77.48 azot, %20.59 oksijen, %0.03 karbondioksit ve %1.9 su buharından oluştuğu kabul edilmiştir (Bejan et al., 1996).

Tepkimeye giren 14.78 kg/s'lik kömür miktarı ve 163.1 kg/s'lik toplam hava miktarı için yanma denklemi,

olarak elde edilir. Yanma sonucu meydana gelen baca gazı kütleli olarak % 24.92 karbondioksit, %5.11 su buharı, % 0.21 oksijen, % 69.62 azot ve % 0.14 kükürt dioksitten oluşmaktadır.

## 5.2. SİSTEMİN EKSERJİ ANALİZİ

### 5.2.1. Sistem Noktalarının Ekserji Değerlerinin Hesaplanması

Sisteme ait ekipmanların giriş ve çıkış noktaları Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu noktalara ait ekserji değerlerini hesaplamak için gerekli olan kütleli debi, basınç ve sıcaklık değerleri anlık olarak sistem üzerinden temin edilmiştir.

Madde türünün su buharı olduğu noktaların ekserji değerleri Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak elde edilmiştir. Madde türünün su olduğu noktaların ekserji değerleri ise Denklem 4.15 ve 4.16 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda gerekli olan entalpi, entropi, özgül hacim ve sabit basınçtaki özgül ısı değerleri, noktaların sıcaklık ve basınç değerlerine bağlı olarak REFPROP bilgisayar programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Hava ve baca gazı akımlarına ait sistem noktalarının ekserji değerleri ise Denklem 4.11 ve 4.12 kullanılarak hesaplanmıştır. Havanın farklı sıcaklık değerleri için sabit basınçtaki özgül ısı değerleri,

$$\begin{aligned} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ & \text{---} & & \end{aligned}$$

ifadesi kullanılarak bulunmuştur.

Çizelge 4.3. kullanılarak baca gazını oluşturan bileşenlerin kütleli oranlarına göre baca gazının sabit basınçta özgül ısı değerinin sıcaklıkla değişim denklemi:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---}$$

olarak hesaplanmıştır. Yanma sonucu oluşan baca gazının evrensel gaz sabiti ise baca gazını oluşturan her bir bileşenin gaz sabiti ile kütleli oranları çarpımına göre elde edilmiş ve baca gazının evrensel gaz sabiti kJ/kgK olarak hesaplanmıştır.

Kömürün kimyasal ekserjisi ise Denklem 4.17 kullanılarak Çizelge 5.1'in kimyasal analiz kısmındaki değerlere göre hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen sistem noktalarına ait mekanik ekserji, termal ekserji ve termomekanik ekserji değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Termik santrale ait termodinamik değerler

| No | Madde    | (kg/s) | $T$<br>(K) | $P$<br>(kPa) | (kW)    | (kW)      | (kW)      |
|----|----------|--------|------------|--------------|---------|-----------|-----------|
| 1  | Hava     | 62.27  | 288.15     | 101.33       | -       | -         | -         |
| 2  | Hava     | 62.27  | 312.02     | 118.36       | 800.24  | 58.79     | 859.03    |
| 3  | Hava     | 100.83 | 288.15     | 101.33       | -       | -         | -         |
| 4  | Hava     | 100.83 | 300.64     | 113.85       | 971.84  | 26.71     | 998.55    |
| 5  | Hava     | 62.27  | 555.61     | 117.16       | 747.72  | 5070.44   | 5818.16   |
| 6  | Hava     | 100.83 | 539.33     | 109.05       | 612.50  | 7377.19   | 7989.69   |
| 7  | Kömür    | 14.78  | -          | -            | -       | -         | 362264.6* |
| 8  | Bacagazı | 177.88 | 1253.96    | 115.05       | 1810.62 | 124866.51 | 126677.14 |
| 9  | Bacagazı | 177.88 | 1217.71    | 113.59       | 1627.64 | 117777.20 | 119404.84 |
| 10 | Bacagazı | 177.88 | 1129.23    | 112.84       | 1533.49 | 100947.33 | 102480.83 |
| 11 | Bacagazı | 177.88 | 1002.48    | 110.74       | 1265.42 | 78168.54  | 79433.97  |
| 12 | Bacagazı | 177.88 | 828.51     | 108.40       | 960.56  | 50021.16  | 50981.73  |
| 13 | Bacagazı | 177.88 | 713.32     | 107.53       | 846.92  | 33791.33  | 34638.25  |
| 14 | Bacagazı | 177.88 | 647.93     | 105.32       | 551.02  | 25589.60  | 26140.62  |
| 15 | Bacagazı | 177.88 | 574.42     | 102.81       | 207.31  | 17380.25  | 17587.56  |
| 16 | Bacagazı | 177.88 | 412.63     | 97.9         | -489.98 | 3988.40   | 3498.42   |
| 17 | Su       | 59.27  | 452.55     | 1032         | 62.14   | 8956.2    | 9018.34   |
| 18 | Su       | 59.27  | 456.34     | 18355        | 1209    | 9195.5    | 10404.5   |
| 19 | Su       | 59.98  | 452.55     | 1030         | 62.75   | 9063.5    | 9126.25   |
| 20 | Su       | 59.98  | 456.34     | 18359        | 1223.78 | 9305.69   | 10529.48  |
| 21 | Su       | 119.25 | 456.34     | 18357        | 2432.82 | 18501.16  | 20933.98  |
| 22 | Su       | 119.25 | 485.92     | 18133        | 2494.26 | 25139.5   | 27633.76  |
| 23 | Su       | 119.25 | 520.4      | 18072        | 2619.77 | 34585.59  | 37205.36  |
| 24 | Su       | 119.25 | 525.64     | 17994        | 2632.41 | 36237.92  | 38870.33  |
| 25 | Su       | 119.25 | 545.49     | 17486        | 2658.50 | 43244     | 45902.5   |

Çizelge 5.2. (devam ediyor).

