AFŞİN-ELBİSTAN B KÖMÜR SANTRALİNİN EKSERJİ VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ahmet EGE

DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2012
ANKARA

Ahmet EGE tarafından hazırlanan “AFŞİN-ELBİSTAN B KÖMÜR SANTRALİNİN EKSERJİ VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN …….....
Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İbrahim DİNÇER …….....
TÜBİTAK MAM

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN …….....
Enerji Sistemleri Müh. Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ …….....
Enerji Sistemleri Müh. Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA …….....
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL …….....
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, A.D.Ü.

Tarih: 14/12/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU …….....
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet EGE

AFŞİN-ELBİSTAN B KÖMÜR SANTRALİNİN EKSERJİ VE TERMOEKONOMİK ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Ahmet EGE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2012

ÖZET

Çalışma, ekserji analizi olarak da nitelendirilen termodinamiğin ikinci kanunun linyit yakıtlı santrale belirsizlik analizi ve termoekonomi uygulamasıyla; santral ve bileşenlerinin tasarımsal/işletme koşullarında enerji ve ekserji verimlerini belirlemek, santralin birinci ve ikinci kanun verimindeki belirsizlik miktarını, bu belirsizliğe yol açan etmenleri saptamak, termoekonomik parametrelerin önem derecesini araştırma ve optimum çalışma koşullarını belirlemek gibi bir dizi amaca sahiptir. Çeşitli kriterlere göre belirlenen Afşin-Elbistan B Santrali uygulama çalışması olarak ele alınmıştır. Kömürün ekserjisinin belirlenmesinde literatürde kullanılan farklı model ve yöntemler ışığında, santralin yakabileceği en iyi, en kötü ve tasarım kömürleri incelenmiştir. Türkiye'nin en büyük kömür havzası olan Afşin-Elbistan linyitinin 7088 kJ/kg olarak hesaplanan kimyasal ekserjisinin ülkedeki diğer sahalar içerisinde en düşük değere sahip linyitlerden biri olduğu bulunmuştur. Kazan, tüm çıkış gücü seviyelerinde kömürle sağlanan ekserjinin %50'sinden fazlasını kullanmakta ve toplam ekserji yıkımının %70'nin fazlasından sorumlu olmaktadır. Santralin enerji ve ekserji veriminde belirsizliğe yol açan faktörler arasında en önemlileri, sırasıyla, kömürün kalorisi, elektrik çıkışının akım-gerilim trafosundaki ölçümü ve kömürün debisindeki belirsizliktir. Termoekonomik hesaplar ve optimum çalışma

koşullarını belirlerken bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyetleri-Levelized Cost of Electricity (LCOE) sınır şartı olarak kullanılmıştır. Türbinlerin ürettiği elektriğin birim maliyetini LCOE'ye eşitleyen ve belirli bazı kabullerle her noktadaki maliyeti belirleyen iki farklı yaklaşım karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 708.3.015
Anahtar Kelimeler : Ekserji analizi, Afşin-Elbistan, belirsizlik, termoekonomi
Sayfa Adedi : 183
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

EXERGY AND THERMOECONOMİCS ANALYSİS AND OPTIMIZATION OF AFŞİN-ELBİSTAN B COAL FIRED POWER PLANT

(Ph. D. Thesis)

Ahmet EGE

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2012

ABSTRACT

The purpose of this study includes determination of design/operational energy and exergy efficiencies of the power plant and components, assigning the uncertainties and leading factors in the first and second law efficiencies, investigation of thermoeconomic parameter importance and optimum operation conditions by applying second law of thermodynamics to a lignite fired plant. Afşin-Elbistan B power plant was selected as a case study according to some criteria. Range of the coal was investigated with different chemical exergy determination models available in the literature. Calculated chemical exergy of 7088 kJ/kg Afşin-Elbistan lignite found in the largest mine field of Turkey is one of the lowest profile lignite compared to others. Boiler consumes more than 50% of chemical exergy supplied and responsible for more than 70% total exergy destruction. Main uncertainty sources of energy/exergy efficiency are determined to be calorific value computation of the coal, electricity measurement at transformers and mass flow rate of coal respectively. Levelized Cost Of Electricity (LCOE) provided boundary condition for thermoeconomic analysis and figuring out the optimum operational conditions. Two approaches have been compared: one equates electricity generation costs of turbines to LCOE

and the other locates costs at each point of the cycle with some assumptions.

Science Code : **708.3.015**
Keywords : **Exergy analysis, Afşin-Elbistan, uncertainty, thermoeconomics**
Sayfa Adedi : **183**
Adviser : **Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın tez haline gelmesinde destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN'e en derin teşekkür ve saygılarımı sunarım. Bütün süreç boyunca tecrübeleri ile beni yönlendiren ve çalışmaya katkı veren Tez İzleme Komitesinin değerli üyeleri Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ ve Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim. Tezin kapsam ve niteliğini zenginleştiren katkıları nedeniyle Prof. Dr. İbrahim DİNÇER ve Prof. Dr. Yunus A. ÇENGEL'e ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.

Santral işletmesinden ve ilgili daire başkanlıklarından doğrudan bilgi alınmasını gerektiren niteliğe sahip olan çalışmanın bu zorluğunu yenmede, santrale ilişkin bilgi ve verileri sağlayan, yaptığımız tartışma ve fikir alışverişleriyle yardımlarını esirgemeyen; Afşin-Elbistan B Termik Santrali İşletme Müdürlüğünden Müdür Yardımcısı Durdu KILIÇ, Kazan Bakım Başmühendisi Mustafa HAS, İşletme Başmühendisi Haluk GÖKALP, Materyal ve Planlama Başmühendisi Uygar SEĞMENOĞLU, Kimya Başmühendisi Resul ALTUN'a, Teknik Büro çalışanlarından Ezgi KARAGENÇ ve Recep DEMİR'e ayrıca Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü Santrallar Proje ve Tesis Daire Başkanlığından Şube Müdürü Nijad AKSU, Şube Müdürü Mehmet KARAKAYA, Termik Santrallar Daire Başkanlığından Şube Müdürü Ahmet EKİCİ, Başmühendis Veysel GEYLANİ, Nükleer Proje Müdürlüğünden Müdür Yardımcısı Gülcan KOCA, Müdür Yardımcısı Nurettin SAVRUK'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, her zaman yanımda olup beni destekleyen ve aslında kelimelerle bile ifade edemeyeceğim kadar çok sevdiğim anneme ve biricik kardeşim Egemen'e sonsuz sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 24

2. ELEKTRİK ÜRETİMİ VE ÖNEMİ 34

2.1. Dünyada Fosil Yakıtların Elektrik Üretimindeki Yeri 34

2.2. Türkiye'de Elektrik Üretimi ve Kamunun Payı 36

3. MATERYAL VE YÖNTEM 40

3.1. Çalışmaya Esas Santralin Seçim Yöntemi 40

3.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali 46

3.2.1. Santralin ısı dengesi 48

3.2.2. Afşin-Elbistan linyitinin karakteristiği 51

3.2.3. Santralden elde edilen gerçek veriler 53

4. EKSERJİ ANALİZİ 56

4.1. Enerji ve Ekserji Analizi 56

4.1.1. Genel çevrim analizi 57

4.1.2. Bileşenlerin enerji ve ekserji analizi 58

4.1.3. Bileşenlerin enerji ve ekserji verimleri 67

Sayfa

4.2. Termodinamik Model ve Yazılım 69

4.2.1. Programın modülleri 73

4.2.2. Modelin kıyaslanması (benchmarking) 75

4.3. Kabuller ve Sınır Şartları 76

4.4. Sonuçlar 77

4.4.1. Kömürün kimyasal ekserji analizi sonuçları 77

4.4.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali enerji ve ekserji analizi sonuçları 86

4.4.3. Sonuçların literatürdeki bulgularla karşılaştırılması 98

5. BELİRSİZLİK ANALİZİ 103

5.1. Kapalı Kutu Yöntemiyle Belirsizlik Analizi 103

5.2. Bileşenlerin Belirsizlik ve Hassasiyet Analizi: YBT Üzerine Uygulama Çalışması 106

5.3. Ekstrem Durum Analizi 109

5.4. Kabuller ve Sınır Şartları 110

5.5. Sonuçlar 111

5.5.1. Kapalı kutu yöntemi belirsizlik analizi sonuçları 111

5.5.2. Kapalı kutu yöntemi hassasiyet analizi sonuçları 115

5.5.3. Bileşenlerin belirsizlik ve hassasiyet analizi: YBT üzerine uygulama çalışması sonuçları 119

6. TERMOEKONOMİK ANALİZ VE OPTİMİZASYON 124

6.1. Temel Ekonomik Tanım ve Veriler 124

6.2. Ekonomik Hesaplamalardaki Temel Kabuller 127

6.3. LCOE Analizi 128

Sayfa

6.3.1. Ekonomik ömür giderleri....129

6.3.2. LCOE'de kullanılan teknik parametreler....133

6.4. Termoekonomik Analiz....134

6.5. Optimizasyon....138

6.5.1. Hedef fonksiyon....139

6.6. Sonuçlar....140

6.6.1. LCOE analiz sonuçları....140

6.6.2. Termoekonomik analiz ve optimizasyon sonuçları....150

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....157

KAYNAKLAR....164

EKLER....170
EK-1 Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol....171
EK-2 Kredi ödeme tabloları, işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı....176

ÖZGEÇMİŞ....182

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Enerji ve ekserji kavramı arasındaki temel farklar……	28
Çizelge 2.1. 2001-2010 Yılları arasında Türkiye elektrik sistemi puant güç ve enerji talebi ……	36
Çizelge 3.1. Elektrik üretim tesislerinin puanlamada kullanılan teknik özellikleri, performansları ve aldıkları puanlar…...	44
Çizelge 3.2. Elektrik üretim tesislerini puanlamada kullanılan değerlendirme kriterleri, faktör dereceleri ve ağırlıkları....	45
Çizelge 3.3. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çeşitli bileşenlerine ait teknik veriler..…….	47
Çizelge 3.4. Kazanda yakılabilecek linyitin temel özellikleri..…….	51
Çizelge 3.5. En iyi ve en kötü kömüre ait yakıt debileri.…….	52
Çizelge 3.6. Tasarıma esas linyitin kimyasal komposizyonu ve yüzdece fiziksel ağırlıkları…….	52
Çizelge 3.7. Santral nominal gücüne karşı gereken yakıt miktarı..…...	53
Çizelge 3.8. Gerçek veri analizinde kullanılan kömürün 25.05.2011 günü süresince AID, nem, kül ve kükürt özellikleri……..	54
Çizelge 4.1. Çeşitli maddelerin ölü hal koşullarındaki mutlak molar entropileri ve JAM/SMSM'e göre standart kimyasal ekserjileri ……	65
Çizelge 4.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali bileşenlerinin enerji ve ekserji tanımları..……	70
Çizelge 4.3. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin hazırlanan modelinin temel tasarım değerleri ile karşılaştırılması..…	75
Çizelge 4.4. Afşin-Elbistan tasarım kömürünün farklı model ve yöntemlere göre kimyasal ekserjisi, alt-üst ısıl değerleri…….	78

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.5. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin belli başlı güç seviyelerinde farklı model ve yöntemlere göre belirlenen kimyasal ekserji girdisi……..... 79

Çizelge 4.6. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çeşitli model ve yöntemlere göre hesaplanan farklı güç seviyelerindeki ekserji verimi…… 79

Çizelge 4.7. Santralin farklı çıkış güçlerinde kömür kalitesine göre elde edilen Kazan Performans Göstergeleri……. 84

Çizelge 4.8. Tasarım kömürüne göre santralin farklı çıkış güçlerindeki brüt enerji verimi ……... 86

Çizelge 4.9. Santrale gelen kömürün enerjisinin başlıca termodinamik bileşenlerindeki kaybı veya enerjiye dönüşme oranı (%)…….. 88

Çizelge 4.10. Santralin başlıca bileşenlerinin enerji, izentropik veya ekserji verimleri ile y_D ve y_D^* değerlerinin güç seviyelerine göre değişimi……. 92

Çizelge 4.11. YBT'nin her 15 dakikada bir alınmış işletme koşulları ve ölçülen kabin sıcaklıkları…….. 97

Çizelge 4.12. Farklı kabin sıcaklıklarına karşı elde edilen kayıp ısı, entropi oluşumu, ekserji yıkımı ve kayıp terimlerinin büyüklükleri……... 97

Çizelge 4.13. Literatürde Türkiye'deki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ile karşılaştırılması..... 98

Çizelge 4.14. Literatürde Dünyadaki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ve Çizelge 4.13 ile karşılaştırılması…..……. 100

Çizelge 5.1. Kapalı kutu yönteminde değişkenlerdeki belirsizlikler ve doğruluklar……..……. 105

Çizelge 5.2. Ekstrem durum analizi olasılık matrisi ……... 110

Çizelge 5.3. Kapalı kutu yönteminde enerji verimi belirsizliğine etki eden değişkenlerin ağırlıkları.…… 112

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.4. Kapalı kutu yönteminde ekserji verimi belirsizliğine etki eden değişkenlerin ağırlıkları…..…… 112

Çizelge 5.5. DIN standardı ve kapalı kutu yöntemiyle hesaplanan belirsizliklerin karşılaştırılması……..…... 114

Çizelge 5.6. Belirsizlik kısmı türevlerinin santralin çıkış gücü ile değişimi……. 120

Çizelge 5.7. YBT izentropik ve ekserji verimi belirsizliklerinin santral çıkış gücüyle değişimi……... 121

Çizelge 6.1. Afşin-Elbistan B Termik Santrali temel maliyet parametreleri (1998 ABD doları)…….. 125

Çizelge 6.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali İş sahibi giderleri, EPC maliyeti..……... 126

Çizelge 6.3. Afşin-Elbistan B Termik Santrali için örnek alınan kredi ve ekonomik parametrelere ait karakteristik (1998 ABD doları)……..... 130

Çizelge 6.4. Ekonomik hesaplarda kullanılan temel teknik parametreler...……. 133

Çizelge 6.5. Santralin incelenen bileşenleri için oluşturulan termoekonomik denge denklemleri, sınır şartları ve kabuller …… 136

Çizelge 6.6. $\dot{Z}$ değeri hesabında kullanılan çeşitli bileşenlerin yatırım bedeli (saha içi maliyetler) içerisindeki payları … 138

Çizelge 6.7. Çeşitli teknik ve ekonomik parametrelerin LCOE üzerindeki etkisi....……. 144

Çizelge 6.8. Genel kabullerle yapılan bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (LCOE)……. 148

Çizelge 6.9. Sabit ve durumsal sınır şartlarına göre santralin incelenen noktaları için birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet……... 150

Çizelge 6.10. Tasarımsal ve işletme koşulları ile optimize edilmiş termodinamik ve termoekonomik değerler …….. 153

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.11. Türbinin farklı seviyelerinde farklı kaynaklara göre birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet değerleri…… 155

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1.Dünyada çeşitli kaynaklara göre 18 milyar tce'ye ulaşan birincil enerji tüketimi (solda) ve 21 milyar MWh'e ulaşan brüt elektrik üretimi [Euracoal, 2011]…….... 35

Şekil 2.2.EÜAŞ'ın yıllar itibariyle Türkiye kurulu gücü ve üretimindeki payı……... 37

Şekil 2.3.Türkiye linyit rezervlerinin kalorifik değerleri……..... 38

Şekil 3.1.Afşin-Elbistan B Termik Santrali ısı denge diagramı ……..... 50

Şekil 4.1.Oluşturulan yazılımın santralin farklı güç çıkış seviyelerine göre tasarım değerleri ile karşılaştırması…….. 76

Şekil 4.2. Farklı kimyasal ekserji model ve yöntemlerine göre santralin ekserji verimi…… 80

Şekil 4.3.Kullanılan model veya yöntemin ortalama kimyasal ekserji değerinden sapması…….. 81

Şekil 4.4.Kullanılan model veya yöntemin ortalama ekserji veriminden sapması ……..…… 82

Şekil 4.5.Santralin çıkış gücüne bağlı olarak en iyi, en kötü ve tasarım kömürünün kazan ekserji verimine etkisi…….. 83

Şekil 4.6.İçerdiği neme göre kömürün spesifik kimyasal ekserjisinin farklı model ve yöntemlere göre değişimi..... 85

Şekil 4.7.Santralin güç çıkışına karşı enerji veriminin değişimi…..…. 87

Şekil 4.8.Güç üreten bileşenlerin santralin çeşitli çıkış gücü seviyelerinde brüt güç üretimindeki payları……. 88

Şekil 4.9.Kazan, YBT ve BFPT'nin santralin farklı çıkış güçlerine göre enerji ve ekserji verimleri ……..…… 89

Şekil 4.10.Belli bazı bileşenlerin ekserji verimlerinin GCC çıkış gücünde T_0 referans sıcaklığı ile değişimi……... 91

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11.Santralin farklı çıkış güçlerinde kazan ekserji veriminin T_0 referans sıcaklığı ile değişimi ….……. 93

Şekil 4.12.25 Mayıs 2011 tarihinde üçüncü üniteden alınan verilerle santralin hesaplanan sürekli brüt enerji ve ekserji verimi ……. 94

Şekil 4.13.Yedi numaralı (son) ısıtıcının farklı güç seviyelerinde kayıp ısı miktarı…..…… 95

Şekil 4.14.Santralin gerçek verileriyle farklı güç seviyelerindeki YBT, BFPT ve yedi numaralı ısıtıcının hesaplanmış sürekli izentropik ve ekserji verimleri …… 96

Şekil 5.1.Akım-Gerilim trafolarının ölçü sınıflarının farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi ……. 116

Şekil 5.2.Değirmen ağrılık hücresinin ölçüm doğruluğunun farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi ……. 117

Şekil 5.3.Net kalorifik değer belirlenme doğruluğunun farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi ……. 119

Şekil 5.4.Basınçölçer sınıfına göre izentropik ve ekserji verimindeki belirsizliklerin değişimi…..…… 121

Şekil 5.5.Termokupl sınıfına göre izentropik ve ekserji verimindeki belirsizliklerin değişimi …….. 122

Şekil 5.6.Üçüncü ünitenin 25 Mayıs 2011 günü içerisinde santralin çıkış gücüne göre YBT'nin izentropik ve ekserji verimi belirsizlikleri..... 123

Şekil 6.1.Santralin işletmeye geçtiği yıldan itibaren oluşan birim elektrik üretimi başına yakıt harcaması …….. 131

Şekil 6.2. Santralin işletmeye geçtiği yıldan itibaren oluşan birim elektrik üretimi başına işletme-bakım giderleri …….. 132

Şekil 6.3.Santralin planlanan yıllık çalışma saatini aşması durumunda LCOE değişimi…..……..... 141

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.4.Santral iç ihtiyacının LCOE üzerindeki etkisi ……. 142

Şekil 6.5.Ekonomik hesaplamalarda kullanılan indirgenme oranının LCOE üzerine etkisi ……... 143

Şekil 6.6. Santral çıkış gücünün LCOE üzerine etkisi ……... 144

Şekil 6.7. Monte Carlo simülasyonu ile santralin ömrü boyunca rastlantısal farklı güç seviyelerinde çalışması durumunda oluşacak LCOE dağılımı…… 145

Şekil 6.8. Santralin primer frekans kontrolüne katılımının LCOE üzerine etkisi …… 146

Şekil 6.9. YBT'nin ekserji verimi ve santralin çıkış gücüne karşılık oluşan LCOE kümesi……..... 153

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\boldsymbol{c}$	Birim ekserji başına ortalama maliyet (\$/GJ)
$\mathbf{C_t}$	t yılındaki toplam maliyet (\$)
$\dot{\boldsymbol{C}}$	Maliyet oranı (\$/s)
$\boldsymbol{ch}$	Kimyasal
$\boldsymbol{d}$	İndirgenme oranı (%)
$\dot{\boldsymbol{E}}$	Birim zamandaki toplam ekserji transferi (kW)
$\boldsymbol{e}$	Spesifik ekserji (kJ/kg)
$\bar{\boldsymbol{e}}$	Spesifik molar ekserji (kJ/kmol)
$\boldsymbol{el}$	Elektrik
$\boldsymbol{\eta}$	Enerji verimi
$\boldsymbol{g}$	Yerçekimi ivmesi (9,8066665 m/s^2)
$\mathbf{h}$	Entalpi (kJ/kg)
$\boldsymbol{h}$	Hidrojen kütlesel oranı
$\boldsymbol{H}$	Hidrojen
$\boldsymbol{I}$	Kimyasal ekserji endeksi
$\boldsymbol{l}$	Sıvı
$\dot{\boldsymbol{m}}$	Kütlesel debi (kg/s)
$\boldsymbol{n}$	Nitrojen kütlesel oranı
$\boldsymbol{\nu}$	Stokiyometrik katsayı
$\boldsymbol{N}$	Nitrojen
$\boldsymbol{o}$	Oksijen kütlesel oranı
$\boldsymbol{O}$	Oksijen
$\mathbf{P}$	Basınç (bar veya atm)
$\mathbf{P_0}$	Ölü hal basıncı (1 atm)

Simgeler	Açıklama
$\boldsymbol{P_{el}}$	Elektrik çıkış gücü (kW)
$\boldsymbol{\dot{Q}}$	Birim zamanda gerçek. ısı transferi miktarı (kW)
$\boldsymbol{ph}$	Fiziksel
$\boldsymbol{\bar{R}}$	Evrensel gaz sabiti (8,31447 kJ/kmol.K)
$\boldsymbol{s}$	Mutlak entropi (kJ/kg.K)
$\boldsymbol{\bar{s}}$	Mutlak molar entropi (kJ/kmol.K)
$\boldsymbol{s}$	Sülfürün kütlesel oranı
$\boldsymbol{S}$	Sülfür
$\boldsymbol{\dot{S}}$	Entropi üretim oranı (kW/K)
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık (ºC veya K)
$\boldsymbol{T_0}$	Ölü hal sıcaklığı (25ºC veya 298.15 K)
$\boldsymbol{x_n}$	n sayılı değişken
$\boldsymbol{x_m}$	Karışımdaki m gazının mol oranı
$\boldsymbol{V}$	Hız (m/s)
$\boldsymbol{\dot{W}}$	Birim zamanda sistem tarafından yapılan iş (kW)
$\mathbf{w_n}$	n. değişkendeki belirsizlik (% veya mutlak)
$\boldsymbol{w}$	Suyun kütlesel oranı
$\boldsymbol{y_D}$	Ekserji yıkımının yakıtla sağlanan ekserjiye oranı
$\boldsymbol{y_D^*}$	Toplam ekserji yıkımındaki pay
$\boldsymbol{\dot{Z}}$	Yatırım maliyet oranı ($/s)
$\boldsymbol{\zeta}$	Ekserji verimi

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABT	Alçak Basınç Türbini
AEB	Afşin Elbistan-B
AFUDC	Allowance for FUnds During Construction

Kısaltmalar	Açıklama
AID	Alt Isıl Değer
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFPT	Boiler Feed Pump Turbine (Türbin Tahrikli Pompa)
BGA	Baca Gazı Arıtma
BP	British Petroleum
BYS	Bakım Yönetim Sistemi
CEN	European Committee for Standardization
CI	Capital Investment
CIRR	Commercial Interest Reference Rates
CPI	Consumer Price Index
COP	Coefficient Of Performance
DAF	Dry Ash Free (Kuru Külsüz)
DCS	Distributed Control System
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European standards
EPC	Engineering Procurement Construction
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EURACOAL	European Association for Coal and Lignite
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü
FCI	Fixed Capital Investment
FD	Forced Draft fan
GCC	Guaranteed Continuous Capacity
GCM	Ghamarian and Cambel Metodu
GTCE	Gross Ton Coal Equivalent (Kömür Eşdeğeri Ton)
HHV	Higher Heating Value
IAPWS	Intern. Ass. for Prop. of Wat. and Ste. Ind. For.
ID	Induced Draft Fan
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization

Kısaltmalar	Açıklama
İDA	İş Dağılım Ağacı
JAM	Joachim Ahrendts Method
KÇS	Kombine Çevrim Santrali
KP	Kondenser Pompası
KYM	Kritik Yol Metodu
KPG	Kazan Performans Göstergesi
LCOE	Levelized Cost of Electricity
LCOF	Levelized Cost Of Fuel
LCOI	Levelized Cost Of Investment
LCO&M	Levelized Cost Of Operating and Maintenance
LHV	Lower Heating Value
LUVO	Luftvorwärmer (hava ön ısıtıcısı)
MCR	Maximum Continuous Rating
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MS	Microsoft
NCV	Net calorific value
NEA	Nuclear Energy Agency
OBT	Orta Basınç Türbini
OECD	Organization for Econ. Coop. and Development
O&M	Operating and Maintenance (İşletme ve Bakım)
PFK	Primer Frekans Kontrolü
SMSM	Szargut Morris Steward Metodu
SPT	Santrallar Proje Tesis Daire Başkanlığı
SSM	Szargut and Styrylska Metodu
TCI	Total Capital Investment
TEAŞ	Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. Genel Müdür.
TEFE	Tüketici Fiyatları Endeksi
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü
TS	Termik Santral
TSÜ	Tam Skala Üstünden

Kısaltmalar	Açıklama
UAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
ÜFE	Üretici Fiyatları Endeksi
VBA	Visual Basic for Applications
YBT	Yüksek Basınç Türbini
YİD	Yap-İşlet-Devret

1. GİRİŞ

İnsanlığın gelişiminin sanayi devriminden bu yana yaşadığı hızlı gelişme süreci göz önüne alındığında, ülkelerin gelişiminde, sosyal ve teknolojik refahın artışında, uluslararası ilişkiler ve politikada enerjinin en önemli aktör olduğunu söylemek yanlış olmaz. Dünya nüfusunun geometrik bir dizi halinde artışıyla birlikte insanlığın sınırsız ihtiyaçlarını sınırlı olan enerji kaynakları ile karşılamak, enerjinin ancak verimli ve etkin bir biçimde kullanılması ile mümkündür. Etkin ve verimli enerji kullanımı ise enerjinin miktarı yerine kalitesi ile ilgili olan termodinamiğin ikinci kanununun ilgi alanına girmektedir. Bu çalışanın amacı ekserji analizi olarak da nitelendirilen termodinamiğin ikinci kanunun linyit yakıtlı Afşin-Elbistan B kömür santraline belirsizlik analizi ve termoekonominin de uygulanmasıyla, bileşen ve sistemler üzerine detaylı bir inceleme yaparak,

- Santral ve bileşenlerinin tasarımsal/işletme koşullarında enerji ve ekserji verimlerinin değerlerini belirlemek,
- Kömürün kimyasal ekserjisini belirleyen farklı yöntemlerin santralin ikinci kanun verimi algısı üzerindeki nicel etkisini araştırmak,
- Santralin birinci ve ikinci kanun verimindeki belirsizlik miktarını ve bu belirsizliğe yol açan etmenleri saptamak,
- Santralin termoekonomik parametrelerinin önem derecesini araştırmak,
- Primer frekans kontrolüne katılan santralin, optimum bir değere indirgenmiş maliyete sahip çalışma koşulunu belirlemek,
- Bileşenlerin tespit edilen birinci ve ikinci kanun verimleri ışığında tasarım ve durum bazlı performanslarını belirlemek,
- Bakım-onarım ve rehabilitasyon faaliyetlerine yönelik nicel girdi oluşturmak,
- Yapılan ileri analizlerle, gelecekteki santral tasarımlarına veri ve bilgi sağlamaktır.

Türkiye'de kamunun elinde bulunan termik santrallerin genel bir incelemesiyle beraber bir dizi kritere göre belirlenen Afşin-Elbistan B Termik Santrali bir uygulama çalışması olarak ele alınarak; santral ve bileşenleri üzerinde ileri ekserji analizi, kömür kimyasal ekserji yöntemlerinin incelenmesi, başlıca enerji ve ekserji parametrelerindeki belirsizlikler, bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyeti ve bu maliyeti esas alınarak bileşenler üzerinden termoekonomik bir analiz gerçekleştirilmektedir. Buna ek olarak, primer frekans kontrolüne katılan ünitelerin en düşük bir değere indirgenmiş maliyette çalışacağı optimum termodinamik koşullar da incelenmektedir. Çalışma, doğrudan veya termoekonomik parametreler üzerinden çevresel bir analiz yürütmemektedir. Bu, özellikle termoekonomik optimizasyonda, çevresel maliyetlerin örneğin karbon maliyeti veya salınımların belli bir değerin üzerine çıkması durumunda oluşan ceza maliyetlerinin sözkonusu optimizasyonda hesaba katılmaması anlamına gelmektedir.

Tanımının detayı literatürde küçük değişiklikler gösterse de esas olarak proje, özgün bir ürün veya hizmet üretmek amacıyla belirli bir sürede gerçekleştirilen çalışmalar bütünü olarak tanımlanmaktadır. Benzer biçimde bir doktora çalışması da belirli bir süre içerisinde bilimsel bir alanda ilerlemeyi kendine hedef edinmiş ve sonunda özgün bir bilimsel ürün elde etmeyi amaçlayan çalışmalar bütünüdür. Söz konusu doktora tezi çalışması bu anlamda bir *proje* olarak görüldüğünden, çalışma başlangıcı, planlaması, uygulaması ve sonlandırılması da proje yönetimi esaslarına göre gerçekleştirmiştir.

Proje yönetim standartlarına göre farklılık göstermekle beraber; bütünleştirme, kapsam, zaman, maliyet, kalite, iletişim, risk, satın alma ve insan kaynakları yönetiminden oluşan proje yönetim alanlarından bütünleştirme, kapsam, zaman ve kalite alanlarından bu çalışmada yararlanılmıştır.

Birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmanın da veri kaynakları arasında uluslararası hakemli dergiler ve internetin yanında; termodinamik, ekserji analizi ve termoekonomiye ilişkin temel bilimsel kitaplar, konunun uzmanlarıyla yapılan görüşmeler bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, kamuya ait elektrik üretim santrallerine ait kurulu güç, ünite yaşı, kapasite kullanım faktörü, benzer santral özellikleri, ek ünite yapılma potansiyeli gibi teknik özellikler Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, Termik Santraller Dairesi Başkanlığından alınmıştır. Diğer taraftan, termodinamik analize ilişkin tüm veriler; üreticinin sağladığı ısı dengesi şemaları, bileşenlere ait teknik özellikler, sözleşme ve teknik şartname bilgileri, mali veriler ve diğer pek çok bilgi Santraller Proje ve Tesis Daire Başkanlığı ile Afşin-Elbistan B Termik Santrali İşletme Müdürlüğünden elde edilmiştir. Ayrıca, santrale 24-25 Mart ve 9-11 Mayıs 2011 tarihlerinde teknik inceleme ziyaretinde bulunularak mühendis ve diğer teknik personelden doğrudan bilgi edinilmiş, bazı ortak çalışmalar yapılmıştır.

Literatür taraması

Termodinamik en temel anlamda enerji ve onun biçimleri olan ısı ve iş ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Termodinamik adı Yunanca therme (ısı) ve dynamis (güç) kelimelerinden türemiştir ve bu tanım ısıyı güce dönüştürme çabasını kendi içinde yansıtmaktadır [Çengel ve Boles, 2007]. Termodinamiğin üç temel yasası bulunmaktadır; bu yasalardan birincisi enerjinin sayılabilir bir büyüklük olduğunu ve tüm süreçlerde korunduğunu savunurken, ikinci yasa enerjinin miktarı olduğu kadar kalitesinin de olduğunu iddia etmektedir. Üçüncü yasa ise entropinin tanımlanabilmesi için mutlak bir referans noktası oluşturmaktadır.

İnsanlığın termodinamik bilimine olan ilgisinin kendi tarihinin başlangıcı kadar eski olduğu rahatlıkla söylenebilir. Aristoteles'in yeryüzünde belirlediği dört temel elementin sonuncusu ve belki de en gizemlisi olan ateşin (ısının) gizemini, termodinamiğin ikinci kanunuyla 1850 yılında Rudolf Clausius

çözmüştür. Aristoteles ile Herschel arasında geçen uzun dönemde bilim adamlarının doğru teoriyi bulmasına kadar temel olarak dört farklı teori geliştirmiş olmalarına karşın, bugün bile ısı ve evrenin sonu ile ilgili olarak çözüme kavuşturulmamış bazı sorular bulunmaktadır [Guillen, 2006]. Clausis'un gizemini çözdüğü tarih olan 1850 bir milat olarak alınırsa, 162 yıllık bir geçmişe sahip olan termodinamiğin ikinci kanununun, termodinamik sistem bileşenlerinin ve bütününün verimsizliklerinin, performansının, karakteristiklerinin belirlenmesinde ve süreç analizinde yaygın kullanımı ancak son 30-40 yıl içerisinde bir yoğunluk kazanmıştır. Geçmişte mühendisler yaptıkları analizlerde şaşırtıcı biçimde entropi dengesi kurmamışlardır [El-Sayed, 2003].

Termodinamiğin ikinci kanunun bir ifadesi olan ekserjiyi Çengel ve Boles belirli bir durumda verilen enerjiyle yapılabilecek maksimum iş olarak tanımlarken [Çengel ve Boles, 2007]; Wylen ve Sonntag kullanılabilirlik olarak adlandırdıkları ekserjiyi bir kütle tarafından mümkün olabilen en fazla iş yapma potansiyeli olarak tanımlamaktadır [Wylen ve Sonntag, 1985]. Yantovski, genelleştirilmiş sürtünme olmaksızın belirli bir referans durum için alınabilen en büyük iş olarak değerlendirmektedir [Yantovski, 2004]. Farklı termodinamik halde bulunan iki sistem etkileştiğinde her ikisi de termodinamik dengeye gelinceye kadar prensipte bir iş oluşturma imkanı bulunmaktadır. Bejan ve arkadaşları, bu sistemlerden biri ideal bir sistem olan çevre, diğeri de incelenen sistem olarak düşünüldüğünde; ısı transferinin sadece çevre ile yapılması durumunda, bu iki sistem dengeye gelinceye kadar teorik olarak elde edilebilecek maksimum yararlı iş (şaft veya elektrik) olarak tanımlamaktadır [Bejan ve ark., 1996]. Diğer taraftan, Kotas, sürekli rejimdeki bir madde akısının ekserjisini sadece çevre ile etkileşmesi koşuluyla, akı başlangıç halinden ölü hal koşullarına getirildiğinde elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlamaktadır [Kotas, 1985].

Ekserji kavramı son yıllarda süreç analizinde özellikle verimsizlikleri tanımlamada giderek artan bir ilgiyle karşılanmaktadır. Ekserji analizi bugün

için endüstriyel sistemlerin teknik analizlerin ötesinde çevresel, termoekonomik ve hatta sürdürülebilirlik analizlerinde kullanılmaktadır [Dewulf ve ark., 2008].

Enerjinin kalite yönünü ortaya koyan ekserji, enerji kavramı ile bazı farklılıklar göstermektedir. Gerçekte, günlük hayatta ekserji teriminin kullanılması gereken pek çok yerde enerji terimi kullanılmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Enerji ve ekserji kavramı arasındaki temel farklar

Enerji	**Ekserji**
Korunur	Korunmaz; aynı kalır veya azalır
Ekonomik değeri yoktur	Ekonomik emtiadır
İki ayrı sistemin toplam enerjisi, her birinin ayrı ayrı toplamına eşittir	İki sistemin toplamının ekserjisi her bir sistemin ayrı ayrı ekserji toplamına eşit veya bundan daha azdır
Ekolojik bir anlam içermez	Ekolojik gösterge olarak kullanılabilir
Termoekonomik anlama sahip değildir	Termoekonomik gösterge olarak kullanılabilir

Ekserji veya kullanılabilirlik olarak adlandırılan termodinamiğin bu kavramı özellikle güçlü yazılımların artan kullanımıyla birlikte; termodinamik sistemlerin modelleme, tasarım, performans ve verimlilik analizlerinde yararlanılan önemli bir araç haline gelmiştir.

Bejan ve arkadaşları, kimyasal ekserji kavramını 30 MW gücündeki temel bir kojenerasyon santrali üzerinden detaylı örneklerle açıklamaktadır [Bejan ve ark., 1996]. Ayrıca, gaz yakıtları ve kömürü de içeren pek çok yakıt türü için kimyasal ekserji hesaplama yöntemleri de bu yayında tartışılmaktadır. Benzer biçimde Kotas, endüstriyel yakıtlar başlığı altında kömürün ve daha birçok yakıtın kimyasal ekserjisinin ampirik hesaplarına dair bilgi vermektedir

[Kotas, 1985]. Srivastana dünyanın pek çok farklı bölgesinde çıkarılan kömür türlerinin bir dizi ampirik formül yardımıyla ekserji analizini gerçekleştirmiştir [Srivastana, 1988]. Ameri ve arkadaşları İran'da bulunan ve doğal gazla çalışan Hamedan termik santralinin doğal gaz kimyasal ekserji denklemlerinden yararlanarak enerji, ekserji ve ekserji-ekonomi analizini gerçekleştirmiştir [Ameri ve ark., 2009]. Onların da belirttiği gibi birçok yayın, ekserji veriminin santralın çıkış gücüyle ilişkisini yansıtan çalışmaları içermemektedir. Regulagadda ve arkadaşları, nispeten düşük bir kurulu güce sahip olan 32 MW'lık bir kömür santrali üzerinde, literatürdeki ampirik yöntemleri kullanmak yerine kömürün içerisindeki karbonu tek ekserji kaynağı alarak, bir ekserji analizi gerçekleştirmiştir [Regulagadda ve ark., 2010]. Koroneos ve arkadaşları kullanılan yakıtların herhangi bir ekserji modelini açıklamaksızın fuel-oil, doğal gaz ve dizel ile çalışan bir dizi güç santralinin alternatif tasarımları için ekserji analizi gerçekleştirmişlerdir. [Koroneos ve ark., 2004]. Oktay, Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santralleri, Türkiye'nin akışkan yataklı iki santralinden biri olan 18 Mart Çan Termik Santralini bir uygulama çalışması olarak ele alıp analiz etmiştir [Oktay, 2009]. Ancak çalışmada kimyasal ekserji bileşeninin nasıl hesaplandığı açık bir biçimde yer almamaktadır. Oktay, aynı zamanda santraller için performans iyileştirme ve rehabilitasyon teknikleri önerilerinde de bulunmaktadır. Bilgen ve Kaygusuz Türkiye'deki çeşitli tersiyer kömür madenlerinin kimyasal ekserji analizini gerçekleştirmiştir ancak bu madenler arasında Afşin-Elbistan havzası yer almamaktadır [Bilgen ve Kaygusuz, 2008]. Oman ve arkadaşları, linyit komposizyonu ve kalitesinin kazan ve santralin verimine olan etkisiyle ilgili yeterli yayının olmadığını iddia etmektedir [Oman ve ark., 2001].

Amirabedin ve Yılmazoğlu, Türkiye'deki on farklı linyiti kullanabilen 240 MW gücündeki varsayımsal bir termik santralin tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Çalışma, Afşin-Elbistan linyitini yakıt olarak kullanan santralin diğer on farklı linyit içerisinde %34,16 ile en düşük enerji verimine ve 242,09 MW ile sondan ikinci en düşük brüt çıkış gücüne sahip olacağını göstermiştir [Amirabedin ve Yılmazoğlu, 2011]. Acır ve arkadaşları Ankara'daki bir termik santralin ekserji

verimini ve ölü hal sıcaklığı değişiminin ekserji verimine etkisini incelemişlerdir [Acır ve ark., 2011]. Çalışmanın sonuçlarına göre maksimum ekserji yıkımı tüm ölü hal sıcaklıklarında her zaman için kazanda meydana gelmektedir. Aynı çalışma, dünyada enerji ve ekserji analizi yapılan çeşitli termik santrallerin ekserji verimlerinin %24,80 ile %51,88 arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. Mitrović ve arkadaşları Sırbıstan'daki Kostolac güç santralinin %100 ve %60 güç seviyelerinde yaptıkları ekserji analizinde, toplam ekserji yıkımının en büyük kısmının %88,2 ile kazanda gerçekleştiğini bunu %9,5 ile türbinlerin izlediğini göstermiştir [Mitrović ve ark., 2010]. Eskin ve arkadaşları İzmir Torbalı'da bulunan 7,7 MW gücündeki akışkan yataklı küçük bir santralin termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir [Eskin ve ark., 2009]. Buna göre, yanma havasının %10 ile %70 arasında değiştirilmesi durumunda santralin birinci ve ikinci kanun verim aralığı %5,1 ve %5,2'ye varan değişimler göstermektedir. Can ve arkadaşları, İstanbul Esenyurt'taki 180 MW gücündeki kojenerasyon santralini inceledikleri çalışmalarında ikinci kanun veriminin literatürdeki benzer yayınlara uygun olarak %89,5 kadar yüksek bir değerde olabileceğini iddia etmektedir [Can ve ark., 2009]. Cihan ve arkadaşları, bir kombine çevrim santrali için rehabilitasyon seçeneklerini inceledikleri çalışmalarında yanma odalarının, gaz türbinlerinin ve atık ısı kazanlarının ekserji yıkımından esas sorumlu bileşenler olduğunu göstermektedir [Cihan ve ark., 2006].

Literatürde birinci ve ikinci kanun belirsizliklerinin santrallere uygulanmasıyla ilgili olarak fazla yayın bulunmamaktadır. Bresolin ve arkadaşları kömür yakıtlı bir termik santralde Foruier transformasyonu ile hassasiyet analizi gerçekleştirmişlerdir [Bresolin ve ark., 2007]. Monte Carlo, Foruier transformasyonu ve diferansiyel yöntemleri karşılaştırdıkları çalışmalarını 160 MW gücündeki kömür yakıtlı bir termik santralin enerji verimi üzerine yoğunlaştırmışlardır. Bununla beraber çalışmaları santralin %50 ve %100 çıkış gücü için sınırlı olup ikinci kanun verimine değinmemektedir. Ertesvåg ise ISO ve CEN standartlarına göre test edilen ısı pompalarının performans katsayılarındaki (COP) belirsizlikleri ele almaktadır [Ertesvåg, 2011]. Her iki

standart tarafından izin verilen belirsizlik oranı %5 ile %10 arasında değişmektedir. Bu çalışma ikinci kanun veriminin ISO ve CEN gibi standartlar tarafından kullanıldığını göstermesi bakımından oldukça önemlidir. Önceki bölümlerde incelenen diğer hiçbir kaynakta (Kotas, 1985 hariç) ikinci kanun belirsizliğine ilişkin bir bölüm veya herhangi bir açıklama bulunmamaktadır.

DIN standartları elektrik üretim santrallerinin buhar kazanlarının kabul testlerinde akış, basınç, sıcaklık ölçümleri ile aynı zamanda net kalorifik değer ölçümlerindeki belirsizlikleri detaylı biçimde ele almaktadır [DIN, 1994]. Söz konusu standart, cüruf ve uçucu külde yanmamış maddelerin entalpilerindeki belirsizlikleri ve bir dizi parametreyi enerji verimi hesabındaki küçük etkileri nedeniyle belirsizlik hesabında ihmal etmektedir.

Verim ve maliyetle etkileşimi geçmişte genel olarak nitel olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu etkileşimi formülize edebilmeye yönelik ilgi, ilk olarak 1960'larda deniz suyunun arıtılmasında ayrım yüzeyi ile enerji gereksinimi arasındaki ilişkiyi anlamada kendi göstermiştir. Bu bağlamda termoekonomiye ilişkin ilk örnek, 1962 yılında Tribus ve Evans tarafından yapılan ve mihenk taşı niteliğine sahip olan deniz suyunun arıtılmasında yapılan çalışmadır [El Sayed, 2003]. Bejan ve arkadaşları termoekonominin temellerini basit bir kojenerasyon sistemi üzerinden detaylı bir biçimde açıklamaktadır [Bejan ve ark., 1996]. Onların da belirttiği gibi bir santrale ait sınırlı termoekonomik bilgi olduğu zaman makul kabullerde bulunulabilmektedir. Ancak bu durumda araştırma sonuçları farklı sonuçlar verebilmektedir. El Sayed'e göre modellerin kabulleri sistemi farklı açılardan ve farklı odakla gördüğünden geliştirilen modeller de kalite ve güvenilirlikleri bakımından sınıflandırılmaktadır. Basitleştirilmiş analitik fonksiyonlar yardımıyla bir santralin termodinamik bileşenlerinin termoekonomik analizini yapan bir dizi yayın bulunmaktadır. Bunlar arasında Bejan ve arkadaşları, Moran, El Sayed ve Kotas sayılabilir. Can ve arkadaşları kondenser tipi ısı eşanjörlerinin ekserji-ekonomik analizini analitik yöntemlerin yanında grafiksel yöntemlerle de gerçekleştirmektedir [Can ve ark., 2009]. Rosen

ekserji ve onun ekonomi ile ilişkisi üzerine daha fazla çalışma yapılması gerektiğini, geliştirilen bazı güçlü ve karmaşık tekniklerin jenerik olmadığını ve endüstri tarafından uygulanmasında zorluklar olduğunu iddia etmektedir [Rosen, 2002]. Ameri ve arkadaşları bir termik santral üzerine yaptığı ekserji-ekonomik analizde kazan ve türbinde yıkılan ekserji maliyetinin diğer tüm bileşenlerden fazla olduğunu göstermiştir [Ameri ve ark., 2009]. Zhang ve arkadaşları enerji arzında kömüre bağımlı ülkeler için son derece önemli olabilecek kömür yakıtlı santrallerin termoekonomik analizi üzerine fazla yayın olmadığını bildirmektedir [Zhang ve ark., 2006]. Kim; maliyet tayini, maliyet optimizasyonu ve maliyet analizinde kullanılabilecek *wonergy* olarak adlandırdığı yeni bir yöntem bulduğunu iddia etmektedir [Kim, 2010].

Termoekonomiye sınır şartı sağlayan LCOE analizinde ise modern santrallerin ekipman maliyetleri, kredi koşulları ve detaylı maliyet analizlerine ilişkin bilgi bulmak bu tip bilgilerin ticaret sırrı olarak düşünülmesinden dolayı son derece zordur. LCOE analizi sonuçları ülkelere göre yayınlansa [IAE-NEA-OECD, 2010] da ülkeler ve teknolojiler arasındaki LCOE değerleri büyük farklılıklar göstermektedir. Bunun dışında LCOE'nin indirgenme oranı, iç tüketim ihtiyacı, yıllık çalışma saati, çıkış gücü gibi çeşitli parametrelere karşı değişimini gösteren çizelgeler veya bunların arasındaki ilişkileri gösteren grafikler bulunmamaktadır.

Termoekonomik analizlerin mutlak analizler olmadığı incelenen sistemin fiziksel ve ekonomik sınır şartlarına bağlı olarak değişebileceği çeşitli araştırmacılar (Bejan, El Sayed, Kim) tarafından vurgulanmaktadır.

İleri maliyet analizinin kullanıldığı optimizasyonlardaki hedef fonksiyonun çok kritlerli olduğu bunların bazılarının yakıt, ekipman ve bakım giderlerini bazılarının ise basitlik, güvenilirlik, güvenlik ve emniyet gibi faktörleri dikkate aldığı bilinmektedir [El Sayed, 2003]. Diğer taraftan bazı araştırmacılar [Bejan ve ark., 1996] optimizasyonu; mevcut malzeme, mali kaynaklar, çevrenin korunması, düzenleyici yasalar, güvenlik, emre amadelik gibi sınır şartları

altında LCOE değerini minimuma indiren tasarım parametreleri veya modifikasyonlar olarak tanımlamaktadır.

Afşin-Elbistan B Kömür Santralinin Ekserji ve Termoekonomik Analizi ve Optimizasyonu çalışması, literatürde yapılan ekserji analizlerinin ve özellikle kömürün kimyasal ekserjisinin belirlenmesi bakımından standardize edilmesine yönelik bir çabayı ortaya koymaktadır. Çalışma aynı zamanda, beş farklı çıkış gücü (%100, %85, %80, %60, %40) için yaptığı parametrik çalışmalarla çeşitli araştırmacılar tarafından bu alanda dile getirilen yetersizliği azaltmayı amaçlamaktadır. Literatürde bu tip parametrik çalışmaların azlığının yanında, büyük güçteki kömür santrallerinin gerek ekserji analizi gerekse termoekonomik analizler açısından fazlaca çalışılmamış olduğu ifade edilmektedir. LCOE sonuçlarıyla ilgili sınırlı sayıda kaynak olması ve bu değeri etkileyen başlıca faktörler arasındaki ilişkinin açık bir biçimde yansıtılmamış olması bu alandaki diğer hususlar arasında yer almaktadır. Çalışma, bu bağlamda, literatürdeki bu eksiklikleri ve bunlarla da sınırlı kalmamak üzere belirsizlik analizi, Afşin-Elbistan kömürlerinin kimyasal ekserji analizi gibi bir dizi az çalışılmış konuyu da inceleme amacı gütmektedir.

2. ELEKTRİK ÜRETİMİ VE ÖNEMİ

Elektrik enerjisi ekonomi ve sosyal yaşamın vazgeçilmez bir öğesi haline gelmiştir. Elektriğin böylesine yaygın hale gelişinde kullanım, nakil kolaylığı, elektrik-elektronik ürünlerin ve teknolojisinin yaygınlaşması büyük rol oynamaktadır. Elektrik, ilginç bir biçimde, ekonomik anlamda hem bir son mal iken hem de ara mal özelliği göstermekte, ayrıca son yıllarda serbest elektrik piyasasının gelişimi sonucu aynı zamanda bir emtia olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik üretim sektörü, ekonomideki hemen hemen bütün sektörlere girdi teşkil ederken bütün sektörlerden girdi almamaktadır [EÜAŞ BYS Temel Yaklaşımlar Raporu, 2007]. Dolayısıyla bu sektörün verimliliği sanayi, turizm ve her türlü ekonomik faaliyet dahil sınırsız sayıda sektörü etkileyebilecek niteliklere sahiptir.

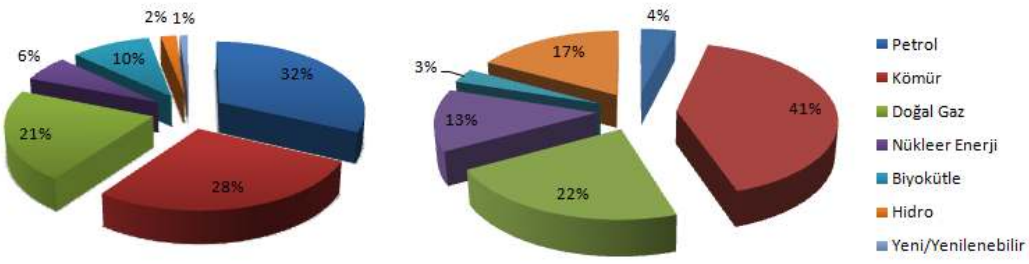
Temel senaryoya göre, 2003 ile 2050 yılları arasında elektrik üretiminin üç kat, bu üretimden kaynaklanan karbon dioksit emisyonunun %164 oranında artması beklenmektedir [IEA Fact Sheet, 2008]. Günlük yaşantının ve sanayinin elektriğe olan bağımlığının artmasının yanında, yakın bir gelecekte elektrikli araçların yaygınlaşmasına taşımacılık sektörünün de eklenmesiyle elektrik üretiminin öneminin ve etkisinin de logaritmik bir biçimde artması beklenmektedir. Çevresel kaygıların önemli üretim kısıtlarından olmasıyla birlikte elektrik üretiminin verimlilik ve etkinliğinin değeri büsbütün artmaktadır.

2.1. Dünyada Fosil Yakıtların Elektrik Üretimindeki Yeri

Dünyadaki fosil yakıtların %32'si elektrik üretmek amacıyla kullanılmakta, karbon dioksit emisyonunun yaklaşık olarak %41'i enerji üretimi faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu şekilde yapılan elektrik üretiminin veriminin iyileştirilmesinin, dünyanın fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmanın yanında küresel iklim değişiklikleri ile mücadelede ve enerji

güvenliğinin geliştirilmesinde son derece önemli bir etkiye sahip olacağı açıkça görülmektedir [IEA Information Paper, 2008].

Fosil yakıtlar, %87'lik bir pazar payıyla, enerji tüketimindeki baskınlığını korumaktadır. Yenilenebilir enerjinin payının sürekli bir biçimde artmasına karşın küresel tüketimdeki payı sadece %2 seviyesindedir. Kömür, karbon emisyonu açısından yaratacağı olası sorunlarla birlikte, bir kez daha en hızlı gelişen fosil yakıt olmuştur [BP Statistical Review Full Report, 2012]. Kömürün, birincil enerji kaynağı olarak dünyadaki ağırlıklı rolünün önümüzdeki dönem de süreceği tahmin edilmektedir. 2010 yılında ticari enerjinin dünya çapındaki tüketimi 18 milyar ton kömür eşdeğerine (Gtce) ulaşmıştır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi birincil enerji kaynaklarında kömür %28'lik bir payla petrolden sonra ikinci sırada yer almaktadır. Brüt elektrik üretiminde ise %41'lik payla ilk sıradadır. Her birincil enerji kaynağının farklı bir son kullanım profili olduğundan; petrol taşımacılık sektöründe ağrılık kazanırken, doğal gaz hem ısıtmada hem elektrik üretiminde, kömür temel olarak elektrik üretimi ve çelik endüstrisinde, nükleer enerji sadece elektrik üretiminde, yenilenebilir kaynaklar hem ısı hem de elektrik üretiminde kullanılmaktadır [Euracoal, 2011].



Şekil 2.1. Dünyada çeşitli kaynaklara göre 18 milyar tce'ye ulaşan birincil enerji tüketimi (solda) ve 21 milyar MWh'e ulaşan brüt elektrik üretimi [Euracoal, 2011]

2.2. Türkiye'de Elektrik Üretimi ve Kamunun Payı

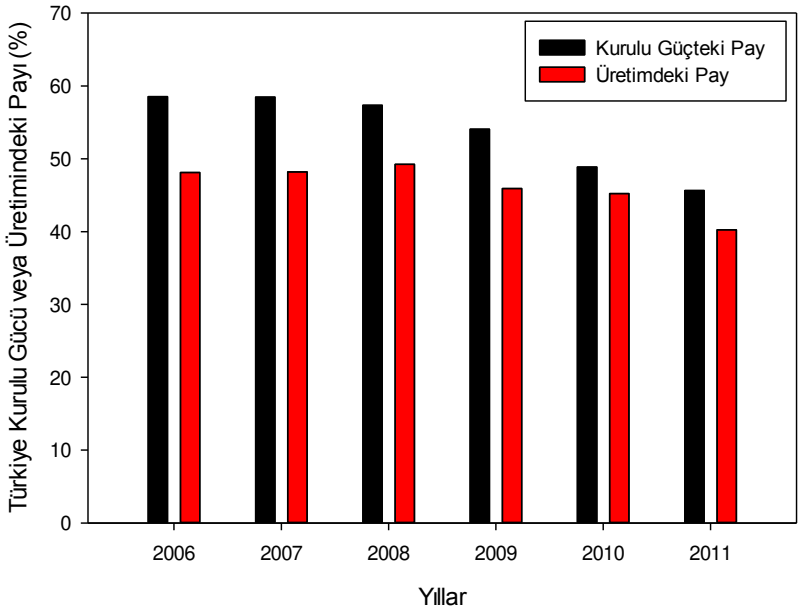
Genel olarak gelişmekte olan bir ülke profiline sahip olan Türkiye, küreselleşme ve liberalleşme ile refah seviyesinin artması, sanayisinde yaşadığı değişimler, ihracatta yakaladığı artış, ulusal ve küresel ekonomide yaşanan iniş-çıkışlar ve bir dizi nedenle birlikte 2001-2010 yılları arasındaki dönemde elektrik talebinde yıllık ortalama %5,14 civarında bir artış eğilimi göstermektedir. Bu dönemde %2,0 civarında azalmalar olmasına karşın %8,8'i bulan talep artışları da görülmüştür. Puant güç talebinin de benzer bir biçimde seyrettiği bu dönemde sadece 2009 yılındaki %2,1'lik azalma hariç sürekli bir artış eğilimi olmuştur (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. 2001-2010 Yılları arasında Türkiye elektrik sistemi puant güç ve enerji talebi [TEİAŞ, 2011]

Yıllar	Puant Güç Talebi (MW)	Değişim (%)	Enerji Talebi (Gwh)	Değişim (%)
2001	19 612	1,1	126 871	-1,1
2002	21 006	7,1	132 553	4,5
2003	21 729	3,4	141 151	6,5
2004	23 485	8,1	150 018	6,3
2005	25 174	7,2	160 794	7,2
2006	27 594	9,6	174 637	8,6
2007	29 249	6,0	190 000	8,8
2008	30 517	4,3	198 085	4,2
2009	29 870	-2,1	194 079	-2,0
2010	33 392	11,8	210 434	8,4

Türkiye'de elektrik üretimi, bir Kamu İktisadi Teşekkülü olan, EÜAŞ tarafından gerçekleştirilmektedir. Sahip olduğu termik ve hidroelektrik santrallere ek olarak bağlı ortaklıkları ile birlikte 2011 yılında gerçekleştirdiği 92 350,7 GWh elektrik üretimiyle, tek başına, Türkiye üretiminin %40,26'sını karşılamıştır. Kamunun, Türkiye kurulu gücündeki payı geçtiğimiz altı yıl içerisinde %58,53'den %45,64'e gerilemiş, aynı dönemde üretimdeki payı ise

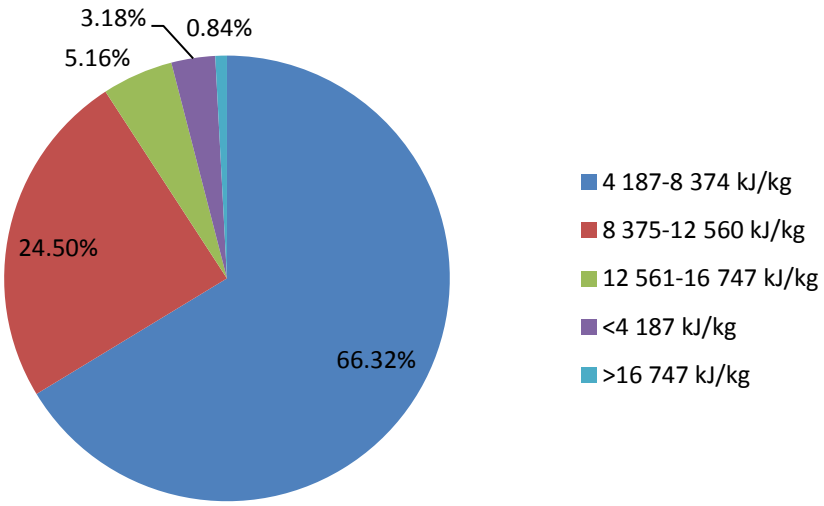
inişli çıkışlı bir seyirle %49,25 ile %40,26 arasında değişmiştir (Şekil 2.2). Kurulu güçteki azalma özellikle düşük kapasiteli hidroelektrik santrallerin özelleştirilmesi ve yeni enerji santrali yatırımı yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Son olarak 2005 yılında işletmeye alınan iki santralden biri akışkan yataklı bir santral olan 18 Mart Çan Termik Santrali ile yine aynı yıl hizmete giren Afşin-Elbistan B Termik Santralidir. Elektrik üretimi payındaki dalgalanmalar ise hidroelektrik potansiyelin yıl içerisinde iklim koşullarına bağlı değişimi, Türkiye'nin angaje olduğu doğal gaz kullanım anlaşmaları, serbest elektrik piyasasının getirdiği dinamik ortam gibi bir dizi koşula bağlı olarak gerçekleşmektedir. Ancak EÜAŞ'ı, yani kamunun payını, sadece bu üretimiyle değerlendirmek doğru olmayacaktır çünkü işletme hakkı devredilen ve Yap-İşlet-Devret (YİD) tipi santraller de ileride EÜAŞ kapsamında değerlendirilecektir. Bu bağlamda, elektrik piyasasında yapılan değişikliklere ve liberalleşmeye karşın kamunun elektrik üretimindeki ağırlığının kapsamlı bir özelleştirmeye gidilinceye kadar süreceği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2. EÜAŞ'ın yıllar itibariyle Türkiye kurulu gücü ve üretimindeki payı [EÜAŞ Yıllık Raporlar, 2006-2011]

Yukarıda çizilen çerçevede Türkiye elektrik üretiminde bu kadar ağırlıklı bir payı olan ve dünya ölçeğinde bile önemli bir kurulu güç potansiyeline sahip olan üretim tesislerinin verimlilik ve etkinliklerinin arttırılması ekonomi, çevre ve sürdürülebilirlik açısından ciddi etkilere sahip olacaktır.

Türkiye linyit rezervlerinin miktarı kaynaklara göre farklılıklar arz etmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na (ETKB) göre Türkiye'nin sahip olduğu 12,4 milyar tonluk rezerv dünya linyit rezervinin %1,6'sını oluşturmaktadır. Bu rezervin, büyük bir bölümü, bir başka deyişle, %46'sı Afşin-Elbistan havzasında bulunmaktadır [İnternet, ETKB]. Avrupa Linyit ve Kömür Birliğine (European Association for Coal and Lignite) göre kalorifik değeri 8374 kJ/kg altında, ekonomik ve jeolojik olarak çıkartılabilecek, 5 milyar tonluk linyit rezervi, 1000 MW gücünde bir dizi santralin inşa edilebilmesine olanak tanımaktadır [Euracoal, 2011]. Diğer bir çalışmada [EÜAŞ, 2011] ise en zengin linyit yataklarının olduğu Afşin-Elbistan havzasının 7,7 milyar tonluk rezerv ile Türkiye rezervinin yaklaşık olarak %40'ını oluşturduğu iddia edilmektedir. Ancak, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi Türkiye linyit kaynaklarının %70'i, 8374 kJ/kg ısıl değerin altında olan düşük kaliteli linyitlerdir.