| No | Madde     | (kg/s) | T<br>(K) | P<br>(kPa) | (kW)    | (kW)      | (kW)      |
|----|-----------|--------|----------|------------|---------|-----------|-----------|
| 26 | Su        | 119.25 | 563.35   | 16918      | 2680.53 | 50979     | 53659.53  |
| 27 | Buhar     | 119.25 | 635.38   | 16314      | 1927.82 | 134634.76 | 136562.58 |
| 28 | Buhar     | 119.25 | 644.65   | 15938      | 1883.54 | 140001.39 | 141884.93 |
| 29 | Buhar     | 119.25 | 689.02   | 15638      | 1847.73 | 154874.95 | 156722.68 |
| 30 | Buhar     | 119.25 | 781.53   | 15092      | 1783.23 | 176894.05 | 178677.28 |
| 31 | Buhar     | 119.25 | 829.60   | 14896      | 1759.79 | 187085.17 | 188844.96 |
| 32 | Buhar     | 103.74 | 643.15   | 3890       | 393.17  | 126402.81 | 126795.98 |
| 33 | Buhar     | 15.51  | 635.93   | 3667       | 55.3    | 18679.75  | 18735.05  |
| 34 | Buhar     | 103.74 | 785.32   | 3580       | 360.97  | 145922.96 | 146283.93 |
| 35 | Buhar     | 6.97   | 753.68   | 2353       | 15.70   | 9183.04   | 9198.74   |
| 36 | Buhar     | 6.86   | 621.15   | 1100       | 6.84    | 7295.80   | 7302.64   |
| 37 | Buhar     | 7.12   | 521.35   | 250        | 1.05    | 5540.08   | 5541.13   |
| 38 | Buhar     | 4.87   | 395.72   | 180        | 0.37    | 3128.42   | 3128.79   |
| 39 | Buhar     | 77.92  | 316.90   | 8.625      | -7.15   | 16946.73  | 16939.57  |
| 40 | Su        | 77.92  | 314.72   | 8.23       | -7.31   | 376.02    | 368.71    |
| 41 | Hava      | 816.75 | 288.15   | 101.33     | -       | -         | -         |
| 42 | Hava      | 816.75 | 294.79   | 108.95     | 4900.74 | 61.78     | 4962.53   |
| 43 | Su        | 89.91  | 315.12   | 35.28      | -5.98   | 446.66    | 440.68    |
| 44 | Su        | 89.91  | 323.10   | 1618       | 137.91  | 737.11    | 875.02    |
| 45 | Su        | 89.91  | 357.48   | 1512       | 130.79  | 2719.01   | 2849.80   |
| 46 | Su        | 4.87   | 328.73   | 120        | 0.09    | 53.26     | 53.35     |
| 47 | Su        | 89.91  | 406.87   | 1312       | 116.76  | 7404.58   | 7521.34   |
| 48 | Su        | 7.12   | 314.72   | 125        | 0.17    | 34.35     | 34.52     |
| 49 | Su        | 6.97   | 551.26   | 1835       | 12.09   | 7251.67   | 7263.76   |
| 50 | Su        | 15.51  | 503.72   | 3475       | 63.27   | 3970.18   | 4033.46   |
| 51 | Su        | 6.97   | 457.81   | 1268       | 9.22    | 1117.73   | 1126.95   |
| 52 | Su        | 15.51  | 457.81   | 1268       | 20.51   | 2487.24   | 2507.75   |
| 53 | Şaft Gücü | -      | -        | -          | -       | -         | 41845     |
| 54 | Şaft Gücü | -      | -        | -          | -       | -         | 101620    |
| 55 | Şaft Gücü | -      | -        | -          | -       | -         | 143465    |
| 56 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 143250    |
| 57 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 136030    |
| 58 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 1360      |
| 59 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 1320      |
| 60 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 1830      |
| 61 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 1860      |
| 62 | Elektrik  | -      | -        | -          | -       | -         | 850       |



### 5.2.2. Sistem Ekipmanları İçin Ekserji Denge Denklemleri ve Ekserji Verimi Formülleri

Sistemdeki ekipmanların ekserji denge denklemleri Denklem 4.21 kullanılarak yazılmıştır. Ekipmanların ekserji verim formülleri ise ekipman ürününün ekipman yakıtına oranı olarak ifade edilmiştir.

Fan-1 (FAN1):

(5.6)

---

Fan-2 (FAN2):

(5.8)

---

Hava Ön Kızdırıcısı (AP):

(5.10)

---

Kazan (COMB):

(5.12)

---

Ekonomizer-1 (ECO1):

(5.14)

---

Ekonomizer-2 (ECO2):

(5.16)

---

Kondanser (COND):

(5.18)

---

Kondanser Tankı (CT):

(5.20)

---

Kondanser Pompası (CPUMP):

(5.22)

---

Alçak Basınç Isı Değiştiricisi-1 (LPH1):

(5.24)

---

Alçak Basınç Isı Değiştiricisi-2 (LPH2):

(5.26)

---

Besleme Suyu Tankı (FWT):

(5.28)

---

Pompa-1 (PUMP1):

(5.30)

---

Pompa-2 (PUMP2):

(5.32)

---

Yüksek Basınç Isı Değiştiricisi-1 (HPH1):

(5.34)

---

Yüksek Basınç Isı Değiştiricisi-2 (HPH2):

(5.36)

---

DP Isı Değiştiricisi (DPH):

(5.38)

Siklon (CYC):

(5.40)

---

SH1 Isı Değiştiricisi:

(5.42)

---

SH2 Isı Değiştiricisi:

(5.44)

---

SH3 Isı Değiştiricisi:

(5.46)

---

RH Isı Değiştiricisi:

(5.48)

---

Yüksek Basınç Türbini (HPT):

(5.50)

---

Alçak Basınç Türbini (LPT):

(5.52)

---

Jeneratör (G):

(5.54)

---

Toplam sistem için:

(5.56)

---

### 5.2.3. Ekserji Performans Değerlendirme Parametreleri

Yapılan çalışmada ayrıca her ekipman için iyileştirme potansiyeli, ekserji yıkımının sisteme tedarik edilen yakıtta oranı ve ekserji yıkımının sistemin toplam ekserji yıkımına oranı parametreleri hesaplanmıştır.

Bir ekipmanın iyileştirme potansiyeli,

$$\left( \quad \right) \quad (5.58)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır. Ekipmanların ekserji yıkımlarının sisteme tedarik edilen yakıtta oranı,

\_\_\_\_\_

şeklinde ifade edilirken ekipmanların ekserji yıkımlarının sistemin toplam ekserji yıkımına oranı,

\_\_\_\_\_

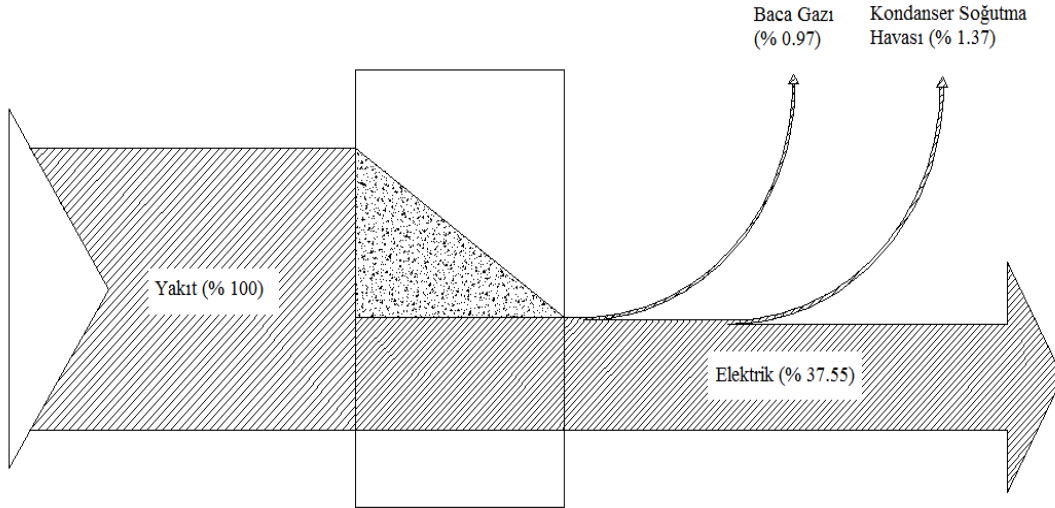
olarak ifade edilir (Colpan ve Yesin, 2006).