Şekil 2.3. Türkiye linyit rezervlerinin kalorifik değerleri [EÜAŞ, 2011]

2011 yılı baz alındığında, kamunun Türkiye kurulu gücündeki payı %45,64 üretimdeki payı ise %40,26'yı bulmaktadır. 2008-2011 yılları arasında EÜAŞ tarafından üretilen elektrikte linyitin payı %32,7 ile %38,42 arasında değişirken ortalama olarak %36,51 seviyesinde gerçekleşmiştir. 2011 yılı baz alındığında Türkiye'de linyitten elde edilen elektriğin büyük bir kısmı (%87,46) kamu termik santrallerince karşılanmaktadır. Kamuya ait 10,2 milyar tonluk linyit rezervinin % 75,5'ine, Türkiye toplam rezervinin ise %64,2'sine sahip olan EÜAŞ'ın gelecekte yapılacak olan termik santral ve mevcut santrallerinde yürütülen ve yürütülebilecek rehabilitasyon projelerinin, yerli bir kaynak olan linyitten yaralanma açısından önemi açık bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma, inceleme alanı olarak, Türkiye'de kamuya ait termik santralleri baz almaktadır. Bu tercih, üç temel gerçeğe dayanmaktadır: birincisi kamuya ait elektrik şirketi her ne kadar özelleştirmeye yakın olsa da Türkiye'deki elektrik üretiminde yarıya yakın ağırlığını sürdürmektedir. İkinci olarak, fosil kökenli bir başka deyişle doğal gaz, kömür ve fuel-oil yakıtlı santraller baz yükte çalışan santrallerdir dolayısıyla bu santrallerin termodinamik ve işletme verimlerinin artması önemli etkiye sahip olacaktır. Üçüncü olarak hidroelektrik santraller; yaptıkları üretimin önemli olmasına rağmen, bu santrallerin termodinamik bir inceleme açısından çok basit yapıda olmaları, ayrıca baz yükte çalışmamaları ve mevsimel yağış rejimlerinin kapasite kullanım oranlarını değişken hale getirmesi nedeniyle kapsam dışında tutulmuştur.

Elektrik üretiminde dünyadaki mevcut durumu ve gelecekte olması beklenen gelişmeleri göz önünde tutan yaklaşım, fosil yakıtların özellikle de kömürün dünyadaki önemini açık bir biçimde gözler önüne sermektedir. Kömürün yerli bir kaynak olması ve geniş linyit yataklarının bulunması bu yakıtla çalışan santrallerin Türkiye için de önemli olduğu gerçeğini su üstüne çıkarmaktadır. Yapılan seçimde genelden (dünyada elektrik üretimindeki durumdan) özele (Türkiye'de kamuya ait bir kömür santrali) doğru bir strateji izlenerek incelemeye esas santralin belirlenmesinde 3.1.'de açıklanan uzman değerlendirmesi (expert judgement) yöntemine başvurulmuştur. Termodinamik, belirsizlik ve termoekonomik analizlerde kullanılan bilimsel yöntemler ise ilgili bölümlerde tartışılmaktadır.

3.1. Çalışmaya Esas Santralin Seçim Yöntemi

Çalışmanın getirisini maksimize etmek, gerçekte tüm santrallerin tek tek analiz edilmesini gerektirmektedir. Her santral kendisine has özellikler göstereceğinden söz konusu analizlerin bağımsız olarak yapılması gerekir. Bununla beraber, böyle bir çalışmada pratikte santrallerin her biri

incelenemeyeceğinden çalışmadan elde edilecek somut faydayı mümkün olan en üst düzeyde tutabilmek için santrallerin bir dizi kritere göre elenerek biri üzerine yoğunlaşılması amaçlanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarının somutlaştırılmasının rehabilitasyon projelerine katkıda bulunması, işletme-bakım faaliyetlerine ve gelecekte yapılacak olan santrallerin tasarımına girdi teşkil etmesi öngörülmektedir.

Sınırlı insan gücü ve ekonomik kaynaklarının yanında süre kısıtının olduğu durumlarda kendine has özellikleri olan santrallere termodinamik kanunların analizinin yapılması, ancak en etkin santralin seçilerek analizlerin bunun üzerinden yapılmasıyla mümkün olabilir. Bu amaçla, kamunun sahip olduğu termik santraller kurulu gücü, ünitelerinin ortalama yaşı, kapasite kullanım faktörü, işletmede olan benzer santral sayısı, ek ünite yapılma potansiyeli ve daha önce herhangi bir akademik çalışmanın konusu olup olmamasına göre sınıflandırılmıştır. Kurulu gücün ve elektrik üretiminin önemli öğelerinden olan hidroelektrik santraller baz yükte çalıştırılamamaları, mevsimsel değişimlere ve yağış rejimine karşı fazla duyarlı olmaları, doğalarının termodinamiğin kanunlarının derinlemesine analiz yapma imkanı tanımayacak kadar basit olması gibi nedenlerden dolayı çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Kamunun elinde, hidroelektrik santraller haricinde, Türkiye'nin daha çok batısında yoğunlaşan doğal gaz, linyit, taş kömürü yakıtlı kombine çevrim, Rankine çevrimi ve akışkan yatak türünde toplam 19 santral bulunmaktadır. Bu santral filosunun yaş aralığı 7 ile 55 yıl arasında değişirken kurulu gücü ise 44 ile 1440 MW arasındadır (Çizelge 3.1).

Hangi termik santralin çalışılacağının seçimi, ücretlendirmede puan yöntemini esas alan bir yaklaşımdan [Eraslan ve Arıkan, 2004] türetilmiştir. Çizelge 3.2 teknik, sağlanacak yarar, akademik kriter faktörlerini ve bunlara karşılık gelen faktör derecelerini göstermektedir. Faktör dereceleri, her bir faktörün aralığının 1'den 5'e kadar doğrusal biçimde dağıtılmasıyla oluşturulmuştur. Örneğin, santral filosunun kurulu gücü 44-1440 MW arasında değiştiğinden, bu aralık doğrusal biçimde 5'e bölünmüştür. Faktör derecelerinin ağırlıkları

ise proje yönetim standartlarında kullanılan uzman değerlendirmesi (*expert judgement*) yöntemine göre belirlenmiştir. Uzman değerlendirmesi yönteminde enerji santralleri konusunda 15 yıldan fazla birikime sahip, santral tesisi ve işletmesinde görev almış uzmanların faktör derecelerini belirlemeleri istenmiş ve alınan yanıtların ortalaması hesaplanarak faktör derecelerinin ağırlıkları belirlenmiştir.

Santrallerin değerlendirilmesinde kullanılan kriterler temel olarak üç başlıkta toplanmaktadır: teknik, sağlanacak yarar ve akademik.

Teknik Kriterler

- Daha yüksek kurulu güce sahip bir santralde yapılacak olan iyileştirmelerin etkisi, düşük kurulu güce sahip bir santrale göre uzun vadede daha fazla olacağından puanlama kurulu güçle doğru orantılıdır.

- Genç bir santralin ekonomik ömrü daha uzun olduğundan yaşlı bir santrale göre daha fazla iyileştirme yapma imkanı bulunmaktadır. Ayrıca yeni bir santraldeki ölçü kontrol sistemleri daha modern olduğu için ölçümlerin doğruluğunun yüksek olma olasılığı artmakta bu da analizlerin güvenilirliğini arttırmaktadır. Bu çerçevede, puanlama santral yaşı ile ters orantılıdır.

- Yüksek kapasite kullanım faktörü santralin işleyen bir tesis olduğunu göstermektedir dolayısıyla yapılacak olan iyileştirme veya modifikasyonların verim üzerine etkisi daha hissedilir olacaktır. Bu bağlamda puanlama kapasite kullanım faktörü ile doğru orantılıdır.

Sağlanacak Yarar

- Çalışmanın pratik yararı, elde edilecek olan sonuçların benzer tasarıma sahip diğer santrallere uygulanmasıyla daha etkin hale gelecektir. Eğer

benzer tasarıma sahip santral yoksa analiz sonuçları sadece o santral için kullanılabilecektir. Bu bakımdan değerlendirildiğinde puanlama benzer tasarıma sahip santral sayısıyla doğru orantılıdır.

Çalışma sonuçlarının gelecekte ek ünite yapılma potansiyeli olan santrallerin tasarımına girdi oluşturma olasılığı nedeniyle bu faktör puanlama ile doğru orantılıdır.

Akademik Kriterler

- Daha önce termodinamik/ekserji analizi/termoekonomi alanında herhangi bir bilimsel makalenin, yüksek lisans veya doktora tezinin konusu olmayan bir santral mevcut çalışmanın doktora tezi özgünlüğünü sağlaması açısından önemli bir artı olacaktır. Skalanın bir tarafında uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan bilimsel makaleler varken diğer tarafta herhangi bir yayına konu olmamış bir santral yer almaktadır. Buna göre akademik puanlama yayın türü ile ters orantılıdır.

Yukarıda verilen kriterler göz önüne alınarak her santral ilgili performansına göre 1 ile 5 arasındaki faktör ağırlıklarına göre puanlanmıştır. Tüm termik santraller içerisinde Afşin-Elbistan B termik santrali Türkiye'nin en yüksek kurulu gücüne sahip olması, 2005 yılında devreye girmiş olması, benzer tasarıma sahip kardeş santrali olması ve üzerinde bulunduğu çok geniş linyit yataklarının pek çok ek üniteye izin vermesi sebebiyle en yüksek puanı alarak çalışmanın inceleme konusu santral olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.1. Elektrik üretim tesislerinin puanlamada kullanılan teknik özellikleri, performansları ve aldıkları puanlar

	Teknik Kriterler			Sağlanacak Yarar		Akademik Kriterler	Aldığı Puan
	Kurulu Güç (MW)	Ortalama Kuruluş Yaş	2007-2010 yılları arasında Ortalama Kapasite Kullanım Oranı (%)	Benzer Santral	Ek Ünite Kapasitesi (MW)	Termodinamik/Ekserji Analizi alanında daha önceden yayınlanan bir makale/tez konusu olması	
Afşin-Elbistan B	1 440	2005	56,7	1	1 400	-	90
Bursa KÇS	1 432	1999	64,0	-	-	-	76
Soma B	990	1986	51,9	-	1 000	-	73
Afşin-Elbistan A	1 355	1985	30,6	1	600	-	72
Ambarlı KÇS	1 350	1989	74,2	-	-	-	72
Kemerköy	630	1994	54,9	2	-	-	72
Hamitabat KÇS	1120	1987	65,6	-	-	-	68
Yatağan	630	1983	58,1	2	-	Yüksek Lisans Tezi	66
Yeniköy	420	1986	42,5	2	-	-	64
Kangal	457	1994	53,1	1	-	-	62
Seyitömer	600	1978	70,3	-	100	Yüksek Lisans Tezi	57
Çatalağazı	300	1991	73,0	1	-	Makale ve Yüksek Lisans Tezi	54
Orhaneli	210	1992	67,1	-		Yüksek Lisans Tezi	54
Çan Akışkan Yataklı	320	2005	74,1	-	-	Makale ve Yüksek Lisans Tezi	52
Tunçbilek	365	1973	49,0	-	100	-	51
Ambarlı Fuel-Oil	630	1969	30,4	-	-	-	44
Aliağa KÇS	180	1978	16,5	-	-	-	40
Soma A	44	1957	58,2	-		-	40
Hopa Fuel-Oil	50	1973	-	-	-	-	32

Çizelge 3.2. Elektrik üretim tesislerini puanlamada kullanılan değerlendirme kriterleri, faktör dereceleri ve ağırlıkları

Kriter	**Faktör Dereceleri**					**Puan**	**%**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**		
Teknik						**60**	**60**
Kurulu Güç (MW)	**4** 44-323,2	**8** 323.2-602,4	**10** 602.4-881,6	**12** 881.6-160,8	**20** 1160,8-1440		**20**
Ortalama Kurulu Yaşı	**4** 1957-1967	**8** 1967-1976	**10** 1976-1986	**12** 1986-1995	**20** 1995-2005		**20**
Kapasite Kullanım Oranı (%)	**4** 0-15	**8** 15-30	**10** 30-44	**12** 44-59	**20** 59-74		**20**
Sağlanacak Yarar						**30**	**30**
Benzer Santral	**3** Yok	**6**	**9** 1	**12**	**15** 2		**15**
Ek Ünite Kapasitesi (MW)	**3** Yok	**6** 100-425	**9** 425-750	**12** 750-1075	**15** 1075-1400		**15**
Akademik Kriterler						**10**	**10**
Termodinamik/Ekserji Analizi alanında daha önceden yayınlanan bir makale/tez konusu olması	**2** Uluslararası hakemli bilimsel dergiler	**4** Doktora tezi	**6** Ulusal kongre veya ulusal dergide yayınlanan makale	**8** Yüksek lisans tezi	**10** Yok		**10**

Afşin-Elbistan B seçimini destekleyen bir başka faktör ise Türkiye'deki santrallerin işletme ve çevresel performanslarını veri zarflama yöntemine göre değerlendiren bir çalışma [Sözen ve ark., 2010] olmuştur. Üretilen birim elektrik başına tüketilen yakıtın maliyetini çıktı, santralin temel üretim değişkenlerini girdi alan Model 1 (işletme verimi) üzerinden gerçekleştirilen "Variable Returns to Scale" analizine göre tüm santraller içerisinde Afşin-Elbistan B Termik Santrali en kötü performansı göstermiştir.

3.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali

Afşin-Elbistan B Termik Santrali Kahramanmaraş'ın Afşin ilçesi Çoğulhan Beldesinde bulunan Çöllolar sektöründeki 544 milyon ton düşük kalorili linyit kömürü rezervinin ülke ekonomisine ve elektrik üretim sektörüne kazandırılması amacıyla yapılmış bir santraldir [EÜAŞ, AEB TS Tanıtım Kataloğu, 2005]. Her biri 360 MW gücünde olan dört ünitesinin sağladığı toplam 1440 MW'lık kapasitesi ile Türkiye'nin en büyük kurulu gücüne sahip olan termik santralidir. Santralin I. Ünitesi 23.07.2004, II. Ünitesi 25.11.2004, III. Ünitesi 18.03.2005 ve IV. Ünitesi 08.06.2005 tarihinde ulusal sisteme entegre edilmiştir [EÜAŞ, AEB TS Tanıtım Kataloğu, 2005]. 2011 yılı itibariyle Türkiye kurulu gücünün %2,72'sine sahip olan santral, aynı yıl içerisinde tek başına Türkiye üretiminin %2,5'ini karşılamıştır.

Santral, tek geçişli, tek ön ısıtıcılı, toz linyit yakmalı, gaz geçirmez kaynaklı, dış tüplü, emişli Benson tipi kazanıyla 538 °C'de saatte 1037,4 ton buhar üretmektedir ve alt ısıl değeri 3977-6280 kJ/kg aralığında değişen linyit kömürünü yakabilmektedir. Santralin yıllık kömür ihtiyacı 18 500 000 tondur ve bu kömürün yanması sonucu her kazanda yaklaşık olarak maksimum 55 ton/saat cüruf ile 240 ton/saat uçucu kül oluşmaktadır. Kondensasyonlu tandem compound double flow exhaust tipi dört türbin, 7884 kJ/kWh özgül ısı sarfiyatı ile 1440 MW brüt güç elde üretmektedir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çeşitli bileşenlerine ait teknik veriler [EÜAŞ, AEB TS Tanıtım Kataloğu, 2005]

Bileşen Adı	**Karakteristik**
Kazan	
İmalatçısı	Babcock-Almanya
Tipi	Benson
Nominal Buhar Çıkış Sıcaklığı	538 °C
Nominal Buhar Çıkış Basıncı	166,7 bar
Nominal Buhar Debisi	1 037,4 ton/saat
Tekrar Kızdırıcı Çıkış Sıcaklığı	538 °C
Tekrar Kızdırıcı Çıkış Basıncı	37,3 bar
Kazan Tasarımı	Tek geçişli ve tek ön ısıtıcılı, toz linyit yakmalı, gaz geçirmez kaynaklı, dış tüplü ve emişli Benson
Türbin	
İmalatçısı	Mitsubishi-Japonya
Tipi	Kondensasyonlu, tandem compound double flow exhaust
Devir	3 000 devir/dakika
Özgül Isı Sarfiyatı	7 884 kJ/kWh
Generatör	
İmalatçısı	Mitsubishi-Japonya
Güç	403 MVA
Güç Faktörü	0,9
Nominal Aktif Güç	360 MW
Çıkış Gerilimi	20 kV
Frekans	50 Hz
BGA	
İmalatçısı	Mitsubishi-Japonya
Baca Gazı Debisi	2 226 280 Nm^3/saat (Islak Bazda)
	1 252 447 Nm^3/saat (Kuru Bazda)

Çizelge 3.3 (Devam). Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çeşitli bileşenlerine ait teknik veriler [EÜAŞ, AEB TS Tanıtım Kataloğu, 2005]

Verim	Minimum %95
Baca Gazı Giriş / Çıkış Sıcaklıkları	154-185 °C / 65-72 °C

Çevreye olan olumsuz etkilerini minimize edebilmek amacıyla santral elektrofiltre ve Baca Gazı kükürt Arıtma (BGA) sistemi ile donatılmıştır. Elektrofiltreler partikül maddelerin %99,98'ini tutmaktadır. Baca gazı kükürt arıtma sistemi santral tasarım değerleri içerisinde çalıştığında minimum %95 verimle çalışmaktadır ki bu durumda temizlenen SO_2 miktarı 14000 mg/Nm^3'tür. Baca gazı sisteminin partikül tutma verimi ise minimum %80'dir.

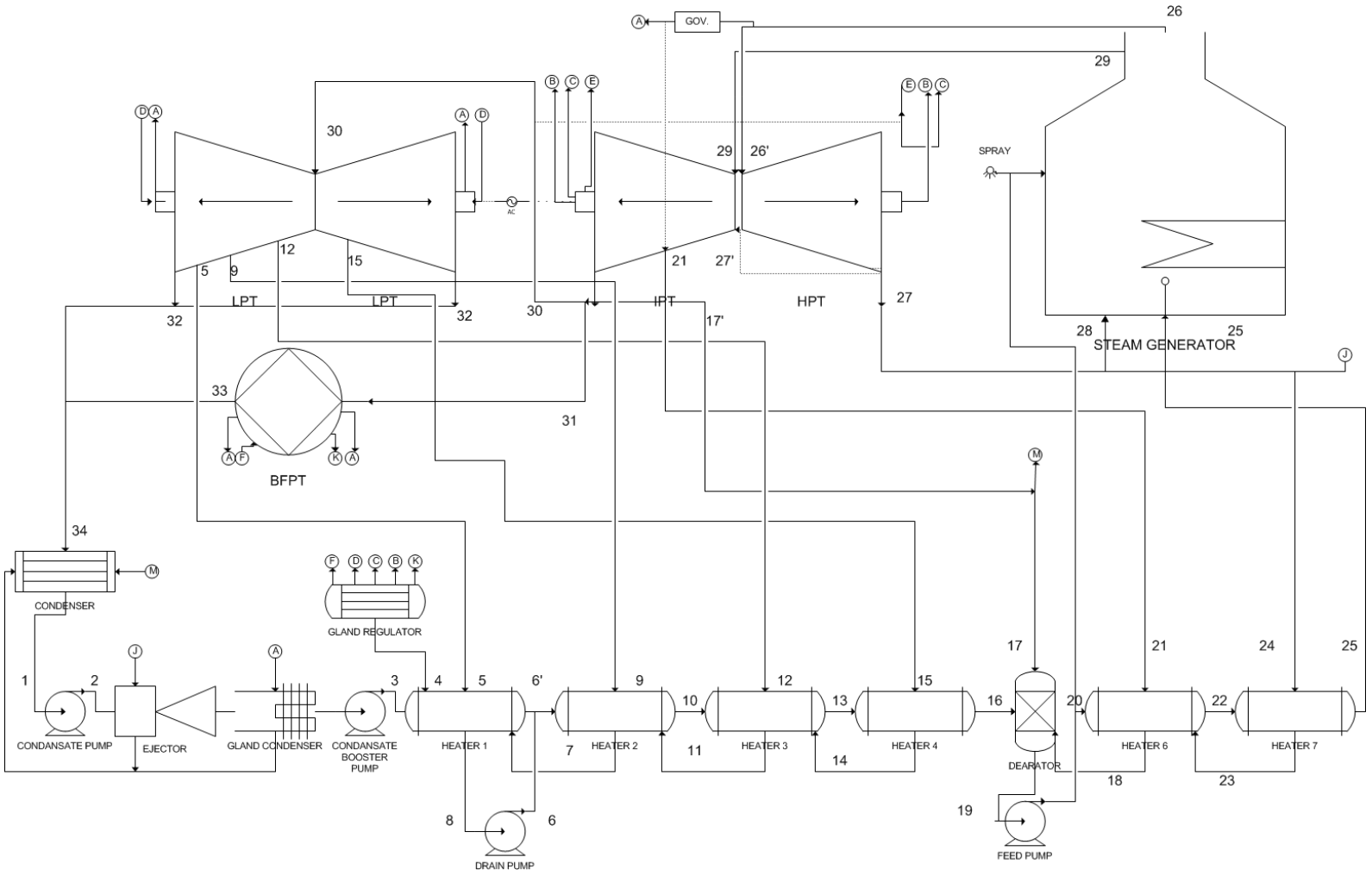
3.2.1. Santralin ısı dengesi

Rankine çevriminde çalışan santralın basitleştirilmiş ısı dengesi diagramı Şekil 3.1'de verilmektedir. Santralin her bir kazanı 538 °C'de ve 166,7 bar basınçta kızgın buhar üretmektedir. 58,84 bar basınca sahip püskürtme suları kazanın sıcaklık ve basınç değerlerini istenen işletme koşullarında tutmak üzere gerektiğinde kullanılmaktadır. Her kazan, biri yedek olan, 180 ton/saat kapasiteli beş değirmen ile saatte 725 ton linyit kömürüyle beslenmektedir. Kazanın +54 m kotundan alınan taze hava, iki adet FD fan ile LUVO'lara gönderilirken, ekonomizörden geçen çürük gaz ısısını taze havaya geçirmesi amacıyla iki adet ID fan ile yine LUVO'ya gönderilmektedir. Kazanın, Guaranteed Continuous Capacity (GCC) yükündeki DIN standartlarına göre belirlenen düzeltmiş enerji verimi %86,88 olarak kaydedilmiştir.

Afşin-Elbistan B Termik Santrali, tam güçte her biri 3000 devir/dakika devir hızında 360 MW güç üreten ve tam güçte 7884 kJ/kWh özgül ısı sarfiyatı olan dört adet türbin-generatör grubuna sahiptir. Kazandan kızdırılmış halde çıkan buhar önce Yüksek Basınç Türbinine (YBT) girip güç ürettikten sonra,

yeniden kızdırılmak üzere kazana gönderilir, burada 37,3 bar basınçta sıcaklığı 538 °C'ye çıkartılarak Orta Basınç Türbininde (OBT) sonrasında da Alçak Basınç Türbininde (ABT) güç üreterek bir kısmı buhar tahrikli besleme suyu pompasına (Boiler Feed Pump Turbine-BFPT) bir kısmı ise kondensere gönderilir. Çevrimde yer alan altı ısıtıcı ve bir dearatöre gönderilmek üzere, türbinde farklı sıcaklık ve basınçlarda toplam yedi adet buhar çekme noktası yer almaktadır. Kazan besleme suyunun pompalanması işi 8533 kW gücündeki buhar tahrikli besleme suyu pompası tarafından yerine getirilmektedir. ABT ve BFPT'den çıkan buhar 38,66 °C'de kondenserde yoğuşturularak önce ejektörden sonra gland kondenserden geçirilerek ısıtıcılara gönderilir. Çevrimde bulunan iki ejektörden Hogging ejektörü santralin devreye alınması sırasında kondenserdeki vakum etkisini arttırmak için kullanılırken diğer ejektör devreye alma tamamlandıktan sonra bu etkiyi sürdürmek amacıyla çalıştırılır. Şekil 3.1'de gösterilen BFPT, kondenser pompası ve drenaj pompalarına ek olarak booster, yağ, fuel-oil, yangın ve diğer pek çok pompa çevrimde görev almaktadır. Bununla beraber, çalışmada yapılan analizin kapsamı göz önünde tutulduğunda bu pompalardan, üreticinin sağladığı orijinal ısı denge diagramlarında olduğu gibi, sadece önemli olanları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Diğer tüm kömür santrallerinde olduğu gibi Afşin-Elbistan B Termik Santrali de termodinamik çevrimin doğrudan bir parçası olmayan kömür alma, kül atma, BGA, uçucu kül, su tasfiye, küllü su arıtma, kondenser parlatma sistemi gibi pek çok sistemle donatılmıştır. Ancak, sözü edilen ortak sistemler bu çalışmanın kapsamı dışında değerlendirildiğinden yapılan analizlerde göz önüne alınmamıştır.



Şekil 3.1. Afşin-Elbistan B Termik Santrali ısı denge diagramı

3.2.2. Afşin-Elbistan linyitinin karakteristiği

Afşin-Elbistan havzası Pliyosen sürecinde, öncelikle doğu ve batısındaki normal faylar veya normal bileşeni olan yırtılma fayları tarafından şekillendirilmiş bir tektonik çöküntü havzasıdır. Bu havzanın temelini tektonostratigrafik özellikte, başlıca şist ve rekristalize karbonatlar ile metaofiyolit ve asit intruziflerin oluşturduğu Permiyen-Kretase yaş aralığındaki kayalar oluşturur [Besbelli ve ark., 2009]. Genel olarak yüksek nem ve kül oranına sahip bu linyit ancak elektrik üretme amaçlı olarak termik santrallerde kullanılabilmektedir. Kardeşi A santralinde olduğu gibi Afşin-Elbistan-B santrali de bu niteliklere sahip olan linyitin değerlendirilmesi amacıyla kurulmuştur.

Santralin kazanı, Çizelge 3.4'de verilen özelliklere sahip olan linyiti yakabilecek şekilde tasarlanmıştır. Linyit üzerinde yapılan analizlerde karbon, hidrojen, oksijen ve sülfüre ek olarak SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, SO_3 ve eser miktarda MgO ile Na_2O-K_2O rastlanmıştır. Kazanın yukarıda sözü edilen aralıkta çalışabilmesine karşın tasarım belirli bir özellikteki linyite göre yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Kazanda yakılabilecek linyitin temel özellikleri [TEAŞ SPT, 1998]

Karakteristik	**Değer**		
	Yakma Aralığı	**En İyi Kömür**	**En Kötü Kömür**
AID (kJ/kg)	3 977-6 280	6280,20	3 977,46
Nem (%)	45-55	50,31	48,19
Kül (%)	15-28	15,00	28,00
Sülfür (%)	2,2 (Maksimum)	-	-

Kazanda yakılabilecek kömürün özelliklerinin bu şekilde belirtilmiş olmasına karşın en iyi ve en kötü kömür tanımı kül ve nem içeriği bakımından spesifik değerlerle tanımlanmaktadır. Öte yandan kazanın tasarım koşullarına göre

buhar üretebilmesi için gerekli kömür akış miktarı da değişiklik göstermektedir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. En iyi ve en kötü kömüre ait yakıt debileri [BBPC, Oberhausen, 2004]

Kömür Debisi (kg/s)	**Santral Çıkış Gücü Seviyesi (%)**		
	100	**80**	**60**
En iyi kömür	145	119,1	91,3
Tasarım Kömürü	192	156,9	122,4
En kötü kömür	237,5	194,4	150,4

Üreticinin sağladığı bu bilgilere göre; kazan, ilgili çıkış gücüne ait buhar koşullarını elde edebilmek için kömürün tasarım kömüründen (Çizelge 3.6) daha kötü özellikler göstermesi durumunda daha fazla miktarda yakıt tüketmekte, tasarım kömüründen daha iyi durumda olması durumunda ise daha az yakıt tüketmektedir.

Çizelge 3.6. Tasarıma esas linyitin kimyasal komposizyonu ve yüzdece fiziksel ağırlıkları (karbon:12,011 hidrojen: 1,008, oksijen: 15,9995, su: 18,0155, nitrojen: 14,0065, sülfür: 32,064 kg/kmol değerleri kullanılmıştır) [TEAŞ SPT, (1998) ve hesaplamalar]

Elementsel Analiz	**Tasarıma Esas**	**Kuru**	**Kuru-Külsüz**	**kmol/kg**
Kül	%19,89	%41,44	-	-
Karbon	%17,08	%35,58	%60,76	0,050588
Hidrojen	%1,34	%2,79	%4,77	0,047292
Sülfür	%2,00	%4,17	%7,11	0,002219
Nitrojen	%0,51	%1,06	%1,81	0,001295
Oksijen	%7,18	%14,96	%25,54	0,015965
Su	%52,00	-	-	-

Baz yükte çalışmak üzere kurulan bu tip bir santralin çalışma aralığı, günün farklı saatlerindeki elektrik enerjisi talebine uyum sağlayabilmesi ve frekans kontrolüne katılabilmesi için, belirli sınırlar arasında değişebilmelidir. Santral, tasarım kömürü üzerinden nominal gücünün %40'ı ile %100,75 aralığında güç üretebilmektedir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7. Santralin nominal gücüne karşılık gelen tasarım kömürü miktarı [BBPC, 2004]

Güç Oranı (%)	**Güç (kW)**	**Kütlesel Yakıt Akış Debisi (kg/s)**
MCR (100,75)	362 700	193,2
GCC (100)	360 000	192,0
85	306 000	165,8
80	288 000	156,9
60	216 000	122,4
40	144 000	87,5

Santral işletilirken kömürün kalorifik değerleri, kimyasal komposizyonu ve fiziksel özellikleri laboratuarlarda yapılan testlerle günde altı defa kontrol edilmektedir.

3.2.3. Santralden elde edilen gerçek veriler

Santralin tasarım değerleri ile karşılaştırabilmek amacıyla ısı denge diagramında verilen noktalardaki sıcaklık, basınç ve kütle debisi gibi gerçek değerler santralin dijital kontrol sisteminden alınmıştır. 25-27 Mayıs 2011 tarihleri arasında ikinci ve üçüncü üniteden alınan veriler bölüm 4.2.'de açıklanan Microsoft Excel platformunda hazırlanan yazılımın çalışma sayfalarında kullanılmıştır. Alınan veriler ısı denge diagramındaki noktaların yukarıda belirtilen termofiziksel özelliklerine ek olarak,

- Baca gazı kazan çıkış sıcaklığı
- Değirmenlere gelen toplam kömür
- Sistemin MW talebi
- Generatör yükü
- Dış ortam hava sıcaklığı
- Kondenser soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları
- Pompaların çektikleri akım

gibi çeşitli değerleri de içermektedir. Bununla beraber santralin dijital kontrol sisteminden alınan tüm değerler kullanılmamıştır, bunun nedeni bazı değerlerin sistemden kaynaklanan nedenlerden ötürü kesintiye uğraması veya dönüşümlü olarak çalıştırılan pompalar nedeniyle meydana gelen süreksizliklerdir. Bu bağlamda güvenilir ve mümkün olan çok noktaya ilişkin bilgi veren üçüncü ünitenin 20.05 2011 tarihinde alınan verileri kullanılmıştır.