Yapılan analiz sonucunda ekipmanların ekserji yıkımları, ekserji verimleri ve ekserji performans değerlendirme parametrelerine ait elde edilen sonuçlar izelge 5.3'de gösterilmektedir. Ayrıca, sistemin Grassmann diyagramı ise şekil 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Ekipmanların ekserji performans parametreleri

| Ekipman          | (kW)      | (kW)      | (kW)      | $\Psi$<br>(%) | (kW)      | y<br>(%) | y*<br>(%) |
|------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|----------|-----------|
| Fan1             | 1360      | 859,03    | 500.97    | 63.16         | 184.56    | 0.14     | 0.23      |
| Fan2             | 1320      | 998,55    | 321.45    | 75.64         | 78.31     | 0.09     | 0.15      |
| Hava Önısıtıcısı | 19445.14  | 17306.27  | 2138.87   | 84.81         | 324.89    | 0.59     | 0.98      |
| Kazan            | 429731.98 | 263239.72 | 166492.26 | 33.24         | 111150.23 | 45.96    | 76.45     |
| Siklon           | 263239.72 | 261289.77 | 1949.95   | 73.18         | 522.98    | 0.54     | 0.90      |
| RH               | 229276.81 | 225717.90 | 3558.91   | 84.55         | 549.85    | 0.98     | 1.63      |
| SH1              | 192866.66 | 191360.93 | 1505.73   | 90.78         | 138.83    | 0.42     | 0.69      |
| SH2              | 236156.65 | 229659.01 | 6497.64   | 77.16         | 1484.06   | 1.79     | 2.98      |
| SH3              | 298082.12 | 291325.79 | 6756.33   | 60.08         | 2697.13   | 1.87     | 3.10      |
| ECO1             | 65010.95  | 63490.06  | 1520.89   | 82.21         | 270.57    | 0.42     | 0.70      |
| ECO2             | 80540.75  | 79800.15  | 740.60    | 91.28         | 64.58     | 0.20     | 0.34      |
| Pompa1           | 10848.34  | 10404.50  | 443.84    | 75.74         | 107.68    | 0.12     | 0.20      |
| Pompa2           | 10986.25  | 10529.48  | 456.77    | 75.44         | 112.18    | 0.13     | 0.21      |
| HPH1             | 32231.2   | 31268.46  | 962.74    | 87.53         | 120.05    | 0.27     | 0.44      |
| HPH2             | 46368.81  | 41238.82  | 5129.99   | 65.10         | 1790.37   | 1.42     | 2.36      |
| DP Heater        | 46404.10  | 46134.09  | 270.01    | 86.04         | 37.69     | 0.07     | 0.12      |
| HP Türbin        | 188844.96 | 187376.03 | 1468.93   | 96.60         | 49.94     | 0.41     | 0.67      |
| LP Türbin        | 146283.93 | 143730.87 | 2553.06   | 97.55         | 62.55     | 0.70     | 1.17      |
| Kondanser        | 16939.57  | 5331.24   | 11608.33  | 29.95         | 8131.64   | 3.20     | 5.33      |
| Kond. Tankı      | 456.58    | 440.68    | 15.90     | 96.52         | 0.55      | 0.00     | 0.01      |
| Kond. Pompası    | 1290.68   | 875.02    | 415.66    | 51.10         | 203.26    | 0.11     | 0.19      |
| LPH1             | 4003.81   | 2903.15   | 1100.66   | 64.21         | 393.93    | 0.30     | 0.51      |
| LPH2             | 8390.93   | 7555.86   | 835.07    | 84.83         | 126.68    | 0.23     | 0.38      |
| FWT              | 18458.68  | 18144.59  | 314.09    | 98.29         | 5.37      | 0.09     | 0.14      |
| Jeneratör        | 143465    | 143250    | 215       | 99.85         | 0.32      | 0.06     | 0.10      |
| Toplam Sistem    | 362264.60 | 144490.95 | 217773.65 | 39.89         | 130903.74 | 60.11    | 100       |





Şekil 5.2. Termik santralin Grassmann diyagramı

### 5.3. SİSTEMİN EKONOMİK ANALİZ

Yapılan çalışmada, yıllık bileşik faiz oranı  $i=10\%$ , sistemin ömrü  $n=25$  yıl, sistemin hurda değeri  $\mu=12\%$ , bakım maliyet faktörünü  $= 1.06$ , sistemin bir yıl içerisindeki çalışma süresi  $=8000$  saat olarak tespit edilmiştir (Kim vd., 1998; Kwak et al., 2003, Balli et al., 2010b). Analizi yapılan termik santralin ilk yatırım maliyeti  $TCI=91670000$  \$'dır. Bu veriler ışığında Denklem 4.24 kullanılarak paranın şimdiki zaman değeri  $PWF=0.092295$ , Denklem 4.27'den ilk yatırım maliyeti geri kazanım faktörü  $CRF=0.110168$ , Denklem 4.28'den sistemin hurda değeri  $SV=11000400$  \$, Denklem 4.29'dan yatırım maliyetinin şimdiki değeri  $PW=90657718$  \$, Denklem 4.30'dan yıllık ödemeler  $AC=9987579.477$  \$/yıl olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin saatlik ilk yatırım maliyeti akımı, Denklem 4.31'den kullanılarak  $1323.35$  \$/h olarak hesaplanmıştır. Denklem 4.32 kullanılarak elde edilen ekipmanların saatlik toplam maliyet akımları ( ) Çizelge 5.4'de gösterilmektedir.

MOPSA metodunun uygulanmasında SPECO metodundan farklı olarak sınır tanımlaması yapılmakta ve bu tanımlama için yapısal maliyetlerin maliyet akımı kullanılmaktadır. Yapısal maliyetleri oluşturan parametreler fabrikanın kurulu olduğu arazinin maliyeti, fabrikada kurulan bina türü tesislerin maliyetleri gibi maliyetlerden oluşmaktadır (Kwak et al., 2003). SPECO metodunda ise böyle bir

tanımlama yoktur. Bundan dolayı MOPSA metodunda kullanılan yapısal maliyetin değeri,

—

ifadesi kullanılarak, SPECO metodu için ekipmanlara maliyet değerleri oranında paylaştırılmıştır. Yukarıdaki eşitlikte terimi, yapısal maliyet değeri hariç, ekipmanların satın alma maliyetlerinin toplamını ifade etmektedir. Elde edilen yeni satın alma değerlerine göre tekrardan ekipmanların maliyet akımları hesaplanmıştır. Ekipmanların maliyet akımı ifadelerinin karışmaması için MOPSA metodunda kullanılacak maliyet akımları ile gösterilirken, SPECO metodunda kullanılacak maliyet akımları ifadesi ile gösterilmektedir. Ekipmanların satın alma maliyetleri ve ekonomik analiz sonucunda elde edilen maliyet akımı değerleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Termik santral ekipmanlarının alış fiyatları ve giydirilmiş alış fiyatlarına göre toplam maliyet akımları

| Ekipman           | Ekipman Alış Fiyatı<br>PEC (10 <sup>3</sup> \$) | Toplam Maliyet Akımı,<br>(\$/h) | Ekipmanların Giydirilmiş Fiyatı,<br>PEC*(10 <sup>3</sup> \$) | Giydirilmiş Fiyatlar için Toplam Maliyet Akımı<br>(\$/h) |
|-------------------|---|---------------------------------|--|--|
| Fan-1             | 250   | 3.6                             | 326.60   | 4.71   |
| Fan-2             | 250   | 3.6                             | 326.60   | 4.71   |
| Hava Önkızdırıcı  | 500   | 7.21                            | 653.20   | 9.42   |
| Kazan             | 5750  | 83                              | 7511.80  | 108.43   |
| Siklon            | 720   | 10.38                           | 940.60   | 13.58  |
| RH                | 1200  | 17.32                           | 1567.67  | 22.63  |
| SH1               | 500   | 7.21                            | 653.20   | 9.43   |
| SH2               | 750   | 10.82                           | 979.80   | 14.14  |
| SH3               | 500   | 7.21                            | 653.20   | 9.43   |
| Ekonomizer -1     | 475   | 6.85                            | 620.54   | 8.95   |
| Ekonomizer -2     | 475   | 6.85                            | 620.54   | 8.95   |
| Pompa-1           | 350   | 5.05                            | 457.24   | 6.6  |
| Pompa-2           | 350   | 5.05                            | 457.24   | 6.6  |
| HPH1              | 450   | 6.49                            | 587.88   | 8.48   |
| HPH2              | 450   | 6.49                            | 587.88   | 8.48   |
| DP Heater         | 400   | 5.77                            | 522.56   | 7.54   |
| HP Türbin         | 20000   | 288.71                          | 26127.97   | 377.17   |
| LP Türbin         | 17000   | 245.4                           | 22208.77   | 320.59   |
| Kondanser         | 4250  | 61.35                           | 5552.19  | 80.15  |
| Kondanser Tankı   | 200   | 2.88                            | 261.28   | 3.77   |
| Kondanser Pompası | 150   | 2.16                            | 195.96   | 2.82   |
| LPH -1            | 600   | 8.66                            | 783.83   | 11.51  |
| LPH-2             | 600   | 8.66                            | 783.83   | 11.51  |
| Su Besleme Tankı  | 250   | 3.6                             | 326.60   | 4.71   |
| Jeneratör         | 13750   | 198.48                          | 17962.98   | 259.3  |
| Yapısal Maliyet   | 21500   | 310.36                          |  |  |
| <b>TOPLAM</b>     | <b>91670</b>                                    |                                 |  |  |

## 5.4. SİSTEMİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

### 5.4.1. SPECO Maliyet Denge Denklemleri ve Çözümlenmeleri

Sistemde bulunan pompa ve fanların çalışması için gereken elektrik enerjisi jeneratörden üretilen elektrikten sağlanmaktadır. Bundan dolayı sistemdeki elektrik akımlarının birim ekserji maliyeti birbirine eşittir. SPECO metodu için ekipmanların maliyet denge denklemleri ve yardımcı denklemleri aşağıda verilmiştir.

Jeneratör (G):

Jeneratörden üretilen elektriğin sistem bileşenlerine dağılımı için P-kuralı yazılarak,

— — — — — — — —

bağıntısı elde edilir.

— — — — — — — —

(5.63)

Türbin grubu için:

(5.64)

— —

Alçak Basınç Türbini (LPT):

(5.66)



Yüksek Basınç Türbini (HPT):

(5.68)



RH Isı Değiştirici:

(5.70)

— —

SH3 Isı Değiştiricisi:

(5.72)

— —

SH2 Isı Değiştiricisi:

(5.74)

— —

SH1 Isı Değiştiricisi:

(5.76)

— —

Siklon (CYC):

(5.78)

— —

Kondanser (COND):

(5.80)

— —

kabul edilmiştir (Bejan vd, 1996).

(5.82)

Alçak Basınç Isı Değiştiricisi-1 (LPH1):

(5.83)

— —

Alçak Basınç Isı Değiştiricisi-2 (LPH2):

(5.85)

— —

Kondanser Tankı (CT):

(5.87)

Kondanser Pompası (CPUMP):

(5.88)

DP Isı Değiştiricisi (DPH):

(5.89)

— —



Yüksek Basınç Isı Değiştiricisi-2 (HPH2):

(5.91)

— —

Yüksek Basınç Isı Değiştiricisi-1 (HPH1):

(5.93)

— —

— —

Besleme Suyu Tankı (FWT):

(5.96)

— —

Pompa-1 (PUMP1):

(5.98)

Pompa-2 (PUMP2):

(5.99)

(5.100)

Ekonomizer-1 (ECO1):

(5.101)

— —

Ekonomizer-2 (ECO2):

(5.103)

— —

Fan-1 (FAN1):

(5.105)

kabul edilmiştir (Bejan vd, 1996).

(5.106)

Fan-2 (FAN2):

(5.107)

kabul edilmiştir (Bejan vd, 1996).