Çizelge 3.8. Gerçek veri analizinde kullanılan kömürün 25.05.2011 günü süresince AID, nem, kül ve kükürt özellikleri

İlgili Değer	**1. Periyot (00:00-04:00)**	**2. Periyot (04:00-08:00)**	**3. Periyot (08:00-12:00)**	**4. Periyot (12:00-16:00)**	**5. Periyot (16:00-20:00)**	**6. Periyot (20:00-00:00)**
AID (kJ/kg)	4 509	4 677	4 459	4 610	4 174	4 224
Nem (%)	51,1	51,7	49,2	50,0	50,0	49,8
Kül (%)	18,1	17,7	24,9	24,3	19,6	20,7
Kükürt (%)	0,740	1,000	1,140	1,260	0,850	0,750

Çizelge 3.8'de verilen tüm değerler santralin kömür kimyası laboratuvarından elde edilmiştir. Yazılımda her bir periyota ait değerler ayrı ayrı kullanılmıştır

ancak her dönem içerisinde kömürün kimyasal ve fiziksel özellikleri çeşitli dalgalanmalara uğrayabilir bu nedenle verilen değerler o periyota ait ortalama değerler olarak kabul edilmiştir.

4. EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji analizi son birkaç on yılda yoğunluk kazanan ve termodinamik sistemlerin performansını değerlendirmede kullanılan bir yöntemdir. Gerçekte ekserji analizinin ısı makineleri olan elektrik üretim santralleri haricinde ısı pompaları, binaların ısıtma soğutma sistemleri, biyolojik sistemler, çevre analizleri, uluslararası ilişkiler ve hatta günlük hayata varan uygulama alanları bulunmaktadır. Çalışmanın kapsamında ise santralin yakıt kaynağı olan kömürün kimyasal ekserji analizi, çevrimin ve bileşenlerinin ekserji analizi yapılmıştır.

4.1. Enerji ve Ekserji Analizi

Organize olmuş bir enerji, organize olmamış bir enerjiden çok daha değerlidir. Bu nedenle termodinamiğin önemli bir uygulama alanı organize olmayan enerji olan ısıyı organize olmuş enerji olan işe çevirme üzerine kuruludur [Çengel ve Boles, 2007]. Isı makinesi olan enerji santralleri de organize olmayan enerjiyi organize enerji türü olan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Organize olmayan ısı enerjisinin kaynağı kömür, doğal gaz, petrol ürünleri veya diğer yakıtların kimyasal olarak yanması veya nükleer reaksiyonlar olabilir.

Enerji ve ekserji analizini termik santral gibi bir ısı makinesine uygularken iki farklı pencereden bakmak mümkündür. Birincisi santrali makro anlamda kimyasal enerji/ekseriye sahip yakıtın girdiği ve elektrik enerjisinin çıktığı bir kapalı kutu olarak ele alan yaklaşım, ikincisi ise çevrimde bulunan tüm bileşenleri teker teker inceleyen yaklaşımdır. Performans testleri olarak adlandırılan santralin çalışma verimini belirlemeye yönelik bir takım testler ise bu iki yaklaşımın karışımını kullanmaktadır. Buna göre bir santralin kabul testinde sadece kömür, kazan, türbin-generatör grubu parametreleri ile üretilen elektrik enerjisi dikkate alınır bunun dışında kalan kondenser,

ısıtıcılar, dearatör, pompalar, gland buhar sistemi, LUVO gibi pek çok bileşenin (Bkz Şekil 3.1) performansı doğrudan değerlendirilmez.

Çalışmada yapılan analizlerde yukarıda sözü edilen her iki yaklaşımdan da yararlanılmıştır bir başka deyişle santral hem bir kapalı kutu gibi değerlendirilmiş hem de bütün bileşenleri enerji ve ekseri açısından tek tek incelenmiştir.

4.1.1. Genel çevrim analizi

Isı makinesi olan bir elektrik üretim santrali en basit anlamda kömürün sahip olduğu kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu çevrimin verimi:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{kömür} AID} \tag{4.1}$$

olarak tanımlanabilir, burada η enerji verimini, P kW cinsinden elektrik çıkış gücünü, $\dot{m}$ kömür debisini (kg/s), AID ise yakıt alt ısıl değerini (kJ/kg) göstermektedir. Eş. 4.1 Afşin-Elbistan B santrali açısından değerlendirildiğine enerji ve ekserji verimi hesabında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar bulunmaktadır. Örneğin, santralin çevriminde %40 güç seviyesi olan 144 MW'a kadar türbin tahrikli pompa kullanıldığından verim hesabında pompanın harcadığı gücün brüt üretimden düşülmesine gerek yoktur. Bölüm 3.2.1'de açıklandığı gibi, termodinamik çevrimin doğrudan bir parçası olmayan yardımcı tesislerin iç tüketim etkisi analizlerde dikkate alınmamıştır.

Ekserji verimi açısından değerlendirildiğinde santral, kömürün sahip olduğu kimyasal ekserjiyi elektrik ekserijisine dönüştürmektedir:

$$\zeta = \frac{E^{\mathrm{EL}}}{\dot{m}_{kömür} e^{CH}} \tag{4.2}$$

Burada ζ ekserji verimini, *E* kW cinsinden toplam elektrik çıkış ekserjisini, e^{CH} ise kJ/kg cinsinden kömürün spesifik kimyasal ekserjisini göstermektedir. Kömürün içerisinde bulunan kimyasal ekserjinin belirlenmesi için kullanılan çeşitli yöntemler Bölüm 4.1.2'de Kimyasal Ekserji başlığı altında tartışılmaktadır.

4.1.2. Bileşenlerin enerji ve ekserji analizi

Türbin, kazan, kompresör, vana, ısı eşanjörü, pompa gibi pek çok mühendislik ekipmanın, santral devreye alınıp üretime geçiş sürecini tamamladıktan sonra koşulların değişmediği, zamandan bağımsız, sürekli bir rejimde çalıştığı kabul edilebilir. Gerçekte termodinamik çevrim kullanan elektrik üretim santrallerinde çeşitli ekipmanlardaki kaçaklar nedeniyle ekleme (make-up) akışkan kullanılmakta, aynı zamanda, bazı vanalar yardımıyla akışkan miktarı ayarlanmaktadır ancak bu miktarlar tasarımsal analizde dikkate alınmamaktadır.

Bileşenlerin enerji ve ekserji analizinde süreklilik, enerjinin korunumu, entropi ve ekserji dengesi denklemleri kullanılmıştır. Bu yapılırken bileşenlerin kontrol hacmi boyunca sürekli rejimde bir akış sergilediği kabul edilmiştir. Buna göre kontrol hacmi boyunca akışkan özellikleri noktadan noktaya değişiklik gösterebilirken her noktadaki değeri zamandan bağımsız olarak sabit kalmaktadır.

Süreklilik denklemi

Çevrimi, kapalı bir sistem olarak değerlendirilebilecek Afşin-Elbistan B gibi bir termik santralin bileşenlerinde sürekli akış rejiminin geçerli olduğu kabul edilebilir. Kütlenin korunumu yasası gereği, bir bileşenin kontrol hacmine giren ve bu hacimden çıkan birim zamandaki kütle miktarı değişmez.

$$\sum(\dot{m}_g - \dot{m}_ç) = 0 \qquad (4.3)$$

Burada, g ve ç alt indisleri, sırasıyla, kontrol hacmine giren ve bu hacimden çıkan akışkan kütlesini temsil etmektedir.

Enerji denklemi

Enerjinin korunumu kanunu belirli bir kontrol hacmi içerisine giren ve bu hacimden çıkan toplam enerjinin miktarının değişmeyeceğini öngörmektedir. Söz konusu kontrol hacmine giren net ısı, iş ve kütle transferi bu hacimden çıkan net ısı, iş ve kütle transferlerine eşit olduğundan;

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m}\left(\mathrm{h} + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum_ç \dot{m}\left(\mathrm{h} + \frac{V^2}{2} + gz\right) \qquad (4.4)$$

elde edilir. Burada, $\dot{Q}$ ısı transferini (kW), $\dot{W}$ sistem üzerinde yapılan işi (kW), h akışkanın entalpisini (kJ/kg), V akışkanın kontrol hacmi içindeki akış hızını (m/s), g yerçekimi ivmesini (9,806665 m/s^2), z potansiyel farkına esas yüksekliği (m) göstermektedir.

Isı ve iş etkileşimlerinde ısı transferinin sisteme doğru olduğu yönün, işin ise sistem tarafından yapıldığı yönün pozitif alınması gelenekselleşmiştir. Buna göre Eş. 4.4,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_ç \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) - \sum_g \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \qquad (4.5)$$

olacak biçimde kısaltılabilir. Birçok mühendislik bileşeni için kinetik ve potansiyel enerji terimleri önemli bir değere sahip olmadığından, yapılan çalışmada olduğu gibi, bu terimler ihmal edilerek Eş. 4.5'ten çıkarılabilir. Yine incelenen kontrol hacminde ısı veya iş etkileşimi olmadığında ilgili terimler olan $\dot{Q}$ ve $\dot{W}$ sıfır olarak alınır.

Entropi dengesi

Ele alınan bir kontrol hacmi için entropi transferi mekanizmasında kütle akışı, ısı transferi ve yapılan iş göz önüne alınmalıdır. Sürekli akış rejimi için entropi dengesi,

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{\dot{T}_k} + \sum_g \dot{m}s - \sum_{ç} \dot{m}s + \dot{S} = 0 \qquad (4.6)$$

olarak gösterilebilir. Burada k alt indisi ısı transferi yapılan diğer ortamları, s ilgili akışın entropisini, $\dot{S}$ kontrol hacmi içerisinde üretilen entropi miktarını göstermektedir. Kontrol hacmi dışıyla ısı alış verişinin olmadığı adiyabatik süreçler için $\dot{Q}_k$terimi sıfır alınmaktadır.

Ekserji dengesi

Seçilen kontrol hacmine ısı, kütle veya iş biçiminde giren ekserji girişleri toplamı bu hacimden çıkan ekserji ve yıkılan ekserji toplamına eşit olmalıdır. Eş. 4.6'nın bir başka ifadesi olarak nitelendirilebilecek bu denge,

$$\sum(1 - \frac{T_0}{T_k})\dot{Q}_k + \sum_g \dot{m}e - \sum_{ç} \dot{m}e - \dot{W} - \dot{E} = 0 \qquad (4.7)$$

olarak verilebilir. Eş. 4.7'de *e* spesifik ekserjiyi (kJ/kg), $\dot{E}$ kontrol hacminde yıkılan toplam ekserji miktarını (kW) göstermektedir. Eş. 4.7'nin birinci terimi ısı transferiyle gerçekleşen ekserji transferini son terimi ise ekserji yıkımını göstermektedir. Bir termodinamik bileşenin ekserji analizi yapılırken kontrol hacminin seçimi son derece önemlidir. Zira ekserji kaybı veya yıkımı teriminin araştırmasına göre analiz sonuçları değişiklik arz edecektir. Kazan, türbin veya ısı eşanjörü gibi bir termodinamik elemanın sıcaklık dağılımı son derece kompleks olabilir, bu nedenle Eş. 4.7'nin birinci terimini bileşenin yüzey alanı üzerinden belirlemek son derece güçtür. Bu güçlüğün önüne geçebilmek için

adiyabatik bir bileşende ekserji kayıpları ve yıkımı Eş. 4.8'de verildiği gibi tek bir terimde (yıkım teriminde) toplanmıştır:

$$\sum_g \dot{m}e - \sum_{ç} \dot{m}e - \dot{W} - \dot{E} = 0 \quad (4.8)$$

Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'de verilen ekseri terimleri farklı öğelerden oluşmaktadır. Nükleer, manyetik, elektriksel, yüzey gerilimi etkileri ihmal edildiğinde bir sistemin toplam ekserjisi *E* fiziksel, kinetik, kimyasal ve potansiyel olarak dört başlıkta incelenebilir [Bejan ve ark., 1996]. Enerji denklemi başlığı altında bahsedildiği gibi potansiyel ve kinetik ekserji dikkate alınmadığından çalışmada sadece fiziksel ve kimyasal ekserji incelenmiştir.

Fiziksel ekserji

Bir sistem tarafından ölü hal koşullarına (25 °C sıcaklık ve 1 atmosfer basınç) göre yapılabilecek maksimum iş olarak tanımlanan fiziksel ekserji Eş. 4.9'da tanımlanmaktadır.

$$e^{PH} = \mathrm{h} - \mathrm{h}_0 - T_0(\mathrm{s} - \mathrm{s}_0) \quad (4.9)$$

Burada PH üst indisi fiziksel ekserjiyi, h_0 ve s_0 25 °C sıcaklık ve 1 atmosfer basınçta suyun sırasıyla spesifik entalpi ve spesifik entropisini, T_0 25 °C'yi ifade etmektedir.

Kimyasal ekserji

Bir sistemin kimyasal ekserjisini belirlenirken onun, doğal çevrenin kimyasal komposizyonundan ne kadar farklılaştığı göz önüne alınır. Bunun yapılabilmesi için de doğal çevrenin kimyasal komposizyonunun tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla farklı doğal çevre modelleri geliştirilmiştir ancak bu modellerin standart çevrelerinin birbirleriyle etkileşim

halinde olmayan, bir başka deyişle, kimyasal ve fiziksel denge içerisinde bulunan bir sistem olması gerekmektedir. Bir dizi referans madde ile standart çevre oluşturan, bununla beraber, kimyasal ve fiziksel denge şartı arayan veya aramayan modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin her birinde bütün element ve bileşikler için 25 °C sıcaklık, 1 atmosfer basınçta standart kimyasal ekserji tabloları oluşturulmuştur [Bejan ve ark., 1996].

Gazların ve gaz karışımlarının kimyasal ekserjisi

Ölü hal koşullarındaki çeşitli gazlardan oluşan karışımın içerisindeki bir m gazının kontrol hacmine girdiği ve bu hacim içerisinde izotermal olarak sadece çevre ile ısı alış verişinde bulunacak şekilde genişleyerek $x_m P_0$ kısmı basıncında bu hacmi terk ederek çevreye çıktığı düşünülürse, elde edilecek maksimum teorik iş miktarı [Bejan ve ark., 1996]:

$$\bar{e}_m^{CH} = -\bar{R}T_0 \ln \frac{x_m^{çevre} p_0}{x_m p_0} = -\bar{R}T_0 \ln x_m^{çevre} \tag{4.10}$$

ile belirlenebilir. Burada *x* karışımdaki gazın mol oranını, *çevre* üst indisi gazın ilgili büyüklüğün doğal çevredeki değerini, CH üst indisi ise kimyasal ekserjiyi simgelemektedir. Kimyasal ekserji ve evrensel gaz sabiti $\bar{R}$ (8,31447 kJ/kmol.K) üzerindeki çizgi ilgili büyüklüklerin molar olduğunu göstermektedir. Bu ifade karışımda yer alan tüm gazlar için uygulandığında;

$$\bar{e}^{CH} = -\bar{R}T_0 \sum \mathrm{x_m} \ln \frac{x_m^{çevre}}{x_m} \tag{4.11}$$

dönüşmektedir. Eş. 4.11'deki doğal logaritma terimi $x_m(lnx_m^{çevre} - lnx_m)$ olarak açılarak Eş. 4.10'un yardımıyla,

$$\bar{e}^{CH} = \sum x_m \bar{e}_m^{CH} + \bar{R}T_0 \sum \mathrm{x_m} \ln x_m \tag{4.12}$$

elde edilir. Eş. 4.12 referans çevrede bulunmayan gaz karışımları için geçerlidir.

Kömürün kimyasal ekserjisi

Kömürün kimyasal ekserjisinin belirlenmesi için çeşitli modellerden ve ampirik formüllerden yararlanılmaktadır. Bunlardan bazıları yanma denklemlerinden başlayarak geliştirilen ifadeleri, bazıları da kömürün içerisinde bulunan karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen ve sülfür miktarına dayanan bir takım ampirik korelasyonları içermektedir. Bu bölümde söz konusu modellere ilişkin bilgi verilmeden önce kömürün yanmasıyla ilgili yanma denklemleri incelenecektir.

Kuru ve külsüz kömürün yanmanın gerçekleştirildiği kontrol hacmine ölü hal koşullarında (T_0, P_0) girerek CO_2, SO_2 ve $H_2O(l)$ vermek üzere yine ölü hal koşullarındaki oksijenle reaksiyona girmesi

$$(cC + hH + oO + nN + sS) + \nu O_2 \rightarrow \nu_{CO_2} CO_2 + \nu_{H_2O} H_2O(l) + \nu_{SO_2} SO_2 + \nu_{N_2} N_2 \quad (4.13)$$

ile tasvir edilebilir. Burada ν reaksiyondaki stokiyometrik katsayıları göstermektedir. Tam yanmanın gerçekleştiğini kabul eden Eş. 4.13'deki c, h, o, n ve s değerleri Afşin-Elbistan B Termik Santrali tasarım kömürü için Çizelge 3.3'de verilmişti. Reaksiyon katsayılarının eşitlenmesiyle;

$$\nu_{CO_2} = c, \nu_{H_2O} = \frac{1}{2}h, \nu_{SO_2} = s, \nu_{N_2} = \frac{1}{2}n, \nu_{O_2} = c + \frac{1}{4}h + s - \frac{1}{2}o \quad (4.14)$$

elde edilir. Kömürün standart kimyasal ekserjisinin doğrudan belirlenemediği durumlarda Eş. 4.14, Eş. 4.13'deki idealize edilmiş yanma denklemiyle beraber kullanıldığında;

$$e_{DAF}^{CH} = (HHV)_{DAF} - T_0\left[s_{DAF} + \nu_{O_2}\bar{s}_{O_2} - \nu_{CO_2}\bar{s}_{CO_2} - \nu_{H2O}\bar{s}_{H_2O} - \nu_{SO_2}\bar{s}_{SO_2} - \nu N2sN2 + \nu CO2eCO2CH + \nu H2OeH2OCH + \nu SO2eSO2CH + \nu N2eN2CH - \nu O2eO2CH\right] \quad (4.15)$$

ifadesi elde edilmiş olur. Burada DAF kuru külsüz kömürü, HHV üst ısıl değeri, s mutlak entropiyi, $\bar{s}$ mutlak molar entropiyi ve ν de daha önce tanımlandığı gibi reaksiyondaki stokiyometrik katsayıları göstermektedir.

Üst ısıl değerin (HHV) bilinmediği durumlarda aşağıdaki ifade kullanılabilmektedir:

$$(HHV)_{DAF} = [152{,}19h + 98{,}767][(c/3) + h - (o - s)/8] \quad (4.16)$$

Benzer biçimde s_{DAF} değerinin hesaplanabilmesi için,

$$s_{DAF} = c\left[37{,}1653 - 31{,}4767exp^{-\left(0.564682\frac{h}{c+n}\right)} + 20{,}1145\frac{o}{c+n} + 54{,}3111\frac{n}{c+n} + 44{,}6712sc+n\right] \quad (4.17)$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır, burada exp doğal logaritmanın tabanıdır.

Dikkat edildiğinde Eş. 4.15'te yanma reaksiyonuna giren element ve bileşiklerin kimyasal ekserjilerinin yer aldığı görülmektedir. Bu kimyasal ekserjiler çevre modellerine göre farklılık arz etmektedir. Söz konusu modellerden iki tanesi genel kabul görmüştür: Joachim Ahrendts ve Szargut-Morris-Steward [Bejan ve ark., 1996].

Joachim Ahrendts Modelinde (JAM) nitrik asit ve nitratlar haricinde atmosferin, okyanusların ve litosferin bir bölümünün tüm kimyasal bileşenlerinin sınırsız termodinamik dengede olduğu kabul edilir. Szargut-Morris-Steward Modelinin (SMSM) çevresi genel olarak doğal ortama çok benzemekle birlikte denge şartı bu modelde yer almamaktadır.

Eş. 4.13'de reaksiyona giren ve ürün olarak çıkan çeşitli element ve bileşiklerin her iki modele göre ölü hal koşullarındaki mutlak entropi ve standart kimyasal ekserjileri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Çeşitli maddelerin ölü hal koşullarındaki mutlak molar entropileri ve JAM/SMSM'e göre standart kimyasal ekserjileri [Bejan ve ark., 1996]

Madde	**Kimyasal Formülü**	$\bar{s}^0$ **(kJ/kmol.K)**	$\bar{e}^{CH}$ **(kJ/kmol) JAM**	$\bar{e}^{CH}$ **(kJ/kmol) SMSM**
Oksijen	$O_2(g)$	205,146	3 951	3 970
Karbondioksit	$CO_2(g)$	213,794	14 176	19 870
Su (sıvı)	$H_2O(l)$	69,948	45	900
Su (buhar)	$H_2O(v)$	188,824	8 636	9 500
Kükürtdioksit	$SO_2(g)$	284,094	301 939	313 400
Nitrojen	$N_2(g)$	191,61	639	720

Yukarıda açıklanan modellere ek olarak kömür kimyasal ekserjisini hesaplayan ampirik yaklaşımlar da mevcuttur.

Szargut ve Styrylska Metodu (SSM) kuru kömürün kimyasal ekserjisini net kalorifik değerinin bir faktör ile çarpımıyla hesaplamaktadır. Oksijenin karbona kütlesel oranının 0,667'den küçük olması durumunda bu faktör [Kotas, 1985]

$$\varphi_{kuru} = 1{,}0437 + 0{,}1882\frac{h}{c} + 0{,}0610\frac{o}{c} + 0{,}0404\frac{n}{c} \tag{4.18}$$

ile verilmektedir. Burada h, c, o ve n sırasıyla hidrojen, karbon, oksijen ve nitrojenin kuru kömürde kütlece ağırlığıdır. Eş. 4.18'in doğruluğun ±%1'den daha iyi olduğu tahmin edilmektedir. Eş. 4.18'de sülfürün etkisi dikkate alınmamıştır. Bu etki dikkate alınarak sülfürün kimyasal bağları, orijinal kömürdeki nemin ve külün ekserjisi ihmal edilecek olursa:

$$e^{CH}_{kömür} = \left[(NCV)^0 + wh_{fg}\right]\varphi_{kuru} + [e^{CH}_s - (NCV)^0_s]s \tag{4.19}$$

ulaşılır. Sülfürün standart kimyasal ekserjisi $E_S^{CH} = 18\,676\ kJ/kg$ ve net kalorifik değeri $(NCV)_S^0 = 9\,259\ kJ/kg$ olarak alınıp su için 25°C'de $h_{fg} = 2\,442\ kJ/kg$ olduğu hatırlandığında,

$$e_{kömür}^{CH} = [(NCV)^0 + 2{,}442w]\varphi_{kuru} + 9{,}417s \tag{4.20}$$

elde edilmektedir. Külün kimyasal ekserjisini hesaba katmayan bu ifadede 0 üst indisi ölü hal koşullarını, w kömürdeki nemin kütlece ağırlığını göstermektedir. Eş. 4.20 kJ/kg cinsinden kömürün spesifik kimyasal ekserjisini, kömürün içindeki nem ve sülfürü hesaba katarak, net kalorifik değeri (NCV) ile ilişkilendirmektedir.

Ghamarian ve Cambel Metodu (GCM), Ghamarian ve Cambel, Nerst yasası olarak da bilinen termodinamiğin üçüncü kanununu kullanarak kömürün kimyasal ekserjisini belirlemek amacıyla bir dizi ampirik denklem geliştirmiştir. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin tasarım kömürüne uygun olan denklem bir başka deyişle o/c oranının 0,5'den küçük olduğu durumlarda aşağıdaki eşitlikten [Srivastana, 1988],

$$e_{kömür}^{CH} = 443{,}35208c + 105{,}30292h - 184{,}17053o + 32{,}65797n + \\ +513{,}159s \tag{4.21}$$

yararlanılmaktadır. Eş. 4.21'de basıncın kömürün termodinamik özelliklerini değiştirmediği varsayılmaktadır.

ASTM D 5865 ise kömürün ve kok gazının kalorifik değerlerini belirlemek amacıyla kullanılan standart bir yöntemdir. Bu yöntemde izoperibol veya bir kalorimetre bombası yardımıyla elde edilen sonuçlar SI birimlerinde ifade edilir. ASTM D 5865 standardı kömürün kimyasal ekserjisini belirlemez bunun yerine alt ısıl veya üst ısıl değer belirlenir. Üst ısıl değer ile alt ısıl değer arasındaki ilişki [Olgun, 2006]

$$LHV = HHV - [(h\% \times (1 - w) + (11{,}19 \times w)] \times 51{,}5 \quad (4.22)$$

ile verilmektedir. Burada w kömürdeki nemin ve h hidrojenin kütlece oranını, 0,1119 katsayısı ise kömürdeki diatomik hidrojen ve su için bir düzeltme katsayısıdır. ASTM standardı ile kömürün kimyasal ekserjisinin belirlenmesi ancak bu değerin, literatürdeki pek çok örnekte olduğu gibi, üst ısıl değere eşit kabul edilmesiyle yapılabilir.

4.1.3. Bileşenlerin enerji ve ekserji verimleri

Bileşenlerin enerji ve ekserji verimleri tanımı bileşene ve istenen amaca göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu bölümde enerji ve ekseri tanımları daha detaylı olarak incelenmektedir.

Enerji verimi

Enerji verimi en temel anlamda termodinamiğin birinci kanunun bir yansıması olarak herhangi bir bileşene sağlanan enerjinin ne kadarının faydalı bir çıktıya dönüştüğünün göstergesidir.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{ç}}{\dot{E}_{g}} \quad (4.23)$$

Eş. 4.23'te g ve ç alt indisleri termodinamik bileşene giren, bu bileşenden çıkan enerji miktarını göstermektedir ve bu eşitlik her termodinamik bileşen için geçerlidir. Bununla beraber pompa, kompresör ve türbin için izentropik verim daha çok kullanılmaktadır. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilebilir olan bir pompa veya türbin için izentropik verim sırasıyla,

$$\eta_{pompa} = \frac{w_s}{w_a} \quad (4.24)$$

$$\eta_{türbin} = \frac{w_a}{w_s} \tag{4.25}$$

verildiği gibidir. Eş. 4.24 ve Eş. 4.25'deki s ve a alt indisleri sırasıyla sabit entropide sisteme sağlanan veya sistemden alınan işi ve gerçek koşullarda sisteme sağlanan veya sistemden alınan işi göstermektedir.

Santraldeki her noktaya ait enerji verimi ve izentropik verim tanımları Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Ekserji verimi

Tanımı her bileşen için farklılık gösterse de bir termodinamik bileşenin ekserji verimi, ona sağlanan ekserjinin ne kadarını yararlı bir çıktı haline getirebildiğinin bir ölçüsüdür. Bileşenlerin ekserji verimi incelenirken fiziksel ekserjinin yanında kimyasal ekserji öğesinin de göz önüne alınması gereken durumlar olabilir.

$$\zeta = \frac{\dot{E}^{CH}_{çıkan} + \dot{E}^{PH}_{çıkan}}{\dot{E}^{CH}_{giren} + \dot{E}^{PH}_{giren}} \tag{4.26}$$

ζ burada ekserji verimini, üst indisler CH kimyasal ekserjiyi PH ise fiziksel ekserjiyi göstermektedir. Çizelge 4.1'den de hatırlanacağı gibi ölü hal koşullarında kararlı halde bulunmayan (dünyada bu koşullarda hem sıvı hem buhar fazında bulunan) su gibi bazı kimyasalların hem sıvı hem de gaz fazlarındaki standart kimyasal ekserjileri bulunmaktadır. Ölü hal koşullarında sıkıştırılmış sıvı halde olan suyun buhar fazı kimyasal ekserjisi bazı kaynaklarda [Kotas, 1985] hayali olarak nitelendirilmektedir. Diğer taraftan literatürde suyun fazlarına göre kimyasal ekserjisini hesaba katan yaklaşımlar bulunmaktadır [Bejan ve ark., 1996; Moran, 1989].

Santraldeki her noktaya ait ekserji verimi tanımlarına ek olarak bileşenlerin ekserji verimsizliklerini belirlemek amacıyla çeşitli göstergeler de kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi olan y_D bileşendeki ekserji yıkımının kömür tarafından sisteme sağlanan ekserjiye olan oranıdır. Diğer bir gösterge y_D^* bileşenin toplam ekserji yıkımındaki payını ifade eder.

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{kömür}} \tag{4.27}$$

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,toplam}} \tag{4.28}$$

Eş. 4.27 ve Eş. 4.28'deki D alt indisi ekserji yıkımını göstermektedir. Yukarıda sözü edilen bu göstergeler Afşin-Elbistan B Termik Santral çevriminin her bileşeni için farklı güç seviyelerinde hesaplanmıştır.

4.2. Termodinamik Model ve Yazılım

Günümüzde karmaşık sistemlerinin analiz ve modellenmesinde bilgisayar teknolojisinden yararlanmayan mühendislik alanı kalmamıştır denilebilir. Özellikle simülasyon yazılımları sayesinde büyük ve karmaşık sistemleri fiziksel olarak oluşturmadan sistem üzerinde değişiklikler ve analizler yapmak mümkün olmaktadır.