(5.108)

Hava Ön Kızdırıcısı (AP):

(5.109)

— —

\_\_\_\_\_

Kazan (COMB):

(5.112)

Yakıtın maliyet akımı Denklem 4.35 ve 4.36 kullanılarak hesaplanmıştır. Sistemde kullanılan yakıtın 110 \$/ton'luk birim maliyeti için yakıtın saatlik maliyet akımı

olarak elde edilmiştir.

$$558.841 = 6788.1643$$

$$= 12.14 \$/GJ$$

Yukarıda elde edilen elektrik birim ekserji maliyeti, sistemdeki noktaların ekserji maliyet akımı formüllerinde yerine konularak hesaplanan her bir noktanın ekserji maliyeti akımı ve birim ekserji maliyeti değerleri Çizelge 5.5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Termik santrali noktalarına ait ekserji, ekserji maliyeti akışı ve ortalama birim ekserji maliyet değerleri

| No | Madde     | Ekserji (GJ/h) | Maliyet Akımı (\$/h) | Birim Ekserji Maliyeti (\$/GJ) |
|----|-----------|----------------|----------------------|--------------------------------|
| 1  | Hava      | 0              | 0                    | 0                              |
| 2  | Hava      | 3.09           | 64.20                | 20.76                          |
| 3  | Hava      | 0              | 0                    | 0                              |
| 4  | Hava      | 3.59           | 62.38                | 17.35                          |
| 5  | Hava      | 20.95          | 443.00               | 21.15                          |
| 6  | Hava      | 28.76          | 596.27               | 20.73                          |
| 7  | Kömür     | 1304.15        | 5554.67              | 4.26                           |
| 8  | Baca gazı | 456.04         | 8120.39              | 17.81                          |
| 9  | Baca gazı | 429.86         | 7654.25              | 17.81                          |
| 10 | Baca gazı | 368.93         | 6569.61              | 17.81                          |
| 11 | Baca gazı | 285.96         | 5092.10              | 17.81                          |
| 12 | Baca gazı | 183.53         | 3268.11              | 17.81                          |
| 13 | Baca gazı | 124.70         | 2220.35              | 17.81                          |
| 14 | Baca gazı | 94.11          | 1675.70              | 17.81                          |
| 15 | Baca gazı | 63.32          | 1127.41              | 17.81                          |
| 16 | Baca gazı | 12.59          | 224.13               | 17.81                          |
| 17 | Su        | 32.47          | 402.70               | 12.40                          |
| 18 | Su        | 37.46          | 489.30               | 13.06                          |
| 19 | Su        | 32.85          | 407.42               | 12.40                          |
| 20 | Su        | 37.91          | 495.35               | 13.07                          |
| 21 | Su        | 75.36          | 984.66               | 13.07                          |
| 22 | Su        | 99.48          | 1273.00              | 12.80                          |
| 23 | Su        | 133.94         | 1747.53              | 13.05                          |
| 24 | Su        | 139.93         | 1828.14              | 13.06                          |
| 25 | Su        | 165.25         | 2385.38              | 14.44                          |
| 26 | Su        | 193.17         | 2938.99              | 15.21                          |
| 27 | Buhar     | 491.63         | 1517.13              | 3.09                           |
| 28 | Buhar     | 510.79         | 1996.85              | 3.91                           |
| 29 | Buhar     | 564.20         | 3054.04              | 5.41                           |
| 30 | Buhar     | 643.24         | 4892.17              | 7.61                           |
| 31 | Buhar     | 679.84         | 5986.24              | 8.81                           |
| 32 | Buhar     | 456.47         | 4019.16              | 8.81                           |
| 33 | Buhar     | 67.45          | 593.83               | 8.81                           |
| 34 | Buhar     | 526.62         | 5519.30              | 10.48                          |
| 35 | Buhar     | 33.12          | 347.16               | 10.48                          |
| 36 | Buhar     | 26.29          | 275.41               | 10.48                          |
| 37 | Buhar     | 19.95          | 209.18               | 10.48                          |
| 38 | Buhar     | 11.26          | 118.11               | 10.48                          |
| 39 | Buhar     | 60.98          | 639.13               | 10.48                          |

Çizelge 5.5. (devam ediyor).

| No | Madde     | Ekserji<br>(GJ/h) | Maliyet Akımı<br>(\$/h) | Birim Ekserji<br>Maliyeti<br>(\$/GJ) |
|----|-----------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 40 | Su        | 1.33              | 13.93                   | 10.48                                |
| 41 | Hava      | 0                 | 0                       | 0                                    |
| 42 | Hava      | 17.87             | 705.35                  | 39.48                                |
| 43 | Su        | 1.59              | 20.94                   | 13.20                                |
| 44 | Su        | 3.15              | 60.91                   | 19.34                                |
| 45 | Su        | 10.26             | 188.55                  | 18.38                                |
| 46 | Su        | 0.19              | 1.99                    | 10.42                                |
| 47 | Su        | 27.08             | 407.98                  | 15.07                                |
| 48 | Su        | 0.12              | 1.26                    | 10.48                                |
| 49 | Su        | 26.15             | 274.08                  | 10.48                                |
| 50 | Su        | 14.52             | 127.79                  | 8.81                                 |
| 51 | Su        | 4.06              | 42.54                   | 10.48                                |
| 52 | Su        | 9.03              | 79.47                   | 8.81                                 |
| 53 | Şaft Gücü | 150.64            | 1750.41                 | 11.62                                |
| 54 | Şaft Gücü | 365.83            | 4250.88                 | 11.62                                |
| 55 | Şaft Gücü | 516.47            | 6001.30                 | 11.62                                |
| 56 | Elektrik  | 515.70            | 6260.60                 | 12.14                                |
| 57 | Elektrik  | 489.71            | 5945.06                 | 12.14                                |
| 58 | Elektrik  | 4.90              | 59.44                   | 12.14                                |
| 59 | Elektrik  | 4.75              | 57.69                   | 12.14                                |
| 60 | Elektrik  | 6.59              | 79.98                   | 12.14                                |
| 61 | Elektrik  | 6.70              | 81.29                   | 12.14                                |
| 62 | Elektrik  | 3.06              | 37.15                   | 12.14                                |

#### 5.4.2. MOPSA Maliyet Denge Denklemleri ve Çözümlenmeleri

MOPSA metodu genel maliyet denge denklemi kullanılarak sistem ekipmanları için elde edilen maliyet denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

Fan-1 (FAN1):

$$\left( \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right) \quad (5.113)$$

Simgesel gösterim:

Fan-2 (FAN2):

$$\left( \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right) \quad (5.114)$$

Hava Ön Kızdırıcısı (AP):

$$\left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad (5.115)$$

Ekonomizer-1 (ECO1):

$$\left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad (5.116)$$

Ekonomizer-2 (ECO2):

$$\left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right) \quad (5.117)$$

0

Kazan (COMB):

( ) ( )  
) 0 (5.118)  
CHE6 . 0

Siklon (CYC):

( ) ( )  
0 (5.119)  
0

SH1 Isı Değiştiricisi:

( ) ( )  
0 (5.120)  
0

SH2 Isı Değiştiricisi:

( ) ( )  
0 (5.121)  
0

SH3 Isı Değiştiricisi:

( ) ( )  
0 (5.122)  
0



RH Isı Değiştiricisi:

( ) ( )  
0 (5.123)  
0

Kondanser (COND):

( ) ( ) ( )  
0 (5.124)  
12BQ . 0

Kondanser Tankı (CT):

( ) ( )  
0 (5.125)  
0

Kondanser Pompası (CONDP):

( ) ( )  
(5.126)  
E14 .

Alçak Basınç Isı Değiştiricisi-1 (LPH1):

( ) ( )  
0 (5.127)  
0

Alçak Basınç Isı Değişiricisi-2 (LPH2):

( ) ( )  
0 (5.128)  
0

Besleme Suyu Tankı (FWT):

( ) ( )  
( ) 0 (5.129)  
0

Pompa-1 (PUMP1):

( ) ( ) (5.130)  
E18 .

Pompa-2 (PUMP2):

( ) ( ) (5.131)  
E19 .

Yüksek Basınç Isı Değişiricisi-1 (HPH1):

( ) ( ) (5.132)  
( ) 0  
0

Yüksek Basınç Isı Değişiricisi-2 (HPH2):

( ) ( )  
0 (5.133)  
0

DP Isı Değişiricisi (DPH):

( ) ( )  
0 (5.134)  
0

Yüksek Basınç Türbini (HPT):

( ) ( )  
0 (5.135)  
23W . 0

Alçak Basınç Türbini (LPT):

( ) ( )  
) 0 (5.136)  
24W . 0

Jeneratör (G):

(5.137)







$$R =$$

Şekil 5.4. Bilinmeyen ifadelerin birim ekserji maliyetlerinin ve ekipmanların maliyet akımlarının matris gösterimi

Mevcut sistem için oluşturulan matris formları Şekil 5.3 ve 5.4'de gösterilmektedir.

$$A * C = R \quad (5.144)$$

$$C = \text{inv}(A) * R \quad (5.145)$$

Matris sistemi Denklem 5.145 kullanılarak, MATLAB programı yardımıyla çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 5.6'dan da görüldüğü gibi MOPSA metodu uygulandığında sistemden üretilen elektriğin birim maliyeti 14.06 \$/GJ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.6. MOPSA metoduna göre bilinmeyen ifadelerin birim ekserji maliyet değerleri

| \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ  | \$/kWh  | \$/GJ  | \$/kWh  | \$/GJ  |
|--------|-------|--------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 0.091  | 25.28 | 0.0732 | 20.33 | -0.1112 | -30.88 | -0.0357 | -9.917 | -0.0741 | -20.58 |

| \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ  | \$/kWh  | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ |
|--------|-------|--------|-------|---------|--------|---------|-------|--------|-------|
| 0.0339 | 9.416 | -0.024 | -6.66 | -0.0213 | -5.916 | -0.0132 | -3.66 | -0.009 | -2.38 |

| \$/kWh  | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ   | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ  |
|---------|-------|--------|-------|---------|---------|--------|-------|---------|--------|
| -0.0197 | -5.47 | 0.1716 | 47.66 | -0.1699 | -47.195 | 0.2431 | 67.53 | -0.0145 | -4.027 |

| \$/kWh  | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ  |
|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|--------|
| -0.0182 | -5.05 | -0.0276 | -7.66 | 0.0783 | 21.75 | 0.0786 | 21.83 | -0.0111 | -3.083 |

| \$/kWh  | \$/GJ  | \$/kWh  | \$/GJ  | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ |
|---------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| -0.0049 | -1.361 | -0.0237 | -6.583 | 0.0535 | 14.86 | 0.0473 | 13.14 | 0.0506 | 14.06 |

| \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ | \$/kWh  | \$/GJ | \$/kWh | \$/GJ |
|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 0.0491 | 13.64 | 0.0435 | 12.08 | 0.0852 | 23.67 | -0.0059 | -1.64 |        |       |

MOPSA metodu sonucunda elde edilen değerlere göre ekipmanların maliyet akımları Çizelge 5.7’de gösterilmektedir.

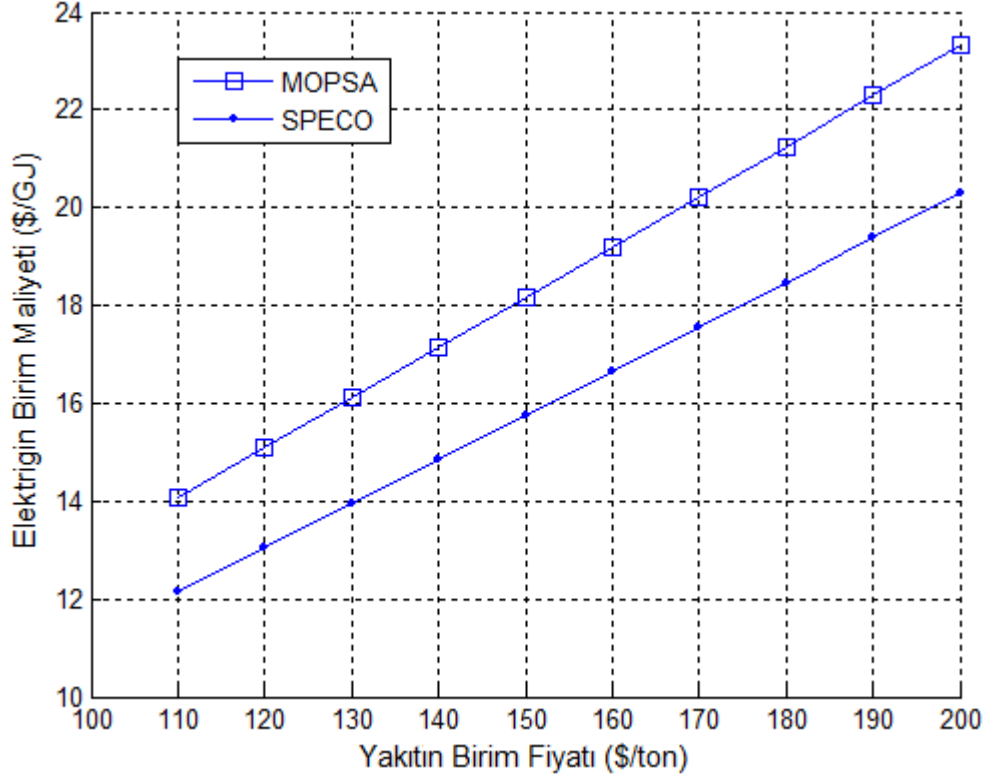


Çizelge 5.7. Termik santralde her bir ekipman için ekserji türlerinin maliyet akışları