Bugün ticari arenada termodinamik tasarım ve analiz yapabilen çok çeşitli yazılımlar mevcuttur. Çalışmanın hazırlık evresinde bu yazılımlardan Aspen Custom Modeler ve Aspen HSYS, Engineering Equation Solver (EES), Flowmaster, Flownex, Gate Cycle, Thermoflex gibi bir takım yazılımlar incelenmiştir. Yazılımlardan bazılarının lisansının sınırlı süreyle erişilebilir olması, bazılarının akademik sürümlerinin olmaması nedeniyle çalışmada MS Excel platformunda makrolar kullanan ve VBA ile yazılmış kullanıcı fonksiyonlarına sahip olan bir yazılım geliştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali bileşenlerinin enerji ve ekserji tanımları (Bkz Şekil 3.1) [Bejan ve ark., 1996;hesaplamalar]

Bileşen	Giren Enerji (1) $\dot{m}\mathrm{h}$	Çıkan Enerji (2) $\dot{m}\mathrm{h}$	$\dot{W}$ (3)	η	Sağlanan Ekserji (4) $\dot{m}e^{CH+PH}$	Yararlanılan Ekserji (5)	Yıkılan Ekserji (6) $\dot{m}e^{CH+PH} - \dot{W}$	ζ
Kazan	$\dot{\mathrm{E}}_{25} + \dot{\mathrm{E}}_{kömür} + \dot{\mathrm{E}}_{hava} + \dot{\mathrm{E}}_{spray} + \dot{\mathrm{E}}_{28}$	$\dot{\mathrm{E}}_{26} + \dot{\mathrm{E}}_{29}$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}^{CH+PH}_{kömür} + \dot{E}^{CH+PH}_{35} + \dot{E}^{CH+PH}_{spray} - \dot{E}^{CH+PH}_{36}$	$\dot{E}^{CH+PH}_{26} - \dot{E}^{CH+PH}_{25} + \dot{E}^{CH+PH}_{29} - \dot{E}^{CH+PH}_{28}$	$\dot{E}_{25} + \dot{E}_{kömür} + \dot{E}_{hava} + \dot{E}_{spray} + \dot{\mathrm{E}}_{28} - \dot{E}_{26} - \dot{E}_{29} - \dot{E}_{36}$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
YBT	$\dot{\mathrm{E}}_{2\acute{6}}$	$\dot{\mathrm{E}}_{27} + \dot{\mathrm{E}}_{E} + \dot{\mathrm{E}}_{B} + \dot{\mathrm{E}}_{A}$	(1)-(2)	$\eta_s = \frac{h_{2\acute{6}} - h_{27}}{h_{2\acute{6}} - h_{27s}}$	$\dot{E}^{CH+PH}_{2\acute{6}} - \dot{E}^{CH+PH}_{27} - \dot{E}^{CH+PH}_{E} - \dot{E}^{CH+PH}_{B} - \dot{E}^{CH+PH}_{A}$	$\dot{W}$	$(4) - (5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$

Çizelge 4.2 (Devam). Afşin-Elbistan B Termik Santrali bileşenlerinin enerji ve ekserji tanımları (Bkz Şekil 3.1) [Bejan ve ark., 1996;hesaplamalar]

OBT	$\dot{E}_{2'7} + \dot{E}_{29}$	$\dot{E}_{30} + \dot{E}_{1'7} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_A + \dot{E}_C$	(1)-(2)	$\eta_s = \frac{m_{29}h_{29} - m_{21}h_{21} - m_{1'7}h_{1'7} - m_{30}h_{30}}{m_{29}h_{29} - m_{21}h_{21s} - m_{1'7}h_{1'7s} - m_{30}h_{30s}}$	$\dot{E}_{2'7}^{CH+PH} + \dot{E}_{29}^{CH+PH} - \dot{E}_{30}^{CH+PH} - \dot{E}_{1'7}^{CH+PH} - \dot{E}_{21}^{CH+PH} - \dot{E}_A^{CH+PH} - \dot{E}_C^{CH+PH}$	$\dot{W}$	(4) − (5)	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
ABT	$\dot{E}_{30} + \dot{E}_D$	$\dot{E}_{15} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_9 + \dot{E}_5 + \dot{E}_{32} + \dot{E}_A$	(1)-(2)	$\eta_s = \frac{m_{30}h_{30} - m_{32}h_{32} - m_5h_5 - m_9h_9 - m_{12}h_{12} - m_{15}h_{15} - m_Ah_A}{m_{30}h_{30} - m_{32s}h_{32s} - m_5h_{5s} - m_9h_{9s} - m_{12}h_{12s} - m_{15}h_{15s} - m_Ah_{As}}$	$\dot{E}_{30}^{CH+PH} + \dot{E}_D^{CH+PH} - \dot{E}_{15}^{CH+PH} - \dot{E}_{12}^{CH+PH} - \dot{E}_9^{CH+PH} - \dot{E}_5^{CH+PH} - \dot{E}_{32}^{CH+PH} - \dot{E}_A^{CH+PH}$	$\dot{W}$	(4) − (5)	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
BFPT	$\dot{E}_{31} + \dot{E}_F$	$\dot{E}_{33} + \dot{E}_K + \dot{E}_A$	(1)-(2)	$\eta_s = \frac{m_{31}h_{31} - m_{33}h_{33}}{m_{31}h_{31} - m_{33}h_{33s}}$	$\dot{E}_{31}^{CH+PH} + \dot{E}_F^{CH+PH} - \dot{E}_{33}^{CH+PH} - \dot{E}_K^{CH+PH} - \dot{E}_A^{CH+PH}$	$\dot{W}$	(4) − (5)	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
Kondenser	$\dot{E}_{34} + \dot{E}_M + \dot{E}_{cw}$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_{hw}$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}_{34}^{CH+PH} + \dot{E}_M^{CH+PH} + \dot{E}_{cw}^{CH+PH}$	$\dot{E}_1^{CH+PH} + \dot{E}_{hw}^{CH+PH}$	(4) − (5)	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$

Çizelge 4.2 (Devam). Afşin-Elbistan B Termik Santrali bileşenlerinin enerji ve ekserji tanımları (Bkz Şekil 3.1) [Bejan ve ark., 1996;hesaplamalar]

1 numaralı ısıtıcı	$\dot{E}_3 + \dot{E}_4 + \dot{E}_5 + \dot{E}_7$	$\dot{E}_{6'} + \dot{E}_8$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}_4^{CH+PH} + \dot{E}_5^{CH+PH} + \dot{E}_7^{CH+PH} - \dot{E}_8^{CH+PH}$	$+\dot{E}_{6'}^{CH+PH} - \dot{E}_3^{CH+PH}$	$(4)-(5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
2,3 veya 6 numaralı ısıtıcı	$\dot{E}_{20} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_{23}$	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{18}$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}_{21}^{CH+PH} + \dot{E}_{23}^{CH+PH} - \dot{E}_{18}^{CH+PH}$	$\dot{E}_{22}^{CH+PH} - \dot{E}_{20}^{CH+PH}$	$(4)-(5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
4 veya 7 numaralı ısıtıcı	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{24}$	$\dot{E}_{23} + \dot{E}_{25}$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}_{24}^{CH+PH} - \dot{E}_{23}^{CH+PH}$	$\dot{E}_{25}^{CH+PH} - \dot{E}_{22}^{CH+PH}$	$(4)-(5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
Dearatör	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{17} + \dot{E}_{18}$	$\dot{E}_{19}$	-	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{E}_{16}^{CH+PH} + \dot{E}_{17}^{CH+PH} + \dot{E}_{18}^{CH+PH}$	$\dot{E}_{19}^{CH+PH}$	$(4)-(5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$
Kondenser, booster veya drenaj pompaları	$\dot{E}_1 + \dot{W}$	$\dot{E}_2$	(1)-(2)	$\eta = \frac{(2)}{(1)}$	$\dot{W}$	$\dot{E}_2^{CH+PH} - \dot{E}_1^{CH+PH}$	$(4)-(5)$	$\zeta = \frac{(5)}{(4)}$

Afşin-Elbistan B Termik santralinin farklı güç seviyelerindeki ısı denge diagramları geliştirilen yazılımda oluşturularak santral modellenmiştir. Program; *Alt-Üst Isıl Değer Hesapları, Kazan Havası ve Yanma, Tasarımsal Isı Denge Diagramları (farklı güç seviyeleri için), Gerçek Veri (DCS'den alınan) ve Ekonomik Analiz* modüllerinden meydana gelmektedir. Suyun termofiziksel özellikleri, MS Excel makroları tarafından, International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997 (IAPWS IF-97) standartlarına göre hesaplanmaktadır. IAPWS IF-97 standartları su ve buharın 0-1000 bar ile 0-2000°C aralığında son derece güvenilir sonuçlar vermektedir. Hesaplanan termofiziksel özellikler arasında sıcaklık, basınç, entalpi, spesifik hacim, yoğunluk, spesifik entropi, spesifik iç enerji, spesifik izobarik ısı kapasitesi, spesifik izokorik ısı kapasitesi, ses hızı, viskozite ve buhar kalitesi sayılabilir.

4.2.1. Programın modülleri

Dokuz modülden oluşan programın her bir modülünün özellikleri bu bölümde açıklanmaktadır.

Alt-üst ısıl değer hesapları

Bu modül, bir laboratuarda kimyasal komposizyonu belirlenmiş olan kömürün kuru, külsüz ve kuru-külsüz hali için karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen ve sülfürün kütlece ağırlıklarını, kmol/kg, ASTM D 5865 standardına göre alt-üst ısıl değerlerini, Eş. 4.15-Eş. 4.18 ve Eş. 4.20-Eş. 4.22 sonuçlarını hesaplamakta ayrıca Çizelge 4.1'de verilen tabloyu içermektedir.

Kazan havası ve yanma

Yanma havası ve ürünlerinin konsantrasyonları santralin performans testlerinden alınan verilere dayanmaktadır. Yanma havası ve gaz halindeki ürünlerin termofiziksel özelliklerinden molar ve kütlesel entalpi, entropileri

ampirik sonuçlara göre hesaplanmaktadır [Bejan ve ark., 1996]. Fiziksel ekserji, molar kütle ağırlıklarını kullanarak Eş. 4.9'a göre kullanıcı tarafından oluşturulmuş VBA kodu ile hesaplanmaktadır. Kimyasal ekserji ise yine kullanıcı tarafından oluşturulmuş VBA kodu ile Eş. 4.12'ye göre santralin ekserji analizlerinde JAM esas alınarak hesaplanmaktadır.

Tasarımsal ısı denge diagramları

Isı denge diagramında yer alan her bileşenin giriş-çıkış kütle debileri, basınç ve sıcaklık değerleri bu modülde yer almaktadır. Bunları girdi olarak kabul eden modül; entalpi, entropi, fiziksel ve kimyasal ekserji, gerçek iş, tersinir iş, enerji ve ekserji verimi, izentropik verim, ekserji yıkımı, y_D ve y_D^*, özgül ısı sarfiyatı, verimlerdeki belirsizlik analizi, her noktaya ilişkin termoekonomik parametreler gibi bir dizi çıktı üretmektedir. Söz konusu modül jenerik bir yapıda olmayıp gland buhar sistemine varıncaya kadar tümüyle Afşin-Elbistan B termik santralına özgü olarak hazırlanmıştır.

Gerçek veri

Gerçek veri, Bölüm 3.2.3'te bahsedilen verileri santralin DCS'sinden her üç dakikada bir defa olmak üzere 24 saatlik veri toplamaktadır. Bu verileri tekrarlamak gerekirse; basınç, sıcaklık, kütlesel debi, değirmenlere gelen toplam kömür miktarı, generatör yükü, CO_2 ve O_2 konsantrasyonu, pompa akım büyüklükleridir.

Ekonomik analiz

Ekonomik analiz modülü; santralin kurulu gücü, ünite sayısı, iç tüketim oranı, teorik ve gerçek yıllık çalışma süresi, mühendislik satın alma, iş sahibi maliyetleri, kullanılan kredi miktarı, faiz, indirgenme oranı, geri ödeme süresi, 2005 yılından bu yana gerçek yakıt, bakım ve işletme giderlerini girdi olarak değerlendirip bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyetini

hesaplamaktadır. Bu değer tasarımsal ısı denge diagramları üzerinde yapılan termoekonomik analize sınır şartı sağlamaktadır.

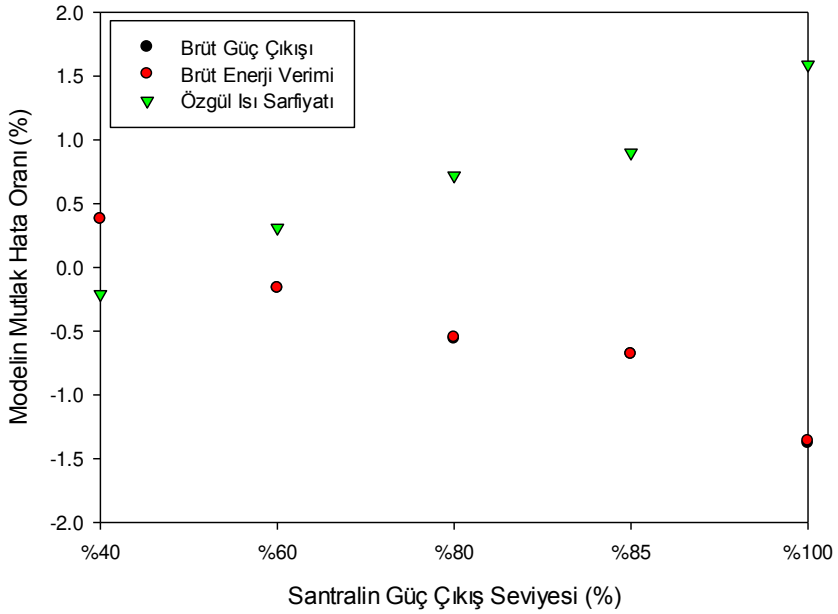
4.2.2. Modelin kıyaslanması (benchmarking)

Hazırlanan programın santralin gerçek bir modelini oluşturması son derece önemlidir. Bu nedenle programın tasarıma ait tipik çıktılarla karşılaştırılması gerekmektedir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1 programdan elde edilen brüt çıkış gücü, brüt verim ve özgül ısı sarfiyatının tasarım değerlerine ilişkin bir karşılaştırma sağlamaktadır.

Çizelge 4.3. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin hazırlanan modelinin temel tasarım değerleri ile karşılaştırılması

Çıkış Gücü (%)	Çıkış Gücü (kW)			Brüt Verim (%)			Özgül Isı Sarfiyatı (kJ/kWh)		
	Tasarım	Model	Mutlak Hata (%)	Tasarım	Model	Mutlak Hata (%)	Tasarım	Model	Mutlak Hata (%)
%100	360 000	355 044	-1,38	38,94	38,41	-1,36	7884	8009	1,59
%85	306 000	303 909	-0,68	38,33	38,07	-0,68	7962	8033	0,90
%80	288 000	286 382	-0,56	38,12	37,91	-0,55	7984	8041	0,72
%60	216 000	215 647	-0,16	36,65	36,59	-0,16	8139	8165	0,31
%40	144 000	144 546	0,38	34,18	34,31	0,38	8490	8472	-0,21

Çizelge 4.3 incelendiğinde karşılaştırılan tüm parametreler için mutlak hata aralığının -%1,38 ile %1,59 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. En fazla hata %1,59 ile tam güç seviyesinde özgül ısı sarfiyatında gerçekleşirken, en az hataya ise -%0,16 ile santralin brüt çıkış gücü ve brüt veriminde %60 güç seviyesinde karşılaşılmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi modelin brüt güç çıkışı ve brüt enerji verimindeki mutlak hata, santralin brüt çıkış gücü seviyesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Buna karşın, özgül ısı sarfiyatındaki hata oranı santralin brüt çıkış gücü seviyesi ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir.



Şekil 4.1. Oluşturulan yazılımın santralin farklı güç çıkış seviyelerine göre tasarım değerleri ile karşılaştırması

4.3. Kabuller ve Sınır Şartları

Ekserji analizi başlığı altında yer alan kabul ve sınır şartlarının ilgili alt bölümlerde açıklanmasına rağmen bazı ek varsayımlar ve şartlar bu bölümde özetlenmektedir.

Herşeyden önce yapılan tüm analizlerde ölü hal koşulu T_0 sıcaklığı 25 °C ve P_0 basıncı ise 1 atmosfer olarak kabul edilmektedir. JAM gibi bazı modellerde basınç 1,019 atmosfer olarak alınmış olsa da aradaki fark ihmal edilmektedir. Diğer taraftan santralin sınırları kontrol hacmi olarak alındığında bu sınırdan içeri giren kömür, ölü hal koşullarında olduğundan fiziksel ekserjisi sıfır olarak alınmaktadır. Benzer biçimde taze hava fanları ile alınan yanma havasının koşulları da ölü hal koşullarında olduğundan hem fiziksel hem de kimyasal ekserjisi sıfır olarak alınmaktadır. Kömürün kimyasal ekserji hesabında JAM ve SMSM yöntemlerinde kullanılan reaksiyon (Eş. 4.13) tam yanma kabulüne dayanmaktadır.

Yapılan analizlerde literatürde de sıkça karşılaşıldığı gibi çevrimde dolaşan su-buhar sisteminde veya yanma havası akışında toplam enerji terimlerindeki potansiyel ve kinetik enerji terimleri dikkate alınmamıştır. İncelenen temel ekipmanlar haricindeki boru, vana, ejektör gibi çeşitli elamanlardaki enerji ve ekserji kayıpları ihmal edilmiştir.

Üretici tarafından sağlanan tasarımsal ısı denge diagramları ve koşullarının doğru olduğu ve tüm değişikliklerin yansıtıldığı öngörülmektedir. Buna göre santralin %40 güç seviyesinin altındaki çalışma koşulları dikkate alınmamıştır.

Termodinamik model ve programın santrali belirli bir yanılgı payıyla simüle edebildiği ve bu payın da bu ölçekteki bir santral için kabul edilebilir olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca termodinamiğe esas tüm hesaplar brüt elektrik üretiminden yapılmıştır zira santral buhar tahrikli bir türbin pompası ile çalışmaktadır. Termodinamik çevrimin doğrudan bir parçası olmayan yardımcı tesislerdeki iç tüketim termodinamik analizlerde dikkate alınmamıştır.

4.4. Sonuçlar

Santral tasarımda kullanılan kömürün kimyasal ekserji analizi, santralin enerji ve ekserji analizi ile sonuçların literatürdeki bulgularla karşılaştırılması aşağıdaki alt bölümlerde verilmektedir.

4.4.1. Kömürün kimyasal ekserji analizi sonuçları

4.1.2 bölümünde kömürün kimyasal ekserjisi başlığı altında bu alanda pek çok model ve yöntemin bulunduğu ifade edilmişti. Literatür taramasında gösterildiği gibi bu alanda yapılan çalışmaların her biri farklı bir modeli ve

yöntemi baz almakta hiçbiri bunlar arasındaki farkı veya hangisinin neden tercih edildiğini açıklamamaktadır.

Afşin-Elbistan B Termik Santralinin tasarım kömürünün kimyasal ekserjisi, alt ve üst ısıl değerleri, dördüncü bölümde açıklanan model ve yöntemlere göre hesaplandığında Çizelge 4.4 elde edilmektedir. Çizelge 4.4'e dikkat edildiğinde tüm değerlerin her yöntemle hesaplanamadığı görülmektedir. Dört yöntemin Afşin-Elbistan kömürünün kimyasal ekserjisi için ortalama değeri 7088 kJ/kg'dır.

Çizelge 4.4. Afşin-Elbistan tasarım kömürünün farklı model ve yöntemlere göre kimyasal ekserjisi, alt-üst ısıl değerleri

Yöntem	**Kimyasal Ekserji (kJ/kg)**	**Alt Isıl Değer-LHV (kJ/kg)**	**Üst Isıl Değer-HHV (kJ/kg)**
JAM (Orijinal Kömür)	7 115	-	-
SMSM (Orijinal Kömür)	7 234	-	-
JAM DAF	25 308	-	-
SMSM DAF	25 641	-	-
Eş. 4.16	-	-	24 085
SSM (Orijinal Kömür)	6 792	-	-
GCM (Orijinal Kömür)	7 210	-	-
ASTM D 5865 (Orijinal Kömür)	-	4 815	6 258

Kömür akışının santralin farklı güç seviyelerine (Bkz Çizelge 3.7) göre değişmesi nedeniyle santrale giren kimyasal ekserji miktarı da değişecektir.

144-362,7 MW çıkış gücüne göre değişen ekserji girdi tablosu Çizelge 4.5'de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin belli başlı güç seviyelerinde farklı model ve yöntemlere göre belirlenen kimyasal ekserji girdisi

Ekserji Çıkışı (kW)		**362 700 MCR (100.75%)**	**360 000 GCC (100%)**	**306 000 %85**	**288 000 %80**	**216 000 %60**	**144 000 %40**
Ekserji Girdisi (kW)	JAM	1 374 717	1 366 179	1 179 752	1 116 424	870 939	622 607
	SMSM	1 397 552	1 388 872	1 199 348	1 134 969	885 406	632 949
	SSM	1 312 235	1 304 085	1 126 132	1 065 682	831 354	594 309
	GCM	1 392 961	1 384 309	1 195 409	1 131 240	882 497	630 870
	ASTM D 5865	1 228 443	1 220 813	1 054 223	997 633	778 268	556 360

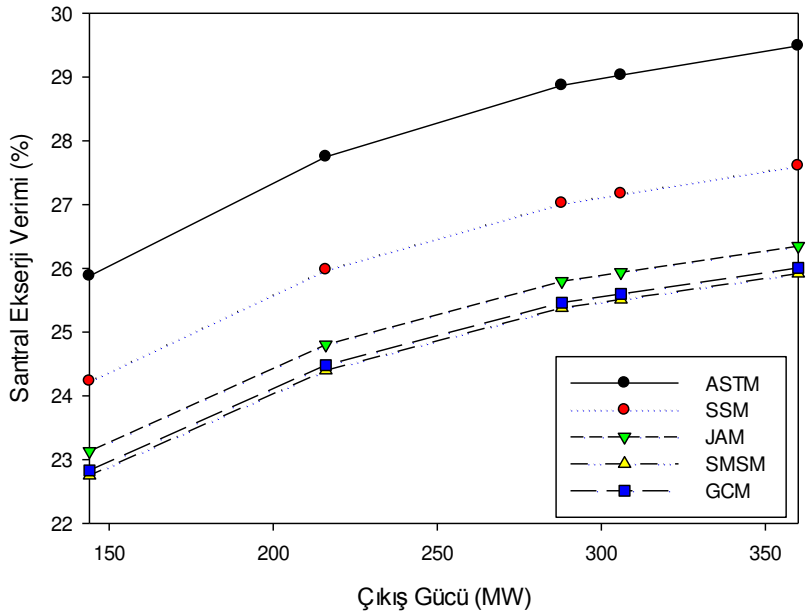
Çizelge 4.5'deki verilerin yardımıyla kimyasal ekserji terimi her model ve yöntem için hesaplanabildiğinden buna karşılık gelen ekserji verimleri de hesaplanabilmektedir. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.2 santralin çeşitli çıkış güç seviyelerindeki ekserji verimini göstermektedir.

Çizelge 4.6. Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çeşitli model ve yöntemlere göre hesaplanan farklı güç seviyelerindeki ekserji verimi (%)

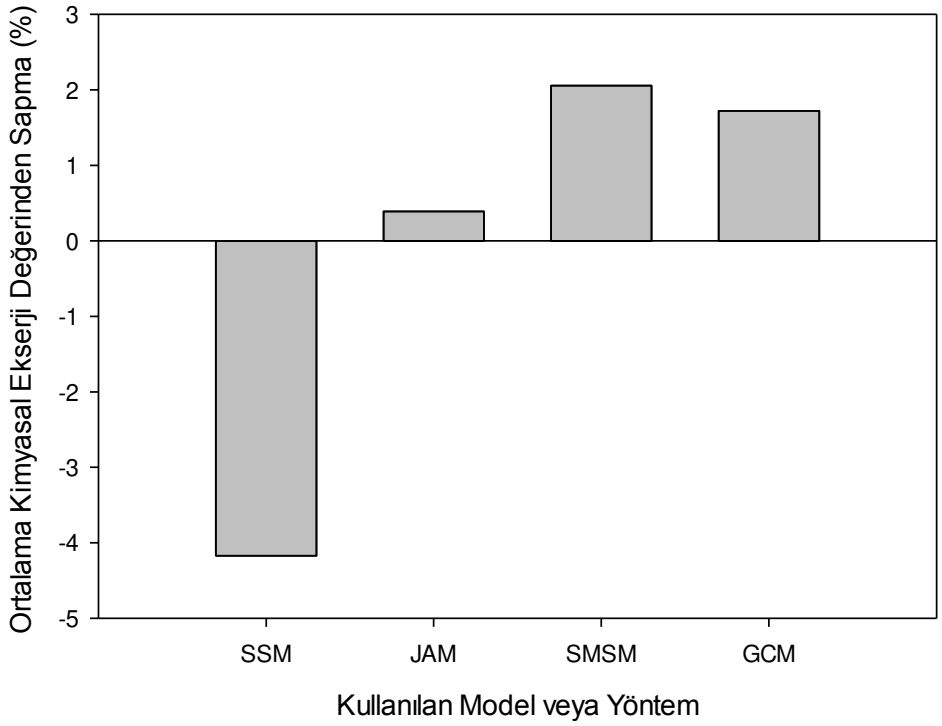
Ekserji Verimi	**362 700 (kW) MCR**	**360 000 (kW) GCC**	**306 000 (kW) %85**	**288 000 (kW) %80**	**216 000 (kW) %60**	**144 000 (kW) %40**
ASTM	29,52	29,49	29,02	28,87	27,75	25,88
SSM	27,64	27,60	27,17	27,02	25,98	24,23
JAM	26,38	26,35	25,94	25,80	24,80	23,12
SMSM	25,95	25,92	25,55	25,37	24,39	22,75
GCM	26,04	26,00	25,60	25,46	24,48	22,82
Ortalama	26,50	26,47	26,05	25,94	24,91	23,23

Şekil 4.2'den de görüleceği gibi model ve yöntemlerden bağımsız olarak santralin ekserji verimi çıkış gücüne göre parabolik bir eğilim içerisindedir. En düşük ekserji verim eğilimi SMSM ile görülürken en yüksek ekserji verimini ASTM tayin etmektedir. Bunun nedeni endüstriyel bir standart olan ASTM D 5865'in kimyasal ekserji hesaplamamasıdır. Santralin ekserji verimi ASTM yöntemine göre hesaplanırken literatürde sıklıkla karşılaşılan üst ısıl değerin kimyasal ekseri olarak kabul edildiği yaklaşımdan yararlanılmıştır. Buna göre ASTM standardı Çizelge 4.5'den de görüldüğü gibi en düşük kimyasal ekserji girdisini verdiğinden Eş. 4.2'ye göre en yüksek ekserji verimini sağlamaktadır.

Her kimyasal ekserji modeli ve yöntemi, tasarım kömürün komposizyonuna göre farklı bir değer hesaplamaktadır. Her model veya yöntemin, bu model ve yöntemlerin oluşturduğu ortalamadan ne kadar saptığı araştırıldığında bu aralığın -%4,17 ile +%2,06 değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.3).



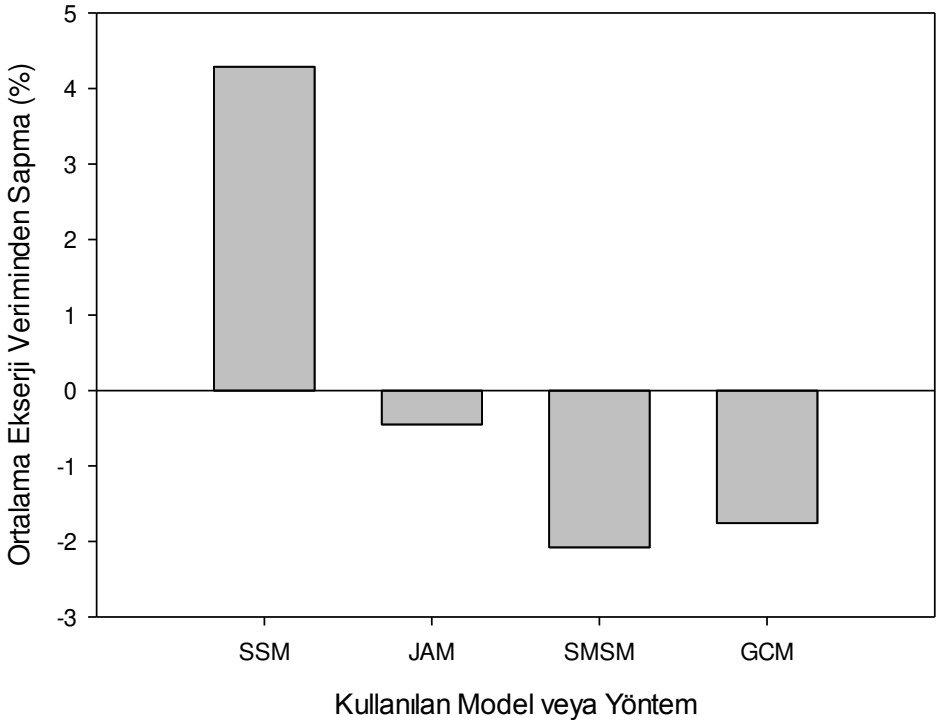
Şekil 4.2. Farklı kimyasal ekserji model ve yöntemlerine göre santralin ekserji verimi



Şekil 4.3 Kullanılan model veya yöntemin ortalama kimyasal ekserji değerinden sapması

Kimyasal ekserji değerleri bu şekilde değişirken bunlara karşılık ekserji verimleri ise -%2,08 ile +%4,29 aralığında değişmektedir (Şekil 4.4). Bunun nedeni hesaplanan kimyasal ekserji değerleri ortalaması ile ekserji verimi ortalamalarının farklı olmasındandır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 seçilen model veya yöntemin bir santralin ekserji veriminde ne kadar etkiliği olduğunu ispat etmektedir. Açıklanan model ve yöntemlerin birbirlerine üstünlüklerinden bahsetmek mümkün olmasa da JAM'in ortalamalardan en az sapan yöntem olması dikkat çekicidir.

Bilgen ve Kaygusuz, Afşin-Elbistan kömürü hariç Türkiye'de 32 bölgeye ait tersiyer kömürün, dördüncü bölümde açıklanan JAM ve Eş. 4.16 ile, üst ısıl değerlerini, kuru ve külsüz spesifik kimyasal ekserjilerini, orijinal kömürün kimyasal ekserjilerini ortalama değerleri sırasıyla 26 110, 26 691 ve 14 085 kJ/kg olarak hesaplamışlardır. Bu termofiziksel özelliklerin medyan değerleri



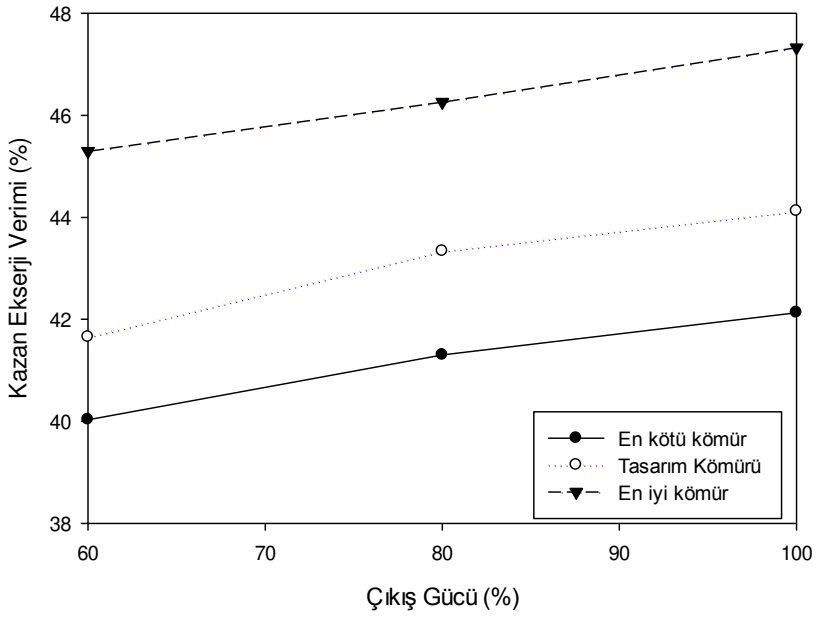
Şekil 4.4. Kullanılan model veya yöntemin ortalama ekserji veriminden sapması

yine sırasıyla 26 098, 26 932 ve 14 436 kJ/kg olarak bulunmuştur. Çizelge 4.4'de verilen değerler bu sonuçlarla karşılaştırıldığında, Afşin-Elbistan B Termik Santrali tasarım kömürünün Eş. 4.16 ile hesaplanan üst ısıl değeri Türkiye ortalamasından %7,7 ve JAM/SMSM ile hesaplanan kuru külsüz kömürün spesifik kimyasal ekserjisi sırasıyla %6,1 ve %5,1 daha düşük olmaktadır. Orijinal kömür için ise sonuçlar daha çarpıcıdır: Afşin-Elbistan B tasarım kömürünün JAM, SMSM, SSM ve GCM ile hesaplanan spesifik kimyasal ekserjileri Türkiye ortalamasından sırasıyla %49,5; %48,6; %51,8 ve %48,8 daha düşüktür. Tüm yöntemlerin ortalaması olan 7088 kJ/kg spesifik kimyasal ekserji değeri 7065 kJ/kg kimyasal ekserjiye sahip olan Muğla-Milas-Çakıralan bölgesinden [Bilgen ve Kaygusuz, 2008] bir basamak yukarıda *sondan ikinci sıradadır*.