| Ekipman | (\$/h)  | (\$/h)   | (\$/h)   | (\$/h)  | (\$/h)   | (\$/h)  | (\$/h)  | (\$/h)   |
|---------|---------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|
| FAN1    | -68.76  | 0        | 0        | 0       | 2.56     | 72.78   | -2.98   | -3.6     |
| FAN2    | -66.74  | 0        | 0        | 0       | 1.16     | 71.09   | -1.91   | -3.6     |
| AP      | 0       | 0        | 0        | 0       | 114.42   | -94.51  | -12.7   | -7.21    |
| COMB    | 0       | 0        | -5554.67 | 0       | 6652.17  | -25.76  | -988.74 | -83      |
| CYC     | 0       | 0        | 0        | 0       | 41.32    | -19.36  | -11.58  | -10.38   |
| RH      | 0       | 0        | 0        | 0       | 64.05    | -25.59  | -21.14  | -17.32   |
| SH1     | 0       | 0        | 0        | 0       | 28.88    | -12.73  | -8.94   | -7.21    |
| SH2     | 0       | 0        | 0        | 0       | 80.88    | -31.47  | -38.59  | -10.82   |
| SH3     | 0       | 0        | 0        | 0       | 57.35    | -10.02  | -40.12  | -7.21    |
| ECO1    | 0       | 0        | 0        | 0       | 42.95    | -27.07  | -9.03   | -6.85    |
| ECO2    | 0       | 0        | 0        | 0       | 34.59    | -23.34  | -4.4    | -6.85    |
| PUMP1   | -92.52  | 0        | 0        | 0       | 10.41    | 89.8    | -2.64   | -5.05    |
| PUMP2   | -94.04  | 0        | 0        | 0       | 10.53    | 91.27   | -2.71   | -5.05    |
| HPH1    | 0       | 0        | 0        | 0       | 10.86    | 1.35    | -5.72   | -6.49    |
| HPH2    | 0       | 0        | 0        | 0       | 25.58    | 11.37   | -30.46  | -6.49    |
| DPH     | 0       | 0        | 0        | 0       | 6.6      | 0.77    | -1.6    | -5.77    |
| HPT     | 0       | 2236.4   | 0        | 0       | -1827.23 | -111.74 | -8.72   | -288.71  |
| LPT     | 0       | 4806.73  | 0        | 0       | -4516.84 | -29.33  | -15.16  | -245.4   |
| COND    | 0       | 0        | 0        | 851.17  | -720.87  | -0.01   | -68.94  | -61.35   |
| CT      | 0       | 0        | 0        | 0       | 2.88     | 0.09    | -0.09   | -2.88    |
| CONDP   | -42.98  | 0        | 0        | 0       | 12.64    | 34.97   | -2.47   | -2.16    |
| LPH1    | 0       | 0        | 0        | 0       | 15.83    | -0.63   | -6.54   | -8.66    |
| LPH2    | 0       | 0        | 0        | 0       | 14.89    | -1.27   | -4.89   | -8.66    |
| FWT     | 0       | 0        | 0        | 0       | 7.89     | -2.42   | -1.87   | -3.6     |
| G       | 7242.88 | -7043.13 | 0        | 0       | 0        | 0       | -1.27   | -198.48  |
| BOUN    | 0       | 0        | 0        | -851.17 | -173.51  | 41.75   | 1293.29 | -310.36  |
| Toplam  | 6877.84 | 0        | -5554.67 | 0       | 0        | 0       | 0       | -1323.17 |

Çizelge 5.7'den de görüldüğü gibi sistemin ilk yatırım maliyet akımı 1323.17 \$/h, sistemde kullanılan yakıtın maliyet akımı 5554.67 \$/h ve sistemden üretilen elektriğin maliyet akımı ise 6877.84 \$/h olarak hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmada, farklı yakıt maliyetleri için sistemden üretilen elektriğin birim maliyetinin değişimi incelenmiştir. Her iki metot uygulanırken, sistemde kullanılan kömürün birim maliyeti değiştirilmiş ve buna bağlı olarak sistemden üretilen elektriğin birim maliyeti için uygulanan metotlar ile elde edilen değerler Şekil 5.5'de gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Sistemde üretilen elektrik maliyetinin sistemde kullanılan yakıtın birim maliyeti ile değişimi

Beklendiği gibi, kömürün birim maliyetinin artmasıyla sistemden üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti artmaktadır. Kullanılan kömürün birim maliyeti 110 \$/ton iken, sistemden üretilen elektriğin birim maliyeti SPECO metodu uygulandığında 12.14 \$/GJ, MOPSA metodu uygulandığında 14.06 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. Kömürün birim maliyeti 200 \$/ton'a arttırıldığında, elektriğin birim maliyeti SPECO metodunda 20.28 \$/GJ'e yükselirken, MOPSA metodunda 23.34 \$/GJ'e yükselmiştir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, Zonguldak Çatalağzı'nda kurulu bulunan 160 MW kapasiteli termik santralin enerji ve termoekonomik analiz yoluyla performansı değerlendirilmiştir. Yapılan ekserji analizi sonucunda, en düşük ekserji verimi sırasıyla % 29.95 ile kondanserde ve % 33.24 ile kazanda meydana geldiği tespit edilmiştir. Maksimum ekserji yıkımı ise sırasıyla 166492.26 kW ile kazanda ve daha sonra 11608.33 kW ile kondanserde meydana geldiği tespit edilmiştir. Sistemin toplam ekserji verimi ve sistemde meydana gelen toplam ekserji yıkımı ise sırasıyla % 39.89 ve 217773.65kW olarak hesaplanmıştır.

En yüksek iyileştirme potansiyelinin sırasıyla 111150.23 kW ile kazanda ve 8131.64 kW ile kondanserde olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı sistemde iyileştirme çalışmaları yapılırken dikkate alınacak öncelikli ekipmanlar kazan ve kondanserdir. Sistemin toplam iyileştirme potansiyeli ise 130903.74kW olarak bulunmuştur.

Yapılan termoekonomik analiz sonucunda SPECO ve MOPSA termoekonomik analiz metotları ile santralde üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti hesaplanarak kıyaslanmıştır. SPECO analizi sonucunda sistemden üretilen elektriğin birim maliyeti 12.14 \$/GJ olarak bulunurken, MOPSA analizi sonucunda 14.06 \$/GJ olarak bulunmuştur. Üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti için farklı sonuçlar elde edilmesinin nedeni; her iki metodun farklı prensiplere sahip olması ve her iki metot için yapılması gereken farklı kabullerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

İki metot arasındaki en temel farklılık; SPECO metodunda termal ve mekanik ekserjilerin toplamı olan termomekanik ekserji kullanılırken, MOPSA metodunda termomekanik ekserjinin termal ve mekanik ekserji olarak ikiye ayrılarak

kullanılması zorunluluğudur. Termomekanik ekserji termal ve mekanik ekserji bileşenlerine ayrılmadığında, analizi yapılan termal sistemin ürün maliyetinde bir azalma mümkün olabilir. Fakat, termomekanik ekserjinin bileşenlerine ayrılmadığı bir termoekonomik analiz, ekipman bazında değerlendirildiğinde doğru bir ürün yapısı vermez. Ayrıca, sistemden üretilen elektriğin birim ekserji maliyetinin tahmin edilmesi için bu tür analizin doğruluk payı daha düşüktür. Çünkü, sistemden üretilen elektriğin birim ekserji maliyeti termomekanik ekserjinin mekanik ekserji bileşeni tarafından önemli derecede etkilenirken, sistemin birim maliyeti ise termal ekserji tarafından etkilenmektedir.