Kömür kalitesinin kazan ekserji verimine etkisi

Afşin-Elbistan yöresine ait linyit, 3.2.2 başlığı altında da belirtildiği üzere kalite bakımından oldukça düşük profile sahip bir kömürdür. Santralin kazanı belirli bir aralıktaki kömürü yakacak biçimde tasarlanmıştır. Bununla beraber, "En iyi" ve "en kötü" olarak nitelendirilen kömür kazanda yakıldığında ekserji verimi Şekil 4.5'de görüldüğü gibi değişmektedir. Buna göre kazanın ekserji verimi % 40,03 ile % 47,33 arasında değişmekte ve en iyi kömür ile en kötü kömür arasındaki ekserji verimi farkı %18,23'ü bulmaktadır.

Kazanda yakılan kömürün kimyasal ekserjisini, kazanın ekserji verimi ile birleştirecek bir performans endeksi tanımlanması, söz konusu kazanın bu alandaki nispi performansını ortaya koymada bir parametre olarak kullanılabilir. Bilgen ve Kaygusuz'un Türkiye'deki tersiyer kömürler arasında JAM'e göre belirlediği en yüksek kimyasal ekserjiye sahip kömürü 21 637,79 kJ/kg ile Manisa-Soma-Kısrakdere kömürüdür [Bilgen ve Kaygusuz, 2008].



Şekil 4.5. Santralin çıkış gücüne bağlı olarak en iyi, en kötü ve tasarım kömürünün kazan ekserji verimine etkisi

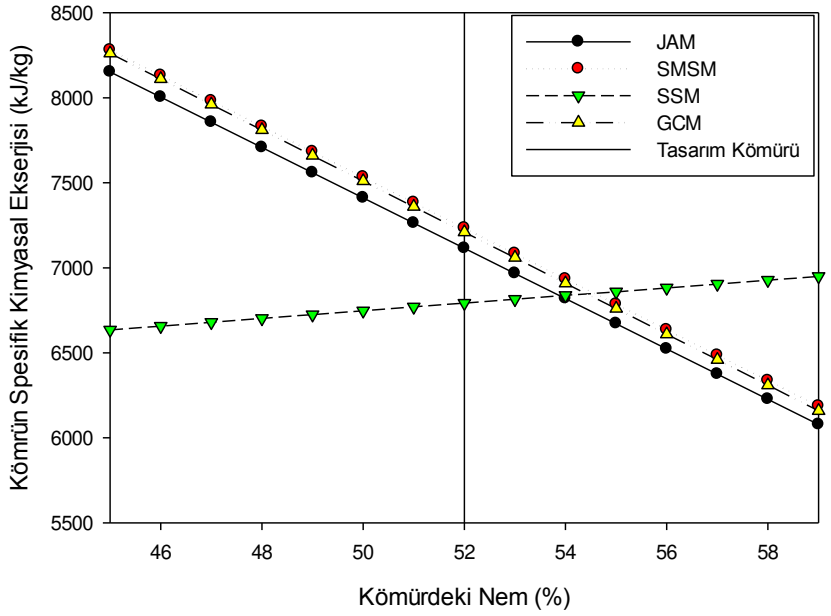
Kazanda yakılacak olan kömür bu kömüre göre normalize edilecek olursa en kötü, tasarım ve en iyi kömür için oluşturulan kimyasal ekserji endeksleri sırasıyla $I^{CH}_{en\ kötü} = 0{,}2784,\quad I^{CH}_{tasarım} = 0{,}3288,\quad I^{CH}_{en\ iyi} = 0{,}4056$ olarak belirlenmektedir. Her durum için belirlenen kazan ekserji verimini kimyasal ekserji endeksine bölerek birleştirilen bu ifadeden Çizelge 4.7'de verilen Kazan Performans Göstergesi (KPG) elde edilmektedir.

Çizelge 4.7. Santralin farklı çıkış güçlerinde kömür kalitesine göre elde edilen kazan performans göstergeleri

KPG ($\frac{\zeta_{kazan}}{I_{kömür}}$) / Çıkış Gücü (%)	En Kötü Kömür	Tasarım Kömürü	En İyi Kömür
100	1,5132	1,3419	1,1668
80	1,4835	1,3181	1,1405
60	1,4475	1,2667	1,1168

KPG, kazanda yakılan kömürün kimyasal ekserjisini, kazanın ne kadar başarılı bir biçimde kullanabildiğinin bir ölçüsüdür. Bu göstergeye göre kazan en kötü kömürü daha başarılı bir biçimde yakmaktadır zira en iyi kömürü yakarken istenilen ekserji verimine ulaşamamaktadır. Bu açıdan bakıldığında örneğin, %100 çıkış gücünde kazanın kötü kömürde yakaladığı performansı sürdürebilmesi için %61,37 ekserji verimine sahip olması gerekirdi. Kimyasal ekserji endeksi kullanılırken ülkedeki en iyi kömürün baz alındığına dikkat edilmelidir. Bunun nedeni, linyit yakıtlı santrallerin olabilecek en iyi kömürü kullanabilme şansını yakaladığı durumla karşılaştırma yapabilmek amacıyla bir referans noktası oluşturma ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

Kömürün kalitesini belirlemede öneme sahip diğer etmenlerden biri de içerdiği nem miktarıdır. Kazanın yakacağı tasarıma esas kömürün nem oranı %52'dir. Kömürünü içerdiği nem oranının değişimi ile birlikte kimyasal ekserjisinin nasıl değiştiği JAM, SMSM, SSM ve GCM'ye göre araştırılmıştır.



Şekil 4.6. İçerdiği neme göre kömürün spesifik kimyasal ekserjisinin farklı model ve yöntemlere göre değişimi

Bu araştırma yapılırken oluşturulan hayali kömürün içerdiği elementler orijinal kömüre göre ölçeklenerek kütlece yüzdeleri yeniden oluşturulmuştur. Bir başka deyişle, örneğin, %52 nem oranı yerine %53 nem oranında olan tasarım kömür komposizyonu içerisindeki elementlerin kütlesel oranları 0,979 oranında azalacaktır. Kömürdeki neme bağlı olarak bu yöntemle hesaplanan spesifik ekserji değişimi Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

SSM'deki hafif artış eğilimi hariç tüm yöntemler kömürün spesifik kimyasal ekserjisinin artan nem ile birlikte azalacağını öngörmektedir. Her ikisi arasındaki ilişki tüm yöntemler için doğrusaldır. JAM'e göre yapılan hesapta nem oranındaki her %1'lik azalmaya karşın kömürün kimyasal ekserjisinin %1,083 oranında arttığı görülmektedir.

4.4.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali enerji ve ekserji analizi sonuçları

Santral çevriminin enerji verimi Eş. 4.11'e tanımlanmıştı. Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7 santralin farklı güç seviyelerindeki brüt enerji verimini göstermektedir. Buna göre enerji verimi 144-288 MW aralığında doğrusal bir seyir izlerken daha yüksek güç çıkışlarında yine doğrusal fakat daha düşük bir eğime sahip görünmektedir.

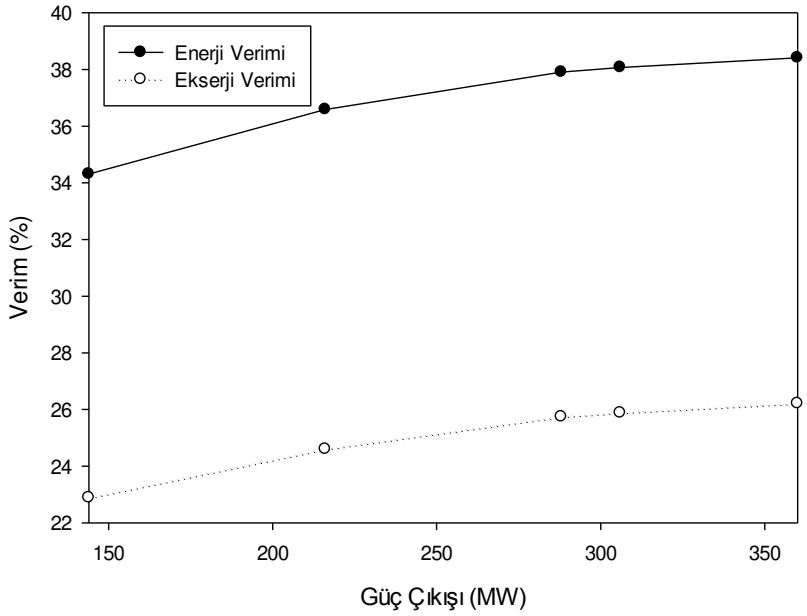
Çizelge 4.8. Tasarım kömürüne göre santralin farklı çıkış güçlerindeki brüt enerji verimi

Brüt Çıkış Gücü (kW)	**MCR (100.75%) 362 700**	**GCC (100%) 360 000**	**%85 306 000**	**%80 288 000**	**%60 216 000**	**%40 144 000**
Enerji Girdisi (kW)	930 223	924 445	798 297	755 445	589 334	421 297
Brüt Enerji Verimi (%)	38,99	38,94	38,33	38,12	36,65	34,18

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7 incelendiğinde santrale gereken yakıt miktarının farklı güç seviyelerine göre doğrusal olarak değişmediği görülmektedir. Örneğin, tam güç seviyesi olan 360 MW'tan, %85 güç seviyesi olan 306 MW'a düşüldüğünde gerekli kömür miktarı 163,2 kg/s değil 165,8 kg/s, bir başka deyişle, enerji girdisi 785 778 kW yerine 798 297 kW olmaktadır. Bu nedenle enerji verimi doğrusal değişmemekte daha hızlı bir düşüş sergilemektedir.

Santral, termodinamiğin birinci kanunu ışığında incelendiğinde güç seviyesinden bağımsız olarak kondenser her zaman için enerji kaybının en

fazla gerçekleştiği bileşen olmaktadır. Kondenseri baca gazı ve kazan izlemektedir. Isıtıcıların büyük bir bölümü, BFPT ve LUVO'nun enerji kaybın-



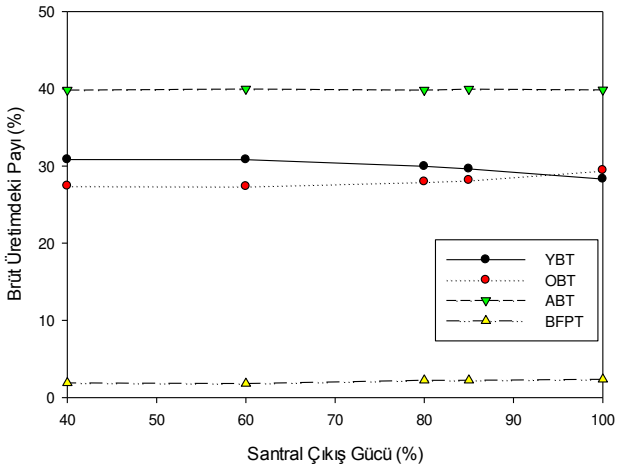
Şekil 4.7. Santralin güç çıkışına karşı enerji veriminin değişimi

daki payı bu kayıplar yanında genelde küçük kalmaktadır. Isıtıcılar arasında alçak basınç ısıtıcıları enerji kaybı açısından daha önemli bir yer tutmaktadır. Kömürle sağlanan enerjinin geri kalanı YBT, OBT ve ABT'de elektriğe dönüştürülür. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi azalan güç çıkışıyla türbinlerin elektrik üretimi genel olarak azalırken, kazan ve baca gazı ile oluşan kayıp artmakta, kondenserden olan kayıp genel olarak azalmaktadır. Sonuç olarak azalan güç seviyesiyle birlikte santralin ve bileşenlerinin birinci kanun verimi düşmektedir.

Santralde güç üreten bileşenlerin toplam güç üretimindeki payları ayrıca incelemeye değerdir. Santralde güç üreten bileşenler YBT, OBT, ABT ve BFPT'dir. Bu bileşenlerin toplam üretilen brüt güç içerisindeki payları Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.9. Santrale gelen kömürün enerjisinin başlıca termodinamik bileşenlerindeki kaybı veya enerjiye dönüşme oranı (%)

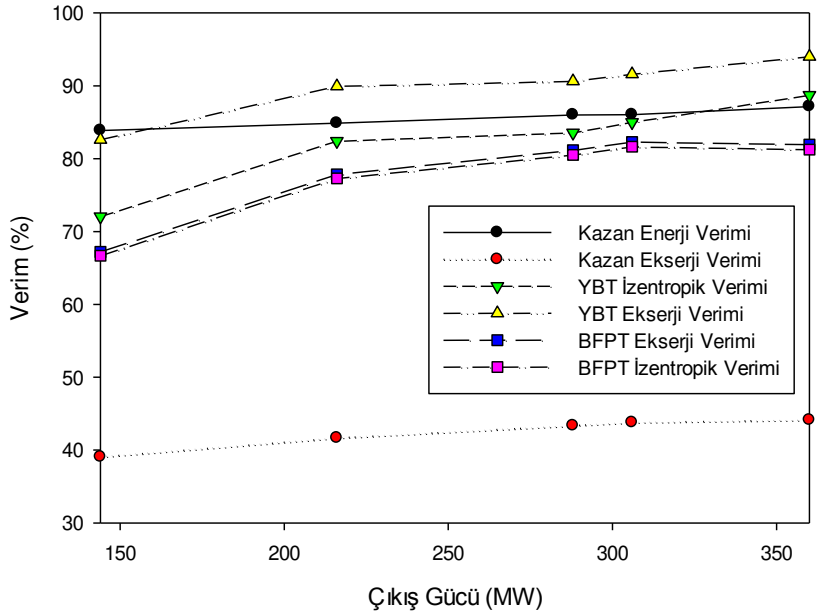
Bileşen	**Çıkış Gücü Seviyesi (%)**				
	100	**85**	**80**	**60**	**40**
Kazan & Baca Gazı	14,29	14,74	15,58	17,43	20,53
YBT	10,79	11,26	11,38	11,16	10,21
OBT	11,22	10,71	10,62	9,90	9,08
ABT	15,20	15,20	15,13	14,47	13,19
BFPT	0,90	0,85	0,85	0,66	0,63
Kondenser	46,36	45,76	44,90	44,30	44,83
Isıtıcı 1	1,08	0,94	1,38	0,94	1,36
Isıtıcı 2	0,04	0,02	0,02	1,02	$4,40 \times 10^{-3}$
Isıtıcı 3	$4,27 \times 10^{-3}$	$2,61 \times 10^{-3}$	$5,51 \times 10^{-3}$	$5,30 \times 10^{-3}$	$4,85 \times 10^{-3}$
Isıtıcı 4	$2,55 \times 10^{-3}$	$4,11 \times 10^{-3}$	$5,14 \times 10^{-3}$	$2,84 \times 10^{-3}$	$7,53 \times 10^{-3}$
Dearatör	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04
Isıtıcı 6	$1,83 \times 10^{-3}$	$8,74 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-3}$	$5,62 \times 10^{-4}$	$3,01 \times 10^{-3}$
Isıtıcı 7	$3,12 \times 10^{-3}$	0,04	$6,46 \times 10^{-3}$	$3,30 \times 10^{-3}$	0,04
LUVO	0,05	0,41	0,09	0,06	0,08



Şekil 4.8. Güç üreten bileşenlerin santralin çeşitli çıkış gücü seviyelerinde brüt güç üretimindeki payları

Şekilde görüldüğü gibi ABT ve BFPT'nin brüt enerji üretimideki payı santralin çıkış gücüne göre neredeyse değişmezken OBT ve YBT'nin aldığı paylar değişmektedir. Santralin çıkış gücü yaklaşık olarak %95 seviyesine ulaşınca OBT'nin üretimdeki payı YBT'yi geçmektedir. Ancak her ikisinin ortalama payı %30'lar civarındadır. Tüm çıkış gücü seviyelerinde ABT her zaman için en yüksek paya sahiptir.

Çizelge 4.9'da yer alan termodinamik bileşenler haricindekiler enerji analizi açısından çok az bir öneme sahip görünmektedir. Diğer taraftan kazan, yüksek basınç türbini ve buhar tahrikli besi suyu pompası (BFPT) enerji ve ekserji verimleri açısından incelendiğinde kazanın enerji ve ekserji verimleri arasındaki farkın oldukça yüksek olduğu, buna karşın YBT ve BFPT'nin enerji ve ekserji verimlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 4.9). Tüm çıkış gücü seviyelerinde YBT ve BFPT'nin ekserji verimleri izentropik veriminden yüksektir. Genel olarak enerji ve ekserji verimleri arasındaki fark açıldıkça söz konusu bileşende ekserji yıkımının arttığı söylenebilir.

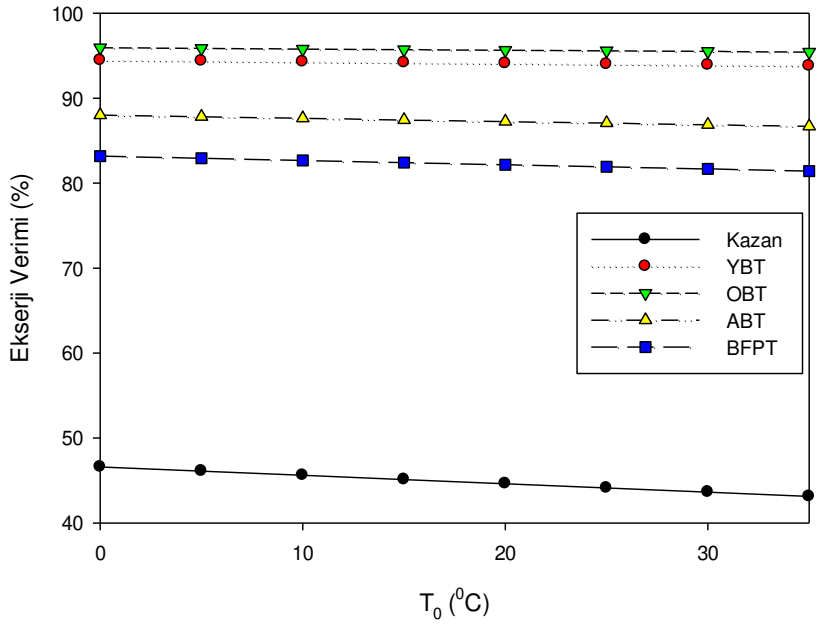


Şekil 4.9. Kazan, YBT ve BFPT'nin santralin farklı çıkış güçlerine göre enerji ve ekserji verimleri

Bölüm 4.1.3'te santrale sağlanan ekserjinin bileşenlerde nasıl harcandığına ve her bileşendeki ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımında ne kadarlık bir yer tuttuğunu gösteren y_D ve y_D^* göstergelerinden bahsedilmişti. Literatürde yapılan çalışmalardan da bilindiği üzere her iki göstergede en büyük paya sahip olan kazandır. Çizelge 4.10 bu iki göstergenin kazan YBT, OBT, ABT, BFPT ve kondenser için çıkış gücüne bağlı değişimini göstermektedir. Sisteme sağlanan ekserjinin (y_D) yarısından fazlası kazan, kondenser, ABT, YBT ve OBT'de harcanmaktadır. Bir bileşendeki ekserji yıkımının toplam ekserji yıkımındaki payı (y_D^*) düşünüldüğünde tüm çıkış gücü seviyelerinde kazan için bu oran %70'den fazla olmaktadır. Bir başka deyişle kazan, sistemde gerçekleşen toplam ekserji yıkımının %70'inin fazlasından sorumludur. Kazanı; kondenser, ABT, YBT ve OBT izlemektedir. Her iki göstergede en büyük paya sahip olan kazanın bu parametrelerinin santralin çıkış gücüne bağlı değişimi yine Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. Beklenildiği gibi her iki göstergenin de santralin çıkış gücü ile ters orantılı olarak değiştiği söylenebilir.

Ölü hal koşullarının ekserji verimi üzerindeki etkisi

Bölüm 4.1.2'de fiziksel ekserji kavramı altında sözü edilen ölü hal koşullarının özellikle T_0 sıcaklığının ekserji verimine olan etkisi benzer analizlerde üzerinde durulan önemli noktalar arasındadır. Şekil 4.10 santralin belli başlı bazı bileşenleri için GCC çıkış gücündeki ekserji verimlerinin T_0 ölü hal sıcaklığıyla olan değişimini göstermektedir.

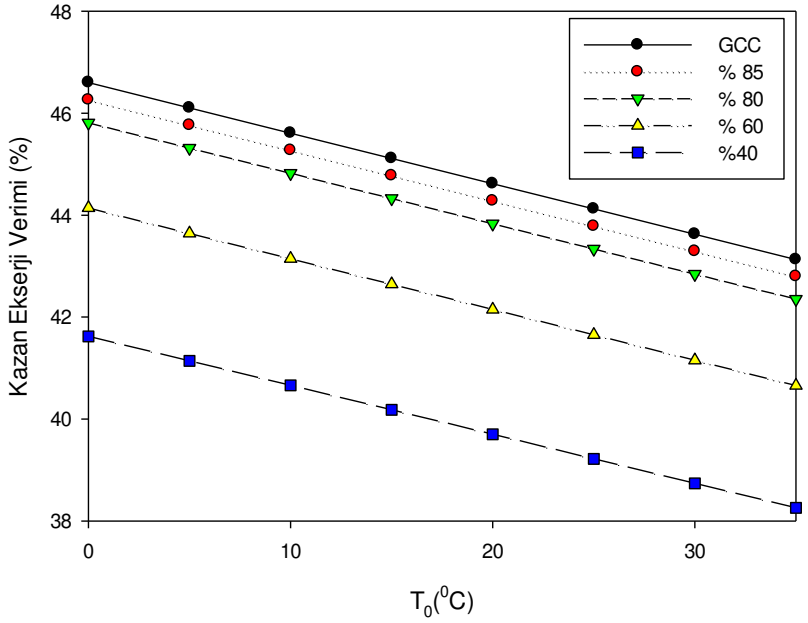


Şekil 4.10. Belli bazı bileşenlerin ekserji verimlerinin GCC çıkış gücünde T_0 referans sıcaklığı ile değişimi

Sıcaklığa en hassas bileşenin kazan olduğu dikkat çekmektedir ancak değişim neredeyse tüm bileşenler için çok hafif bir eğime sahiptir. Sıcaklıkla olan bu değişim literatürde gösterilen pek çok analize [Kopaç ve Hilalci, 2006; Acır ve ark., 2011; Ameri ve ark., 2008; Amirabedin ve Yılmazoğlu, 2011] paralellik göstermektedir. Farklı çıkış güçleri için de benzer eğilimler hesaplanmıştır ancak ekserji verimi değerleri çıkış gücü azaldıkça düşmektedir.

Çizelge 4.10. Santralin başlıca bileşenlerinin enerji, izentropik veya ekserji verimleri ile y_D ve y_D^* değerlerinin güç seviyelerine göre değişimi

Bileşen	%100 (GCC)				%85				%80				%60				%40			
	η veya η_s	ζ	y_D (%)	y_D^* (%)	η veya η_s	ζ	y_D (%)	y_D^* (%)	η veya η_s	ζ	y_D (%)	y_D^* (%)	η veya η_s	ζ	y_D (%)	y_D^* (%)	η veya η_s	ζ	y_D (%)	y_D^* (%)
Kazan	87,14	44,12	51,40	76,68	86,04	43,78	51,39	76,80	86,00	43,34	51,88	77,81	84,87	41,65	53,10	79,17	83,87	39,22	55,08	7,99
YBT	88,71	94,00	0,47	0,71	84,99	91,59	0,70	1,05	83,55	90,62	0,80	1,20	82,42	89,93	0,85	1,26	72,05	82,60	1,49	2,16
OBT	93,75	95,58	0,36	0,53	92,81	95,06	0,38	0,56	92,64	94,95	0,38	0,57	91,15	94,58	0,38	0,57	89,72	94,12	0,39	0,57
ABT	86,33	87,07	2,10	3,09	87,25	87,82	1,92	2,86	87,30	87,89	1,88	2,82	87,68	88,16	1,73	2,59	87,61	88,00	1,60	2,32
BFPT	81,24	81,93	0,16	0,24	81,63	82,28	0,15	0,22	80,51	81,16	0,15	0,23	77,28	77,85	0,14	0,21	66,67	6,21	0,22	0,31
Kond.	53,24	32,58	7,31	10,91	53,14	31,33	7,24	10,83	54,15	35,08	6,87	10,30	54,38	34,26	6,67	9,94	52,63	35,04	6,77	9,82
Diğer			5,25	7,83			5,13	7,67			4,71	7,06			4,20	6,26			3,38	4,91
İş			26,21				25,88				25,74				24,60				22,88	
Kayıp			7,26				7,64				7,68				8,23				8,67	
Hata veya Sayıl.			-0,50				-0,44				-0,09				-0,09				-4,76	
Toplam			100	100			100	100			100	100			100	100			100	100



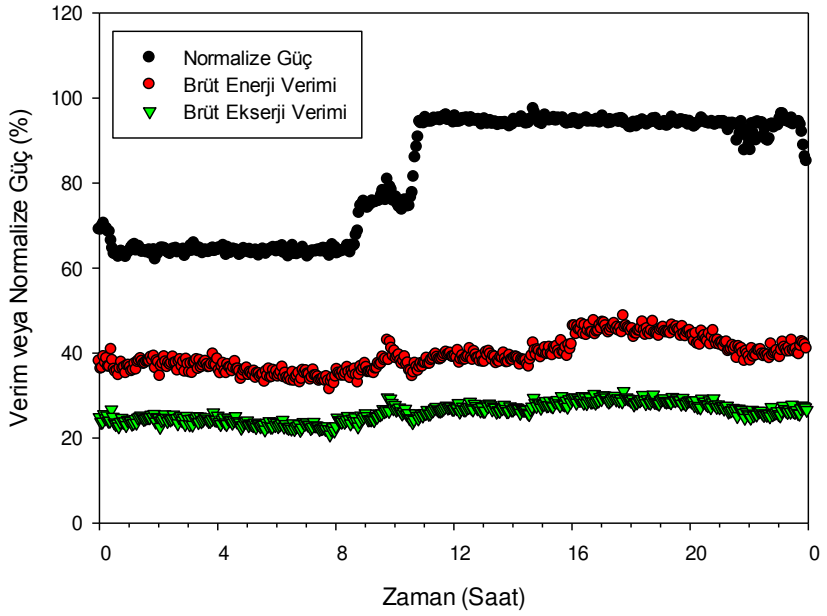
Şekil 4.11. Santralin farklı çıkış güçlerinde kazan ekserji veriminin T_0 referans sıcaklığı ile değişimi

Kazan, santralde en fazla ekserji yıkımının gerçekleştiği bileşen olduğundan çevresel referans sıcaklığının değişiminin santralin farklı çıkış güçlerinde ekserji verimine etkisini görmek önemli olabilir. Şekil 4.11 böyle bir grafiği göstermektedir. Değişimin doğrusal biçimde seyrettiği ve 0-35 ºC aralığında en yüksek ekserji verimi ile en düşük ekserji verimi arasındaki farkın hafif biçimde kapanan bir makas motifiyle %3,47'den %3,36'e düştüğü gözlemlenmektedir.

Gerçek verilerle yapılan enerji ve ekserji analizi

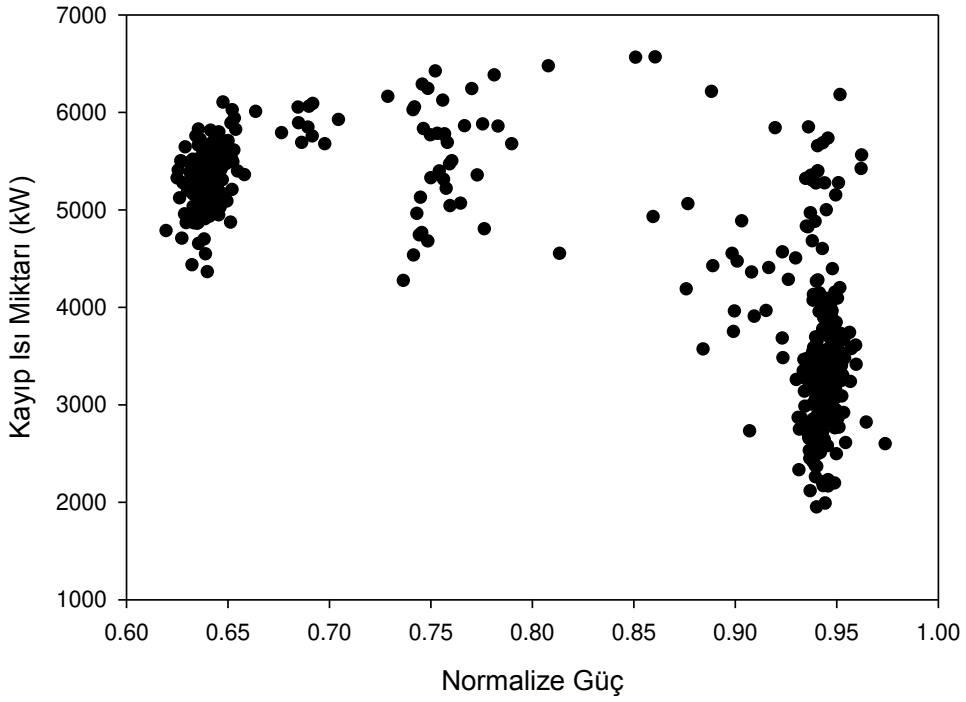
İkinci kanunun veriminin bir diğer kullanım alanı bu kavramın santralin performans izlemesinde bir kestirimci bakım enstrümanı gibi kullanılabilme potansiyelidir. Şekil 4.12 santralin 25 Mayıs 2011 tarihinde üç numaralı ünitesinin DCS'ince her üç dakikada bir kaydedilmiş olan normalize edilmiş güç grafiğini göstermektedir. Ünite, primer frekans kontrolünde şebekenin talebine göre yük izlemektedir. Buna göre, güç seviyesi elektrik talebinin

düşük olduğu gece saatlerinde yaklaşık olarak %60 güç seviyesine inmekte, sabah saat 08:30-09:00 arasında bir sıçrama göstermektedir. Sabah saat 11:00 civarında maksimum seviyeye ulaşan talep gece 00:00'a doğru tekrar azalmaktadır. Aynı şekilde santralin 4.1.1'de anlatılan yönteme göre hesaplanan enerji ve ekserji verimleri de gösterilmektedir. Dikkatle incelendiğinde santralin enerji ve ekserji veriminin çıkış gücüne göre paralel seyrettiği gözlemlenmektedir. Bununla beraber enerji veriminin genliği ekserji veriminin genliğinden daha yüksektir. Bunun nedeni belirsizlik analizinin incelendiği 5. Bölümde detaylı biçimde açıklanmaktadır.



Şekil 4.12. 25 Mayıs 2011 tarihinde üçüncü üniteden alınan verilerle santralin hesaplanan sürekli brüt enerji ve ekserji verimi (güç seviyesi 360 MW nominal çıkış gücüne göre normalize edilmiştir)

Çevrimin kendisi haricinde, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu bileşenlerin performansını izleme amaçlı olarak da kullanılabilir. Bununla ilgili sınırlayıcı faktörlerden biri her bileşenin belirli noktalarında konumlanması gereken basınç, sıcaklık ve debi ölçerlerin mevcudiyetidir. Bu sınırlama teknik gerekçelerden çok ekonomik nedenlere dayanmaktadır zira daha fazla

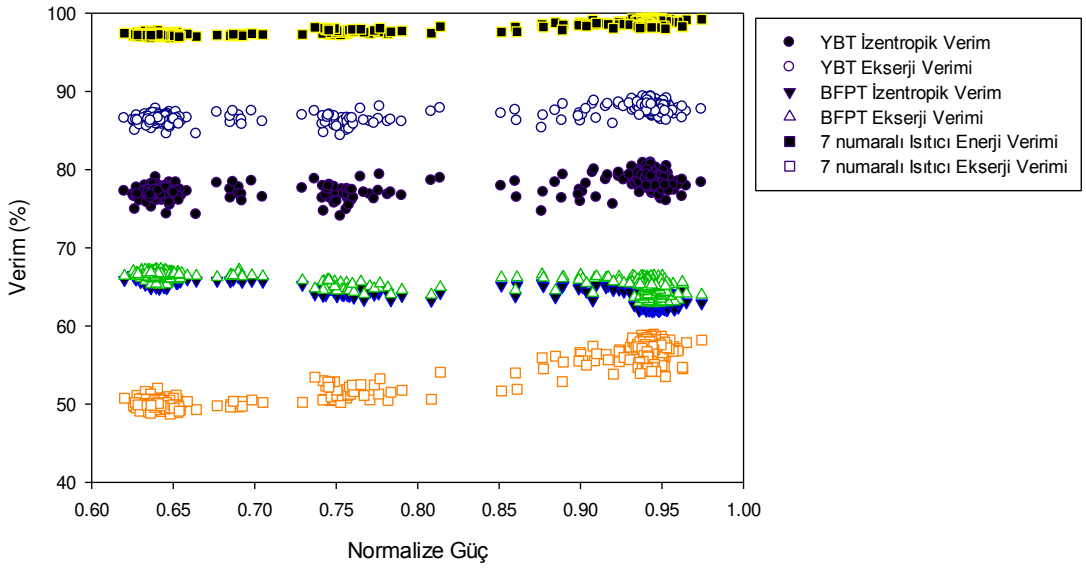


Şekil 4.13. Yedi numaralı (son) ısıtıcının farklı güç seviyelerinde kayıp ısı miktarı

sayıdaki sensör veya ölçer daha yüksek maliyet demektir. Yeterince ölçüm cihazının olmadığı durumlarda bu tip sorunların üstesinden gelmek için çevrim boyunca makul kabullerde bulunmak yardımcı olsa da sonuçların yorumlanmasını güçleştirdiği de bir gerçektir.

Şekil 4.13 Santralin farklı güç seviyelerinde yedi numaralı ısıtıcıda meydana gelen ısı (enerji) kaybını göstermektedir. Örnek olarak bu termodinamik bileşenin alınmasının nedeni tüm giriş çıkışlarının basınç, sıcaklık ve debi ölçerlerin bulunması ayrıca kazana besi suyu sağlayan son ısıtıcı olmasıdır. Şekilde görüldüğü gibi ısı kaybının tipik bir motifte gerçekleşmediği belirli noktalar etrafında bir dağılım halinde saçıldığı gözlemlenmektedir. Saçılmanın nedeni santralin işletme koşullarına göre ısıtıcıya gelen çalışan akışkanın sıcaklık, basınç ve debisinde meydana gelen dalgalanmalardır. Genel olarak santralin yüksek güç seviyesinde kaybın azaldığı daha düşük seviyelerde ise arttığı söylenebilir.

Santralin çeşitli termodinamik bileşenlerinin gerçek verileri termodinamiğin ikinci kanunu çerçevesinde incelendiğinde, ekserji veriminin enerji verimi ile paralel seyrettiği ancak, ondan her zaman için daha büyük olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.14 YBT, BFPT ve yedi numaralı ısıtıcının santralin çeşitli güç seviyelerine göre enerji, izentropik ve ekserji verimini



Şekil 4.14. Santralin gerçek verileriyle farklı güç seviyelerindeki YBT, BFPT ve yedi numaralı ısıtıcının hesaplanmış sürekli izentropik ve ekserji verimleri

göstermektedir. En yüksek enerji verimine sahip olan yedi numaralı ısıtıcı şekilde görünen bileşenler arasında en düşük ekserji verimine sahiptir. YBT'nin ekserji verimi izentropik veriminden daha yüksektir ve santralin çıkış gücünden daha az etkilenir görünmektedir. Diğer taraftan BFPT'nin izentropik ve ekserji verimleri birbirine oldukça yakın seyretmekte ancak bu defa ekserji verimi santralin güç çıkışına daha bağlı görünmektedir.

YBT Ekserji kaybı hesabı

Bileşenlerin enerji ve ekserji analizini ele alan bölümde (4.1.2) tartışıldığı gibi, kontrol hacminin seçimi, ekserji kayıbı ve yıkımı biçiminde iki farklı terimin

veya sadece ekserji yıkımı teriminin tanımlanmasını sağlamaktadır. Ekserji kaybının belirlenebilmesi amacıyla YBT kabin sıcaklığı bir saattlik bir zaman zarfında yedi farklı rastgele noktadan bir lazer termometre ile ölçülerek Eş. 4.6 ve Eş. 4.7'deki sınır sıcaklığı (T_k) bu ölçümlerin ortalaması (T_{ort}) alınarak ilgili terimler hesaplanabilmiştir. Bir başka deyişle, türbin kabini kontrol hacmi olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.11. YBT'nin her 15 dakikada bir alınmış işletme koşulları ve ölçülen kabin sıcaklıkları

$\dot{m}$ (kg/s)	P_{in} (bar)	T_{in} (ºC)	P_{in} (bar)	T_{in} (ºC)	T_1 (ºC)	T_2 (ºC)	T_3 (ºC)	T_4 (ºC)	T_5 (ºC)	T_6 (ºC)	T_7 (ºC)	T_{ort} (ºC)
250,5	166,9	540	31,9	320	52	54	64	70	51	58	68	59,6
249,4	172,9	539	32,9	316	50	51	56	57	64	65	66	58,4
250,3	169,9	539	32,9	318	50	55	61	63	66	52	55	57,4
249,2	168,9	539	32,9	318	51	54	65	70	54	55	60	58,4

YBT tek girişli ve tek çıkışlı olduğundan süreklilik koşulu zaten sağlanmaktadır. Öte yandan, Çizelge 4.11'de verilen her bir durum için enerji denklemi (Eş. 4.4), entropi ve ekserji dengesi (Eş. 4.6 ve Eş. 4.7) MS Excel Solver Generalized Reduced Gradient (GRG2) yöntemi ile eş zamanlı olarak çözüldüğünde ekserji yıkım (D) ve kayıp (L) terimleri Çizelge 4.12'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.12. Farklı kabin sıcaklıklarına karşı elde edilen kayıp ısı, entropi oluşumu, ekserji yıkımı ve kayıp terimlerinin büyüklükleri

T_k(K)	$\dot{W}$(kW)	$\dot{Q}$ (kW)	$\dot{S}$ (kW/K)	$\dot{E}_D$ (kW)	$\dot{E}_L$ (kW)
332,7	91528	0,999	42,49	12670	0,1039
331,6	91909	1,003	40,18	11981	0,1008
330,6	91809	1,000	39,61	11810	0,0981
331,6	91684	0,999	38,49	11475	0,1008

Çizelge 4.12'den de görüldüğü gibi ekserji kayıbı terimi ekserji yıkımı terimi yanında ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu da ekserji kayıbı teriminin ihmal edilerek ekserji yıkımı içerisinde kabul edilmesinin gerçekçi bir kabul

olduğunu ispatlamaktadır. Ancak, sağlıklı bir genelleme yapılabilmesi için benzer bir analizin diğer bileşenler için de yapılması gerekmektedir.

4.4.3. Sonuçların literatürdeki bulgularla karşılaştırılması

Ekserji analizine olan ilginin çoğalmasına ve bunun doğal bir sonucu olarak da bu alanda yapılan yayınların artmasına karşın yapılan analizlerde standartlaşmanın olmadığı görülmektedir. Bölüm 4.1.2'den hatırlanacağı gibi kömürün kimyasal ekserjisinin belirlenmesi için çok çeşitli yöntemler vardır ve bu yöntemler santralin ekserji verimi algısını hatırı sayılır bir oranda değiştirmektedir. Kömürün kimyasal ekserji hesabından kaynaklandığı belli olmamakla birlikte benzer bir durum literatürde yapılan çalışmalarda göze çarpmaktadır. Çizelge 4.13 literatürde Türkiye'deki santraller üzerine yapılan ekserji analizi çalışmalarını özetlemektedir.

Çizelge 4.13. Literatürde Türkiye'deki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

Kaynak	Santral Adı	Gücü (MW)	Kazan Ekserji Verimi (%)	Kazan (y_D^*)	Türbin Ekserji Verimi	Türbin (y_D^*)	Çevr. Enerji Verimi (%)	Çevrim Ekserji Verimi (%)
Küçükefe, 2004	Çan	320	51,50	-	81,40	-	38,30	37,03
Şen, 2006	Çan	320	57,40	-	92,13	-	41,2	56,15
Hilalci, 2004	Çatalağzı	300	45,00	-	-	-	-	-
Ehsan ve Yılmazoğlu, 2011	Kangal (Tasarımsal)	240	50,22	83,29	92,21	6,15	37,16	34,84
Oktay, 2009	Çan	320	65,00	-	81,33	-	37,00	36,00
Tekel, 2006	Yatağan	630	-	-	89,67	-	33,40	28,60
	Seyitömer	600	-	-	86,00	-	22,80	19,40
	Orhaneli	210	-	-	82,33	-	43,80	37,89
Acır ve ark., 2011	Çayırhan	160	41,95	58,05	83,40	5,68	42,76	33,48

Çizelge 4.13 (Devam). Literatürde Türkiye'deki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

Erdem ve ark., 2009	Yatağan	630	40,84	83,98	80,08	3,75	37,01	31,95
	Seyitömer	600	36,75	94,44	92,73	0,85	38,03	31,5
	Çan	320	48,23	89,57	90,33	2,37	42,12	37,88
	Çatalağzı	300	45,47	88,25	89,28	2,43	37,88	35,19
	Kangal	457	36,45	92,1	89,33	1,72	37,19	28,55
	Afşin-Elbistan B	1 440	39,00	93,29	92,76	1,24	42,64	32,46
	Orhaneli	210	45,77	85,51	81,97	3,83	37,63	35,49
	Soma	990	41,43	90,21	87,04	2,51	36,08	32,35
	Tunçbilek	429	44,00	89,57	89,51	2,19	38,44	33,09
ORTALAMA		**470,89**	**45,95**	**86,20**	**87,15**	**2,97**	**37,64**	**34,23**
Çalışma	**Afşin-Elbistan B**	**1 440**	**44,12**	**76,68**	**91,01**	**4,33**	**38,41**	**26,21**

Çizelge 4.13'de incelenen santrallerin hepsi kömür yakıtlı termik santrallerdir ancak sadece Çatalağzı Termik Santrali yakıt olarak taş kömürünü kullanmaktadır. Aynı çizelgeye dikkatlice bakıldığında Türkiye'de yapılan çalışmalarda aynı santral için farklı ekserji performanslarının ortaya konduğu görülmektedir. Örneğin, Çan Termik Santralinin çevrimsel ekserji verimi %36 ile %56,15 arasında değişmektedir. Bir çalışma haricinde, genel olarak, çevriminin ekserji verimi enerji veriminden düşüktür. Tüm çalışmalarda ise kazan, toplam ekserji yıkımının en az %58'inin fazlasından sorumludur. Türbinin toplam ekserji yıkımındaki ortalama payı %3'ü geçmemektedir. Sonuçlarda görülen farklılıkların hesap yöntemlerinden, sistemi ele alış detayı açısından ve yapılan kabullerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Türkiye'de şu ana kadar ulaşılabilen çalışmaların ortalaması esas alındığında Afşin-Elbistan B Termik Santralinin kazan ekserji verimi Türkiye ortalamasına yakın, ortalama türbin ekserji verimi (YBT, OBT ve ABT ortalaması) ise Türkiye ortalamasından yüksektir. Santralin enerji verimi Türkiye ortalamasının 0,77 puan üzerinde iken ekserji verimi ortalamanın 8,02 puan altında yer almaktadır. Buna göre santralin kazanı ekserji verimi açısından ortalama bir performansta çalışırken türbinleri ortalamadan çok daha iyi çalışmaktadır. Bölüm 4.4.1'de bahsedildiği gibi kimyasal ekserji açısından

Türkiye'nin en kötü kömürlerinden birine sahip olan santralin bu performansı sahip olduğu koşullar açısından *başarılı* olarak nitelendirilebilir. Çizelge 4.13'de Afşin-Elbistan B Termik Santralinin Erdem ve arkadaşları tarafından yapılan ekserji analizinin sonuçlarıyla bu çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında, kazan ve türbinin ekserji veriminin birbirine yakın olduğu ancak bu bileşenlerin toplam ekserji yıkımındaki payları arasında sırasıyla +16,61 ve -3,09 puanlık bir fark olduğu görülmektedir. Benzer biçimde her iki sonucun enerji ve ekserji verimi arasında sırasıyla +4,23 ve +6,25 puana varan bir fark söz konusudur. Erdem ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmanın detayları, kabulleri, kullandıkları yöntemler bilinmemekle birlikte santralin tasarımsal enerji veriminin %39,17 olduğu bilinmektedir. Aynı çalışmada kömürün kimyasal ekserjisinin nasıl hesaplandığına dair bir bilgi bulunmadığından sağlıklı bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Söz konusu çalışmanın kazanın ekserji yıkımındaki payını diğer pek çok çalışmada olduğundan çok daha yüksek bulduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.14. Literatürde dünyadaki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ve Çizelge 4.13 ile karşılaştırılması

Kaynak	**Santralin Bulunduğu Ülke**	**Gücü (MW)**	**Kazan Ekserji Verimi (%)**	**Kazan (y_D^*)**	**Türbin Ekserji Verimi**	**Türbin (y_D^*)**	**Çevrim Ekserji Verimi (%)**
Mitrovic ve ark., 2010	Sırbistan	348,50	46,40	88,20	86,80	3,17	35,80
Aljundi, 2008	Ürdün	396	43,80	76,75	73,50	12,99	24,80
Ganapathy ve ark., 2009	Hindistan	50	57,63	57,35	81,20		26,95

Çizelge 4.14 (Devam). Literatürde Dünyadaki santraller üzerine yapılan ekserji analizi sonuçlarının çalışma sonuçları ve Çizelge 4.12 ile karşılaştırılması

Hussein, 2001	Malezya	120	55,43	71,45	85,00	14,14	
Rosen ve Dincer, 2004	Kanada	500	49,51				35,81
Regulagadda ve ark., 2010	Hindistan	32					25,39
Ameri ve ark., 2009	İran	250	53,00		92,25		36,80
Zhao ve Chai, 2010	Çin	300	48,55	91,98	92,71	2,09	44,07
Guouqiang ve ark., 2011	Çin	300		67,78		18,54	51,88
Nikulshin ve ark., 2002	Rusya	500	61,90		78,13		41,70
ORTALAMA		**279,65**	**52,03**		**84,23**		**35,91**
Çizelge 4.13 ve 4.14 ortalaması		**402,59**	**48,07**	**82,46**	**86,29**		**34,81**
Çizelge 4.13 ve 4.14 standart sapma (σ)			**6,83**		**5,41**		**7,78**
$\bar{\zeta} - \sigma$			41,24		80,88		27,03
$\bar{\zeta} + \sigma$			54,9		91,70		42,59
Çalışma	**Afşin-Elbistan B**	**1 440**	**44,12**	**76,68**	**91,01**	**4,33**	**26,21**

Çizelge 4.14'de verilen santrallerin ortalama kurulu gücü 280 MW civarında olup bazıları kömür bazıları ise doğal gaz kombine çevrim veya kojenerasyon santralleridir. Kazan ve türbinin ortalama ekserji verimi sırasıyla %52,03 ve %84,23 olarak gerçekleşirken, çevrimin ekserji verimi ortalama %35,91 olmuştur. Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 birleştirilerek kazan, türbin ve

çevrimin ekserji verimleri ortalaması ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.14'e dikkat edilecek olursa bazı göstergeler için ortalama ve standart sapma değerlerinin hesaplanmadığı görülecektir bunun nedeni 20'den az sayıda örneğin istatistiksel olarak [Utts ve Heckard, 2006] anlamlı veri üretmemesidir.

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'deki santraller kurulu güç açısından Afşin-Elbistan B santralinden oldukça küçüktür. Santrallerin ünite başına kurulu gücü genellikle 120 ile 150 MW arasında değişmektedir oysa Afşin-Elbistan B Termik Santralinin her bir ünitesi 360 MW gücündedir. Afşin-Elbistan B santralinin kurulu gücü ortalamadan 3,6 kattan daha büyüktür. Türkiye'deki ve dünyadaki diğer santrallerin hesaplanan ortalamalarıyla karşılaştırıldığında Afşin-Elbistan B kazanı ekserji veriminde ortalamadan biraz daha düşük ancak bir standart sapma dahilinde (%41,24) türbin ekserji veriminde ortalamadan bir standart sapma yukarıda (%91,70) ve çevrimin ekserji veriminde ise bir standart sapmanın dışında (%27,03) ancak ona çok yakın bir değerdedir. Çizelge 4.14'de kombine çevrim santrallerinin bulunduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Doğal gaz kömüre göre çok daha temiz bir yakıt olduğundan yanma verimi yüksek olabilmekte bu nedenle bu yakıtla çalışan santrallerin ekserji verimleri daha yüksek seyretmektedir.

Yapılan analize göre santralin ekserji verimi açısından kazanı dünya ve Türkiye ortalamasına yakın, türbini ise ortalamadan yüksekte bir performans göstermektedir. Öte yandan çevrimin genel ekserji verimi ise standart sapmanın dışında kalmaktadır ancak yukarıda açıklandığı gibi literatürde ekserji veriminde farklı hesaplamalar ve yöntemler kullanıldığından sonuçlar mutlak anlamda yorumlanmamalıdır. Bu durum ekserji verim hesabında bir standartlaşmaya gidilmesini zorunlu kılmaktadır.

5. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Her fiziksel büyüklüğün ölçümü beraberinde bir belirsizliği de yanında getirmektedir. Yapılan herhangi bir analizde bu belirsizliğin mutlaka ifade edilmesi gerekmektedir. Bağımsız hal değişkenleri sıcaklık ve basınçla belirlenen entalpi ve entropinin fonksiyonu olan ikinci kanun verimi de bu bakımdan bir istisna oluşturmamaktadır. Bir santralin hem enerji hem de ekserji verimi anahtar performans göstergelerinden olduğundan, santralin durumuna ilişkin doğru yorumlar yapılabilmesi için bu göstergelerdeki belirsizlikler hesaplanmalıdır.

Modern bir termik santraldeki belirsizlikler çok geniş spektrum içerisinde ele alınabilir. Pek çok ulusal ve uluslararası standart enerji verimi hesabında hacimsel ve kütlesel akış, net kolorifik değer, hava/yakıt oranı, girdi/kayıp hesapları, cüruf ve uçucu külde yanmamış yakıt miktarı, elektrik ölçüm cihazlarındaki belirsizlikler gibi termofiziksel ve diğer belirsizlikleri değerlendirmektedir. Ancak, bu belirsizliklerin bazıları son derece küçük olduğundan ihmal edilmektedir.

5.1. Kapalı Kutu Yöntemiyle Belirsizlik Analizi

Kapalı kutu yöntemi, santralin tek enerji/ekserji kaynağı olarak gördüğü kömürü girdi, çıktıyı da üretilen elektrik enerjisi alarak bu hesapları önemli ölçüde sadeleştirmektedir. Girdi olarak iki değişken bulunmaktadır: kömürün bir yakıt olarak kütlesel akışı ve kalorifik değeri. Çıktıdaki tek değişken ise generatör tarafından üretilen elektrik enerjisidir. Enerji ve ekserji verimi bu değişkenlere göre sırasıyla Eş. 4.1 ve Eş. 4.2'de önceden tanımlanmıştır.

Enerji ve ekseri verimi üzerinde kapalı kutu yöntemiyle belirsizlik analizi yapabilmek için verim fonksiyonunun bağımsız $x_1, x_2, x_3 \dots \dots, x_n$ değişkenlerine göre tanımlanması gerekmektedir:

$$F = F(x_1, x_2, x_3 \dots \dots, x_n) \tag{5.1}$$

Sonuçtaki belirsizlik bu bağımsız değişkenlerin belirsizliğinin (w_1, w_2,…w_n bağımsız her bir değişkendeki belirsizlikler olsun) bir fonksiyonu olacaktır [Holman, 2012]:

$$w_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.2}$$

Eş. 5.2'de yer alan belirsizliklerin aynı türde (yüzdece veya mutlak) ifade edilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Eğer F fonksiyonu değişkenlerin çarpımı biçiminde ise,

$$F = x_1^{a1} x_2^{a2} \dots x_n^{an} \tag{5.3}$$

belirsizlik Eş. 5.4'de verilen ifadeye dönüşür.

$$\frac{w_F}{F} = \left[\sum \left(\frac{a_i w_{x_i}}{x_i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.4}$$

Ancak, Eş. 5.1'de verilen fonksiyon toplam biçiminde ise

$$F = a_1 x_1 + a_2 x_2 \dots a_n x_n \tag{5.5}$$

bu durumda oluşan belirsizlik,

$$w_F = \left[\sum \left(a_i w_{x_i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.6}$$

ile tanımlanmaktadır. F fonksiyonunun hem çarpım hem de toplam biçiminde olması durumunda belirsizlik ifadesi için Eş. 5.4 ve Eş. 5.6'nın kombinasyonu kullanılabilir [Holman, 2012].

Eş. 5.1'de tanımlanan F fonksiyonu, enerji ve ekserji verimleri için Eş. 5.7 ve Eş. 5.8'deki, buna karşılık gelen belirsizlikler ise Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'daki gibi hesaplanabilir:

$$F(\eta) = \dot{W}^{1}\dot{m}_{kömür}^{-1}LHV^{-1} \tag{5.7}$$

$$F(\zeta) = \dot{W}^{1}\dot{m}_{kömür}^{-1}(LHV.\varphi_{kuru})^{-1} \tag{5.8}$$

$$\frac{w_F}{F} = \left[\left(\frac{\mathrm{w_{P^{EL}}}}{\mathrm{P^{EL}}}\right)^2 + \left(\frac{w_{\dot{m}_{kömür}}}{\dot{m}_{kömür}}\right)^2 + \left(\frac{w_{LHV}}{LHV}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.9}$$

$$\frac{w_F}{F} = \left[\left(\frac{\mathrm{w_{E^{EL}}}}{E^{\mathrm{EL}}}\right)^2 + \left(\frac{w_{\dot{m}_{kömür}}}{\dot{m}_{kömür}}\right)^2 + \left(\frac{w_{e^{CH}}}{e^{CH}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.10}$$

Eş. 5.7 ve Eş. 5.8., Eş. 5.3 ile karşılaştırıldığında a_1, a_2 ve a_3 katsayıları sırasıyla 1,-1 ve -1 olarak atanabilir. Eş. 5.10'da yer alan kimyasal ekserji e^{CH} terimi dördüncü bölümde anlatılan SSM'ye göre hesaplanmaktadır. Bunun temel nedeni daha önce anlatılan diğer yöntemlerin hesaplarında belirsizliğe yönelik bir bilgi verilmemesidir.

Kapalı kutu yöntemine göre belirsizlik hesabı yapılmasında sonraki adım her bir değişkendeki belirsizliğin ölçülendirilmesidir. Bağımsız değişkenlerin belirsizliklerine ilişkin tablo (Çizelge 5.1) aşağıda verilmektedir.

Çizelge 5.1. Kapalı kutu yönteminde değişkenlerdeki belirsizlikler ve doğruluklar

Değişken	Belirsizlik veya Ölçüm Doğruluk Tipi ve Büyüklüğü
Elektrik Çıkışı ($\dot{W}$)	20kV/100V generatör çıkışı voltaj trafosu ölçüm hücresi doğruluk sınıfı: %0,5 15000/5A generatör çıkışı akım trafosu ölçüm hücresi doğruluk sınıfı %0,5
Kömürün Kütlesel Debisi ($\dot{m}_{kömür}$)	Değirmenin her bir yük hücresi belirsizliği: %0,002 (tam skala üzerinden) Toplam 12 hücre bulunmaktadır.

Çizelge 5.1 (Devam). Kapalı kutu yönteminde değişkenlerdeki belirsizlikler ve doğruluklar

Kömürün Alt Isıl Değeri (AID-LHV)	ASTMD5865 test sonuçları arasındaki farkın %5 geçemeyeceğini bir başka deyişle %95 güvenlik payının uygulanmasını zorunlu kılmaktadır.
Kimyasal ekserjinin net kalorifik değere olan oranı (φ)	Bu ifadenin doğruluğunun ±1%'den iyi olduğu öngörülmektedir [Kotas, 1985].

Elektrik çıkışına ilişkin belirsizlik akım transformatöründen kaynaklanmaktadır çünkü santral primer frekans kontrolünde çalıştığından çıkış voltajı 19-20 kV arasında değişmektedir. Oysa akım, santralin %40-%100 güç çıkışı aralığında 6235 ile 10 392 A arasında değişmektedir. Değirmen yük hücreleri iki bantla beslenmekte olduğundan kömür miktarıyla ilgili belirsizliğin Eş. 5.5. ve Eş. 5.6.'ya göre hesaplanması gerekmektedir. Kimyasal ekserjideki belirsizlik hesabında alt ısıl değerdeki belirsizlikle Eş. 5.8'in belirsizliği çarpım fonksiyonu belirsizliği oluşturduğundan toplamda daha yüksek bir belirsizlik ortaya çıkmaktadır.

5.2. Bileşenlerin Belirsizlik ve Hassasiyet Analizi: YBT Üzerine Uygulama Çalışması

Bileşenlerin enerji/ekserji verimindeki belirsizlik hesabı ve hassasiyet analizi 5.1.'de anlatılanlardan farklı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analiz, gerçek veri değerlendirmeyi kolaylaştırması nedeniyle YBT üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, belirsizlik hesabı ve hassasiyet analizi YBT'nin izentropik verimi ile ekserji verimi üzerinde uygulanmıştır.

Afşin-Elbistan B Termik Santralinde olduğu gibi bir giriş bir çıkışa sahip olan YBT için izentropik verim daha önceden altıncı bölümde açıklanmıştı ancak belirsizlik incelemesi için hatırlatmak gerekirse;

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \tag{5.11}$$

olarak tanımlanabilir. Burada, 1 ve 2 alt indisleri sırasıyla giriş ve çıkış hal şartlarını, s alt indisi türbin çıkışında buharın izentropik tersinir genişlemesini göstermektedir. Türbinin tek bir giriş ve çıkışı olduğu için Eş. 5.11'de kütlesel debi yer almamaktadır. Türbinin ekserji verimi ise,

$$\zeta_{YBT} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)} \tag{5.12}$$

ile verilmektedir. Eş. 5.11.'de olduğu gibi 1 ve 2 alt indisleri sırasıyla giriş ve çıkış hal şartlarını, T_0 ölü hal sıcaklığını, s spesifik entropiyi göstermektedir.

Gerek izentropik verim gerekse ekserji verimi Eş. 5.1'de verilen F fonksiyonu görevi görmektedir. Entalpi YBT koşullarında basınç (P) ve sıcaklık (T) gibi iki bağımsız değişkenin bir fonksiyonu olduğundan izentropik ve ekserji verimi de bu bağımsız değişkenlerin fonksiyonu haline gelir:

$$F(\eta_s) = \frac{h_1(P,T) - h_2(P,T)}{h_1(P,T) - h_{2s}(P,T)} = F(P,T) \tag{5.13}$$

F fonksiyonu, basınç (P) ve sıcaklığın (T) bir fonksiyonu olduğundan, x_1'in yerine P ve x_2'nin yerine T geçmektedir. Eş. 5.2'deki ilk iki terimin $\frac{\partial F}{\partial x_1}$ ve $\frac{\partial F}{\partial x_2}$ belirlenmesi gerekmektedir. Yeterince küçük Δx değerleri için kısmı türevler,

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial P} \cong \frac{\eta_s(P+\Delta P,T) - \eta_s(P,T)}{\Delta P} = \frac{\frac{h_1(P+\Delta P,T) - h_2(P+\Delta P,T)}{h_1(P+\Delta P,T) - h_{2S}(P+\Delta P,T)} - \frac{h_1(P,T) - h_2(P,T)}{h_1(P,T) - h_{2S}(P,T)}}{\Delta P} \tag{5.14}$$

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial T} \cong \frac{\eta_s(P,T+\Delta T) - \eta_s(P,T)}{\Delta T} = \frac{\frac{h_1(P,T+\Delta T) - h_2(P,T+\Delta T)}{h_1(P,T+\Delta T) - h_{2S}(P,T+\Delta T)} - \frac{h_1(P,T) - h_2(P,T)}{h_1(P,T) - h_{2S}(P,T)}}{\Delta T} \tag{5.15}$$

olarak ifade edilebilir [Holman, 2012]. Eş. 5.14 ve Eş. 5.15, Eş. 5.2'ye yerleştirildiğinde, türbinin izentropik verim belirsizliği,

$$w_{\eta_s} = \left[\left(\frac{\partial \eta_s}{\partial P} w_P\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_s}{\partial T} w_T\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.16}$$

ile verilebilir. Eş. 5.16 YBT'nin izentropik verimindeki belirsizliği Eş. 5.14 ve Eş. 5.15'deki kısmı türevlerden yararlanarak hesaplamaktadır. Bu ifadede bulunan basınç ve sıcaklık ölçerlerin doğruluklarının bilinmesiyle izentropik verimde oluşan belirsizlik hesaplanabilir. Basınçölçerler için doğruluk, tam ölçüm skalası üzerinden verilirken sıcaklık ölçerler yani termokupllarda ya sıcaklığın kendisinin bir fonksiyonu ya da ±∆T olarak verilir.