Uygulama itibarıyla MOPSA metodu, SPECO metoduna kıyasla daha basittir. SPECO metodunda sistemdeki istasyon noktalarının hepsini üretilen elektriğin birim maliyeti cinsinden ifade etmek gerekirken, MOPSA metodunda böyle bir zorunluluk yoktur. Bundan dolayı; MOPSA metodunun uygulanması için oluşturulması gereken maliyet denge denklemlerinin sayısı, SPECO metodunun uygulanabilmesi için gereken maliyet denge denklemlerinin sayısından oldukça azdır. Bu durum, büyük ve karmaşık sistemler için MOPSA metodunu daha cazip hale getirmektedir.

Ayrıca yapılan bu çalışmada, sistemde üretilen elektriğin birim maliyetinin sistemde kullanılan yakıtın birim fiyatına göre değişimi incelenmiştir. Beklendiği gibi yakıt fiyatının artmasıyla sistemde üretilen elektriğin birim maliyeti lineer olarak artmaktadır. MOPSA metodu uygulandığında, kullanılan yakıtın birim fiyatındaki artışa göre sistemde üretilen elektriğin birim maliyetindeki artış daha fazladır. SPECO metodunda ise bu artış MOPSA metoduna kıyasla daha az olmuştur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar; termal sistemlerin projelerinin hazırlanmasında veya kurulu sistemlerin iyileştirme çalışmalarında termodinamik analizin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu sebeple, termal sistemler incelenirken termodinamik analizin yanı sıra ekonomik ve çevresel faktörlerin de göz önüne alındığı analizler ön plana çıkmakta ve sistemlerin değerlendirmesinde daha doğru fikirler vermektedir.

## KAYNAKLAR

Abam, D.P.S. and Moses, N.N., “Computer simulation of a gas turbine performance”, *Global Journal of Researches in Engineering*, 11 (1): 37-44 (2011).

Abusoglu, A. and Kanoglu, M., “Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (9): 2295-2308 (2009,a).

Abusoglu, A. and Kanoglu, M., “Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1- Formulations”, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2-3): 234-241 (2009,b).

Abusoglu, A. and Kanoglu, M., “Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 2- Application”, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2-3): 242-249 (2009,c).

Balli, O., Aras, H. and Hepbasli, A., “Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part I-Methodology”, *Energy Conversion and Management*, 51 (11): 2252-2259 (2010,a).

Balli, O., Aras, H. and Hepbasli, A., “Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part II- An application”, *Energy Conversion and Management*, 51 (11): 2260-2271 (2010,b).

Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., “Thermal Design and Optimization”, *John Wiley and Sons, Inc.*, New York, 113-460 (1996) .

Cerqueira, S.A.A.G. and Nebra, S.A., “Cost attribution methodologies in cogeneration systems”, *Energy Conversion and Management*, 40 (15-16): 1587-1597 (1999).

Colpan, C.O. and Yeşin, T., “Energetic, exergetic and thermoeconomic analysis of Bilkent combined cycle cogeneration plant”, *International Journal of Energy Research*, 30: 875-894 (2006).

Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., “Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 369-791 (1996).

Dincer, I. and Rosen, M.A., “Exergy: energy, environment and sustainable development”, *Elsevier*, 26-34 (2007).

Elliot, T.C., Chen, K. and Swanekamp, R.C., “Standard Handbook of Powerplant Engineering, Second Edition”, *McGraw Hill*, 2.1-2.33 (1998).

Elektrik Üretim Anonim Şirketi, “2010 Yıllık Raporu”, *EÜAŞ*, Ankara, 22-29 (2010).

International Energy Agency, “ 2011 Key World Energy Statistics”, *IEA*, Paris, 24-25 (2011).

İnternet: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, “Türkiye brüt elektrik enerjisi üretiminde birincil enerji kaynak paylarının yıllar itibariyle gelişimi”, <http://www.teias.gov.tr/istatistik2010/%C4%B0statistik%202010.htm>, (2011).

Kim, S., Oh, S., Kwon, Y. and Kwak, H., “Exergoeconomic analysis of thermal systems”, *Energy*, 23 (5): 393-406 (1998).

Kotas, T.J., “The exergy method of thermal plant analysis”, *Krieger Publishing Company*, Florida, 32-45 (1995).

Kwak, H., Byun, G., Kwon, Y. and Yang, H., “Cost structure of CGAM cogeneration system”, *International Journal of Energy Research*, 28: 1145-1158 (2004).

Kwak, H., Kim, D. and Jeon, J., “Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants”, *Energy*, 28 (4): 343-360 (2003).

Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G., “ SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems”, *Energy*, 31 (8-9): 1257-1289 (2006).

Lozano, M.A. and Valero, A., “Theory of the exergetic cost”, *Energy*, 18 (9): 939-960 (1993).

Modesto, M. and Nebra, S.A., “Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill”, *Applied Thermal Engineering*, 29 (11-12): 2127-2136 (2009).

Ozdemir, K., Hepbasli, A. and Eskin, N., “Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant”, *Applied Thermal Engineering*, 30 (13): 1621-1631 (2010).

Rosen, M.A. and Dincer, I., “Thermoeconomic analysis of power plants: an application to a coal fired electrical generating station”, *Energy Conversion and Management*, 44 (17): 2743-2761 (2003).

Sciubba, E. and Wall, G., “ A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004”, *International Journal of Thermodynamics*, 10 (1): 1-26 (2007).

Stepanov, V.S., “Chemical energies and exergies of fuels”, *Energy*, 20 (3): 235-242 (1995).

Tsatsaronis, G., "Exergoeconomics: Is it only a new name?", *Chemical Engineering Technology*, 19: 163-169 (1996).

Valero, A., Lozano, M.A. and Munoz, M., "A general theory of exergy saving: Part I. On the exergetic cost, Part II. On the thermoeconomic cost, Part III. Energy saving and thermoeconomics", *Computer-Aided Engineering of Energy Systems*, New York, 3: 1-21, (1986).

Zaleta-Aguilar, A., Correas-Uson, L., Kubiak-Szyska, J. and Sierra-Espinosa, F.Z., "Concept on thermoeconomic evaluation of steam turbines", *Applied Thermal Engineering*, 27 (2-3): 457-466 (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt UYSAL 1987 yılında Eskişehir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Eskişehir Gazi Lisesi’nden mezun oldu. 2004 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Uşak Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü kazandı ve 2008 yılında aynı bölümden fakülte birincisi olarak mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Bilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Temmuz 2011 – Eylül 2011 tarihleri arasında Chung-Ang University (Seoul/South Korea)’de Misafir Araştırmacı olarak görev yaptı. Halen Karabük Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karabük Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel: (370) 433 20 21

E-posta: cuneytuysal@karabuk.com.tr