Analojik bir yaklaşım ekserji verimi için de uygulanabilir. Yukarıda açıklanan prosedüre uygun olarak YBT'nin ekserji veriminin basınç ve sıcaklık ilişkisi,

$$\frac{\partial \zeta_{YBT}}{\partial P} \cong \frac{\frac{h_1(P+\Delta P,T)-h_2(P+\Delta P,T)}{h_1(P+\Delta P,T)-h_2(P+\Delta P,T)-T_0(s_1-s_2)} - \frac{h_1(P,T)-h_2(P,T)}{h_1(P,T)-h_2(P,T)-T_0(s_1-s_2)}}{\Delta P} \tag{5.17}$$

$$\frac{\partial \zeta_{YBT}}{\partial T} \cong \frac{\frac{h_1(P,T+\Delta T)-h_2(P,T+\Delta T)}{h_1(P,T+\Delta T)-h_2(P,T+\Delta T)-T_0(s_1-s_2)} - \frac{h_1(P,T)-h_2(P,T)}{h_1(P,T)-h_2(P,T)-T_0(s_1-s_2)}}{\Delta T} \tag{5.18}$$

ile belirlenmektedir. Ekserji verimindeki belirsizlik benzer biçimde,

$$w_{\zeta_{YBT}} = \left[\left(\frac{\partial \zeta_{YBT}}{\partial P} w_P\right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta_{YBT}}{\partial T} w_T\right)^2\right]^{1/2} \tag{5.19}$$

ile hesaplanmaktadır. Eş. 5.14. ve Eş. 5.15 ile Eş. 5.18 ve Eş. 5.19'daki sıcaklık ve basınç pertubrasyon değerlerinin normalde yeterince küçük olması gerekmektedir. Ancak her iki verimin de sıcaklık ve basınç değerlerinin (ΔT ve ΔP) 0,00001 ile 0,1 aralığında değiştirilmesine karşın kısmı türevin nümerik değerleri belirgin bir biçimde değişmemekte bir nevi

duyarsız kalmaktadır. Bu nedenle, yapılan hesaplamalarda yeterince küçük bir değer seçilmiştir.

5.3. Ekstrem Durum Analizi

Belirsizlik analizi kapsamında yapılabilecek incelemelerden biri de ekstrem durum (en kötü senaryo) analizidir. Oldukça basit olan bu analiz tipinde örneğin Z gibi bir büyüklüğün X ve Y gibi iki farklı bağımsız değişkenin çarpımı olduğu düşünülür.

$$Z = X * Y \tag{5.20}$$

Bağımsız değişkenlerdeki belirsizlik x ve y ile gösterilirse, ürünün (Z) minimum ve maksimum değerleri,

$$Z_{Max} = (X + x) * (Y + y) = XY + Xy + xY + xy \tag{5.21}$$

$$Z_{Min} = (X - x) * (Y - y) = XY - Xy - xY + xy \tag{5.22}$$

olacaktır. Böyle bir kombinasyonun olma olasılığı düşük olsa da bu analiz belirsizliklerin sınırını göstermesi bakımından yararlı olmaktadır. Ekstrem durum analizinin kapalı kutu yöntemine uygulanması oldukça basittir. Eş. 5.23 ve Eş. 5.24 çevrim verimi için ekstrem durum analizinin enerji ve ekserji verimi için belirlediği minimum ve maksimumları vermektedir.

$$\eta_{min} = \frac{\mathrm{P^{EL}} - \mathrm{w_{E}EL}}{\left(\dot{m}_{kömür} + w_{\dot{m}_{kömür}}\right) * (LHV + w_{LHV})} \quad \eta_{max} = \frac{\mathrm{P^{EL}}}{\left(\dot{m}_{kömür} - w_{\dot{m}_{kömür}}\right) * (LHV - w_{LHV})} \tag{5.23}$$

$$\zeta_{min} = \frac{E^{\mathrm{EL}} - \mathrm{w_{E}EL}}{(\dot{m}_{kömür} + w_{\dot{m}_{kömür}}) * (e^{CH} + w_{eCH})} \quad \zeta_{max} = \frac{E^{\mathrm{EL}} - \mathrm{w_{E}EL}}{(\dot{m}_{kömür} - w_{\dot{m}_{kömür}}) * (e^{CH} - w_{eCH})} \tag{5.24}$$

Ekstrem durum analizi YBT gibi bir termodinamik bileşen için de kullanılabilir ancak maksimum ve minimumlar Eş. 5.11. ve Eş. 5.12.'nin lineer olmaması nedeniyle yukarıdaki gibi kolay bir biçimde belirlenemez. Bu amaçla yararlanabilecek yöntemlerden biri tablolamadır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Ekstrem durum analizi olasılık matrisi

Giriş/Çıkış	P-$\boldsymbol{w_P}$,T-$\boldsymbol{w_T}$	P+$\boldsymbol{w_P}$,T-$\boldsymbol{w_T}$	P-$\boldsymbol{w_P}$,T+$\boldsymbol{w_T}$	P+$\boldsymbol{w_P}$,T+$\boldsymbol{w_T}$
P-$\boldsymbol{w_P}$,T-$\boldsymbol{w_T}$	$(P_{min},T_{min})_{giriş}$ $(P_{min},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{min})_{giriş}$ $(P_{max},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{min})_{giriş}$ $(P_{min},T_{max})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{min})_{giriş}$ $(P_{max},T_{max})_{çıkış}$
P+$\boldsymbol{w_P}$,T+$\boldsymbol{w_T}$	$(P_{max},T_{max})_{giriş}$ $(P_{min},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{max})_{giriş}$ $(P_{max},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{max})_{giriş}$ $(P_{min},T_{max})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{max})_{giriş}$ $(P_{max},T_{max})_{çıkış}$
P-$\boldsymbol{w_P}$,T+$\boldsymbol{w_T}$	$(P_{min},T_{max})_{giriş}$ $(P_{min},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{max})_{giriş}$ $(P_{max},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{max})_{giriş}$ $(P_{min},T_{max})_{çıkış}$	$(P_{min},T_{max})_{giriş}$ $(P_{max},T_{max})_{çıkış}$
P+$\boldsymbol{w_P}$,T-$\boldsymbol{w_T}$	$(P_{max},T_{min})_{giriş}$ $(P_{min},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{min})_{giriş}$ $(P_{max},T_{min})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{min})_{giriş}$ $(P_{min},T_{max})_{çıkış}$	$(P_{max},T_{min})_{giriş}$ $(P_{max},T_{max})_{çıkış}$

Çizelge 5.2'de verilen w_P ve w_T sırasıyla basınçölçer ve sıcaklıkölçerlerdeki belirsizliği simgelemektedir. Buna göre hem basınç hem de sıcaklıktaki değişim belirsizlikleri yukarıda gösterilen matristeki gibi sıralandığında ekstrem durum değerlerinin belirlenmesi kolaylaşmaktadır.

5.4. Kabuller ve Sınır Şartları

Dördüncü bölüm için belirtilen kabul ve sınır şartları bu bölüm için de geçerlidir. Buna ek olarak YBT'de kullanılan basınç ölçerlerin ölçü aralığının 0-180 bar arasında olduğu varsayılmıştır. Ayrıca cihazın ölçtüğü değerlerin mutlak değerler olduğu öngörülmektedir.

5.5. Sonuçlar

Bu bölümde kapalı kutu yöntemi belirsizlik analizi, aynı yöntemin hassasiyet analizi sonuçları, bileşenlerden YBT'nin belirsizlik ve hassasiyet analizi sonuçları tartışılmaktadır.

5.5.1. Kapalı kutu yöntemi belirsizlik analizi sonuçları

Yukarıda sözü edilen kapalı kutu yöntemi, bir santralin enerji ve ekserji veriminde etkili olan girdi ve çıktılara ilişkin resim hakkında hızlı bir fikir verebilir. Kömür akışı, kalorifik değer, elektrik çıkışı ölçümünün hangisinin santralin enerji ve ekserji belirsizliği üzerine etkili olduğu bu sayede belirlenebilecektir. Çizelge 5.3 her belirsizlik değişkeninin santralin enerji verimindeki ağırlığını göstermektedir. Belirsizliğe en büyük katkıyı alt ısıl değer (AID-LHV) yapmakta onu elektrik çıkış ölçümü ve santrale gelen kömürün kütlesel debisi izlemektedir. Elektrik çıkış ölçümü ve kömürün kütlesel debisindeki belirsizliğin santralin çıkış gücünün azalmasıyla artmasının nedeni bu değişkenlerdeki belirsizliklerin tam skala üzerinden (tsü) verilmiş olmasıdır. Böylece santralin düşük çıkış gücünde belirsizlikler daha yüksek olmaktadır. Buna karşılık alt ısıl değerin getirdiği belirsizlik santralin çıkış gücü ile doğru orantılıdır çünkü bu büyüklükteki belirsizlik mutlak dolayısıyla sabit bir belirsizliktir. Enerji verimi W_F terimi ile çarpıldığında çarpım yani belirsizlik azalan güç seviyesiyle (enerji verimi çıkış gücü ile doğru orantılıdır) birlikte küçülür. Tüm değişkenlerin bir arada bulunduğu satırda (Çizelge 5.3'deki son satır) alt ısıl değerin baskınlığı nedeniyle çıkış gücü azaldıkça belirsizlik azalmaktadır.

Ekserji verimindeki belirsizlikler enerji verimindeki gibi olmakla birlikte ağırlıkları biraz farklıdır. Çizelge 5.4'te de görüldüğü gibi belirsizliğe en fazla katkı veren değişken yine alt ısıl değer olup bunu elektrik çıkış ölçümü, santrale gelen kömürün debisi izlemektedir. Ekserji verimindeki belirsizlikler

Çizelge 5.3. Kapalı kutu yönteminde enerji verimi belirsizliğine etki eden değişkenlerin ağırlıkları

Değişkendeki Belirsizlik ve tipi			**Farklı çıkış güçlerindeki (%) enerji verimi belirsizliği (%)**				
$w_{P_{EL}}$ (%tsü)	$w_{\dot{m}_{coal}}$ (%tsü)	w_{LHV} (%mutlak)	100	85	80	60	40
0,5	0	0	0,342	0,378	0,393	0,477	0,640
0	0,007	0	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005
0	0	5	1,947	1,917	1,906	1,833	1,709
0,5	0,007	5	1,977	1,953	1,946	1,894	1,825

enerji verimindeki belirsizliklerden daha düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni, santralin ekserji veriminin enerji veriminden düşük olması ve belirsizlik terimi ekserji verimi ile çarpıldığında çarpımın yani belirsizliğin daha düşük olmasıdır.

Çizelge 5.4. Kapalı kutu yönteminde ekserji verimi belirsizliğine etki eden değişkenlerin ağırlıkları

Değişkendeki Belirsizlik ve tipi			**Farklı çıkış güçlerindeki (%) ekserji verimi belirsizliği (%)**				
$w_{E_{EL}}$(%tsü)	$w_{\dot{m}_{coal}}$(%tsü)	$w_{e^{CH}}$(%mutlak)	100	85	80	60	40
0,5	0	0	0,242	0,268	0,279	0,338	0,454
0	0,007	0	0,002	0,002	0,003	0,004	0,005
0	0	5,01	1,408	1,386	1,378	1,325	1,235
0,5	0,007	5,01	1,428	1,411	1,406	1,367	1,316

Ekserji veriminde, tıpkı enerji veriminde olduğu gibi, alt ısıl değer verimin belirsizliği üzerine daha etkindir. Alt ısıl değerin verim üzerindeki belirsizliği çıkış gücü ile azaldığından toplam belirsizlik de azalan bir eğilimdedir.

Kapalı kutu yöntemi sonuçlarının DIN standartları ile karşılaştırılması

DIN standartları modern elektrik üretim santrallerinin katı yakıtlarının kalori ve kimyasal analizleri, kazan performans, türbin testleri ve daha birçok ekipmanın test ve performansını belirlemede kullanılan güvenilir, kapsamlı ve geniş ölçüde benimsenmiş özelleşmiş standartlardır. Kapalı kutu yöntemi ise çok daha basit bir yöntem olarak burada değerlendirilmiştir. Kapalı kutu

yöntemi santralin temel etmenlerinin belirsizlik üzerine ne derece etkili olduğunu hızlı bir biçimde değerlendirme amacı gütmektedir. Her iki yöntem arasındaki farkın ne kadar olduğunun karşılaştırılması bu yöntemin sınırlarını belirleme açısından önemlidir.

Afşin-Elbistan B santralinin detaylı performans kabul ve testlerinin olmasına rağmen belirsizlik değerlerine ulaşılamamıştır. Bununla beraber benzer yöntem farklı santrallerde de uygulandığından 18 Mart Çan Termik Santralinin belirsizlik değerleri referans [Alstom GmbH, 2006] olarak alınmıştır. DIN 1942 standardının kazan verimsizliğindeki belirsizlikleri hesaplama yöntemi sağlamasına rağmen çevrimin verim belirsizliği üzerine herhangi bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle kazanın enerji verimindeki belirsizlik, çevrimin enerji verimine $\eta_{çevrim} = \frac{\eta_{kazan} P_{el}}{Q_{akışkan}}$ olarak ilişkilendirilmiştir. Burada η_{kazan} kazanın enerji verimini, bir başka deyişle kömürle gelen kalorinin ne kadarını çalışan akışkana geçirebildiğini, P kW cinsinden akım-gerilim trafosunda ölçülen elektrik gücünü göstermektedir. Elektrik gücü ve kazan verimindeki belirsizlik bir çarpım fonksiyonu oluşturduğundan ortaya çıkan belirsizlik Eş. 5.4.'e göre hesaplanmaktadır. Elektrik çıkışındaki belirsizlik ise Çizelge 5.1'in ilk satırındaki bilgilere göre hesaplanmaktadır. Kapalı kutu yöntemiyle karşılaştırmayı eşitleyebilmek için kömür kalori tayininde ASTM D 5865 standardı yerine DIN 1942 standardında belirtildiği gibi kül oranın %15'den büyük olması durumunda kömür kalorisindeki belirsizlik 170 kJ/kg alınmıştır [DIN 1942, 1994]. Santralin tasarım kalorifik değeri 4 814,82 kJ/kg olduğundan kalori tayinindeki belirsizlik % 3,53 olarak belirlenmiştir. Bu değer ASTM standardının %95'lik güvenlik payından daha iyi olduğundan buna göre hesaplanan belirsizlik de daha düşük çıkmaktadır (Çizelge 5.5 ikinci satır).

Çizelge 5.5. DIN standardı ve kapalı kutu yöntemiyle hesaplanan belirsizliklerin karşılaştırılması

Belirsizlik Hesap Yöntemi	**Hesaplanan Büyüklük (%) [Alstom GmbH, 2006]**	**Hesaplanan Çevrim Verimi Belirsizliği (%)**
18 Mart Çan T.S. DIN 1942 GCC (%100) Kazan Verimi Belirsizliği	0,46	0,39
Afşin-Elbistan B T.S. Kapalı Kutu GCC (%100)		1,417
18 Mart Çan T.S. DIN 1942 GCC (%85) Kazan Verimi Belirsizliği	0,47	0,37
Afşin-Elbistan B T.S. Kapalı Kutu GCC (%85)		1,405

Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi her ne kadar incelenen santrallerin türü, kurulu gücü ve diğer birçok özelliği farklı olsa da kapalı kutu yönetiminin belirsizlikleri bir puana varan ölçüde daha yüksek hesapladığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni kömürün kalorifik hatası ile gelen terimin yüksek olmasıdır. Çevrim verimindeki belirsizliğinin kazan verimi belirsizliğinden düşük görünmesi ilk başta yadırganabilir ancak bunun nedeni Eş. 5.4'te F ile gösterilen değerin çevrim verimi olması ve bunun değerinin de güç çıkışına göre %80-90 arasında değişen kazan veriminden çok daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Kapalı kutu yönteminin santralin detaylı tasarımı yapılmadan önce belirsizliklerin sınırını oluşturması açısından kullanışlı olacağı düşünülmektedir.

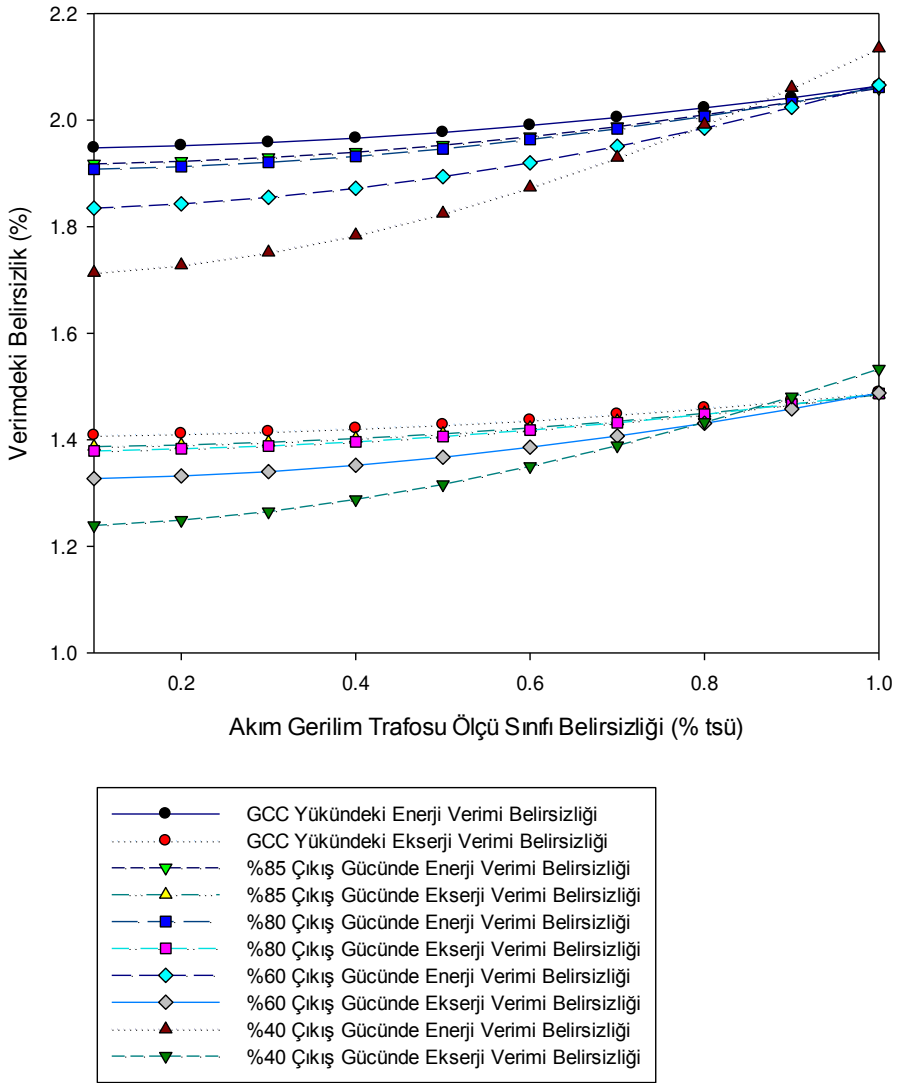
Ekserji verimi açısından kıyaslama yapmak neredeyse mümkün değildir çünkü literatürdeki en önemli kaynaklarda bile ekserji verimi belirsizliği

konusu işlenmemiştir. Ertesvåg'a göre ısı pompalarının COP katsayılarındaki belirsizlikler için ISO ve CEN standartlarının belirsizlik değerleri %5-10 arasında değişmektedir. Enerji verimi belirsizliklerini DIN standartlarından daha yüksek belirleyen kapalı kutu yöntemine göre ekserji verimindeki belirsizlikler %40-%100 güç aralığı için %1,316 ile %1,428 arasında değişmektedir. DIN standartlarına ekserji verimi belirsizliğiyle ilgili bir hesap prosedürü oluşturulması durumunda bu belirsizliğin çok daha düşük çıkacağı düşünülmektedir.

5.5.2. Kapalı kutu yöntemi hassasiyet analizi sonuçları

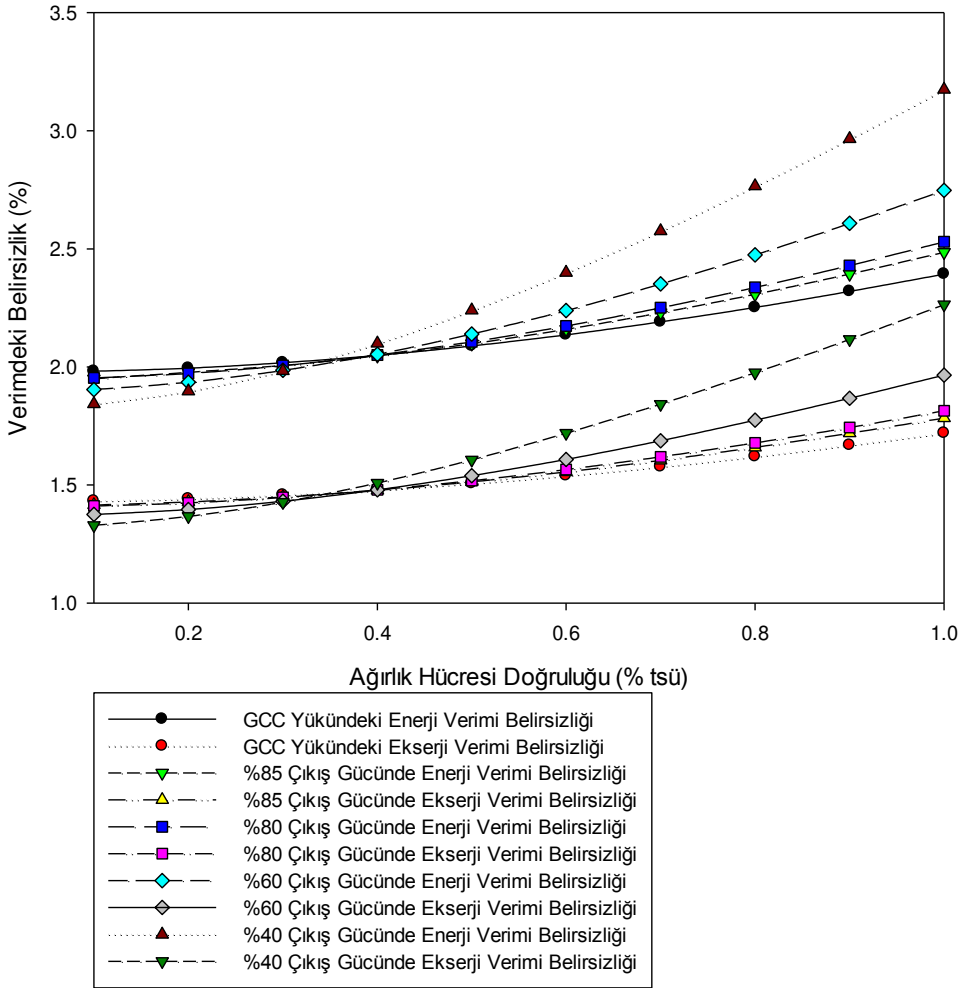
Enerji ve ekserji verimi üzerinde etkili olan parametrelerin etkilerinin büyüklüğünü anlamanın bir diğer yolu da hassasiyet analizidir. Belirsizlik analizi ile birlikte yapılmayan bir hassasiyet analizi eksik kalmış bir çalışma olacaktır. Kapalı kutu yöntemi hassasiyet analizinde, her değişken Çizelge 5.1'de gösterilen doğruluk sınıfı veya tipi üzerinden değiştirilerek enerji ve ekserji veriminin nasıl değiştiği incelenir. Hassasiyet analizi 5.1.'de verilen yöntemlerin aynısını kullanmaktadır ancak belirsizlik analizinde tek bir değer elde edilirken, hassasiyet analizinde her bir değişken bir aralık boyunca değiştirilip belirsizliğin nasıl bir şekil aldığı incelenir. Hem belirsizlik analizi hem de hassasiyet analizi yalnızca çevrimin enerji ve ekserji verimi için kullanılmış, bileşen analizinde kullanılmamıştır.

Hassasiyet analizi yapılırken sadece etkinliği araştırılan değişken incelenerek diğerleri nominal değerlerinde sabit tutulmuştur. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3, enerji ve ekserji veriminin; akım-gerilim trafosu ölçüm sınıfı hassasiyeti, değirmen bantları ağırlık hücreleri hassasiyeti ve net kalorifik değer ölçümünün doğruluğuna bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 5.1. Akım-Gerilim trafolarının ölçü sınıflarının farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi

Akım gerilim trafosunun ölçü sınıfı doğruluğunun enerji ve ekserji verimi hassasiyetini gösteren Şekil 5.1 ve değirmen ağırlık ölçüm hücrelerinin enerji ve ekserji verimi hassasiyetini gösteren Şekil 5.2'nin motifleri birbirine benzemektedir. Bununla beraber, enerji verimi hassasiyetini gösteren eğriler daha genişken ekserji verimini gösteren eğriler daha basıktır ancak her ikisi de ölçü sınıfının doğruluğu ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

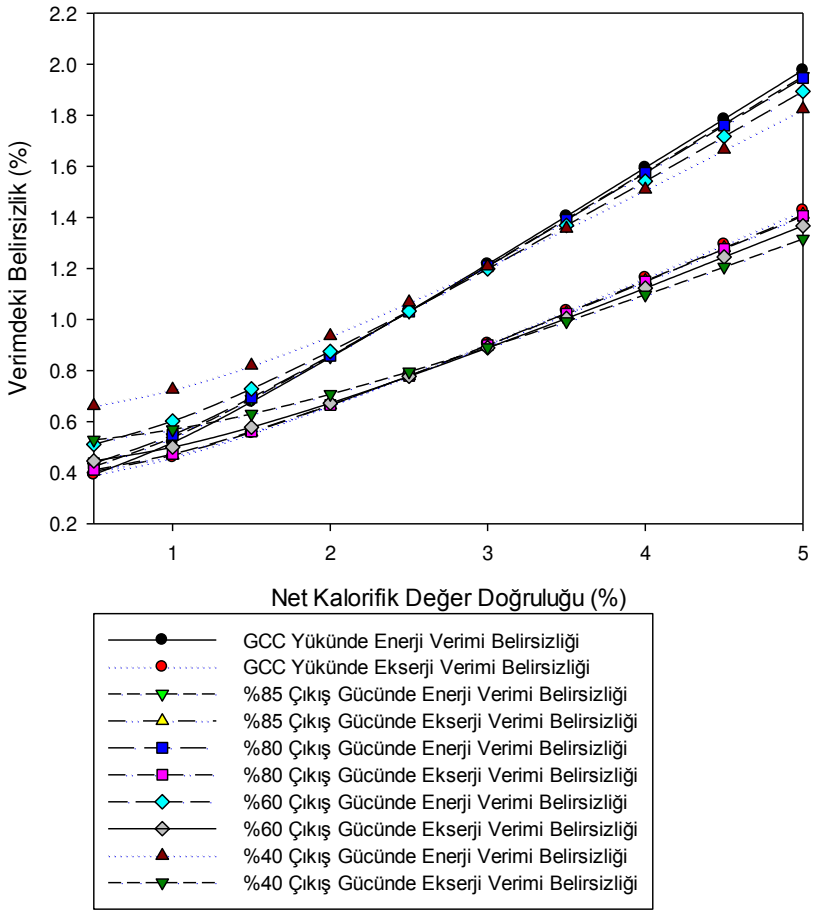


Şekil 5.2. Değirmen ağrılık hücresinin ölçüm doğruluğunun farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'den çıkarılabilecek iki temel sonuç bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, enerji ve ekserji verimi belirsizliği ölçü sınıfı doğruluğuna santralin düşük çıkış gücünde çok daha hassastır. Ayrıca, belirli bir noktadan sonra düşük çıkış gücü seviyesindeki belirsizlik yüksek çıkış gücündeki belirsizliği geçmektedir. İkinci olarak, ekserji veriminin belirsizlik hassasiyeti enerji veriminin belirsizlik hassasiyetinden düşüktür. Birinci sonucun temel nedeni cihazların doğruluk sınıfı değeri arttıkça Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'nun sağ tarafının büyüklüğü artmaktadır. Her iki verimin de çıkış gücünün azalmasıyla düşmesine rağmen, eşitliklerin sağ tarafındaki terimlerle çarpımı artmaktadır.

Bu nedenle belirsizlik miktarı artmaktadır. Şekil 5.1 ve 5.2'de düşük çıkış gücünün daha yüksek çıkış güçlerini geçmesi tamamen incelenen değişkenin etkinliğine bağlıdır. Örneğin, ağırlık hücresinin doğruluğu kendine has biçimde %0,4 doğruluğun üstünde daha etkinleşmektedir (Diğerleri değiştirilmediğinden Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'daki ikinci terimin etkinliği artmaktadır). İkinci sonuçta görünen etkinin nedeni ise ekserji veriminin enerji veriminden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Buna göre Eş. 5.10'nun sol tarafında bulunan F değeri olan ekserji verimi ve sağ tarafındaki belirsizlikler toplamı (Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 dördüncü satır) daha düşük olduğundan çarpımı da daha düşük olmaktadır. Her iki şekilde de güç seviyesinin düşmesiyle belirsizliğin artması ölçüm doğruluklarının tam skala üzerinden verilmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.3'ün, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'ten en belirgin farkı kalorifik değer doğruluğunun hızlı bir biçimde değişmesi bir başka deyişle daha hassas oluşudur. ASTM standardı kömür ölçüm numunelerinde %95 güvenilirlik gerektirmektedir. İki numunenin kalorifik değer ölçüm farkı %5'i geçtiğinde ölçümler tekrarlanmaktadır. Hem enerji hem de ekserji verimindeki belirsizlik yaklaşık olarak %3 doğruluk seviyesinden sonra santralin çıkış gücüne göre ters düz olmaktadır. Bu, diğer değişkenler sabit tutulurken, Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'da üçüncü terimin baskınlığının yüksek güçlerde artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.3. Net kalorifik değer belirlenme doğruluğunun farklı güç seviyelerinde enerji ve ekserji verimi belirsizliği üzerine etkisi

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 değerlendirildiğinde tüm değişkenler arasında alt ısıl değer tayininin belirsizlik üzerine en etkin değişken olduğu söylenebilir. Bu da kalorifik değer tayin metodunun hayati öneme sahip olduğunu göstermektedir.

5.5.3. Bileşenlerin belirsizlik ve hassasiyet analizi: YBT üzerine uygulama çalışması sonuçları

Çizelge 5.6 izentropik verim ve ekserji verimine ilişkin türev terimlerinin santralin gücüne bağlı değişimini göstermektedir. Buna göre izentropik verimin basınçla değişimi santralin çıkış gücü düştükçe artmakta sıcaklıkla

ise azalmaktadır. Sıcaklıkla olan değişimdeki negatif işareti ters orantıyı göstermektedir. Buna göre türbine giren ve çıkan buharın sıcaklığı ΔT kadar arttığında izentropik verimi azalmaktadır. Durum ekserji verimi açısından değerlendirildiğinde ekserji veriminin basınca bağlı türev ifadesinin büyüklüğü santralin güç çıkışı arttıkça azalmaktadır. Öte yandan ekserji veriminin sıcaklığa bağlı türev ifadesi çok güçlü bir değişim göstermemekte, mutlak değeri santralin çıkış gücü azaldıkça azalmaktadır.

Çizelge 5.6. Belirsizlik kısmı türevlerinin santralin çıkış gücü ile değişimi

Belirsizlik Terimi	**Santralin Çıkış Gücü**				
	GCC	**%85**	**%80**	**%60**	**%40**
$\frac{\partial \eta_s}{\partial P}$[1/bar]	0,014564	0,015132	0,015298	0,017854	0,018641
$\frac{\partial \eta_s}{\partial T}$[1/°C]	-0,001161	-0,001029	-0,000976	-0,000852	-0,000581
$\frac{\partial \zeta}{\partial P}$[1/bar]	0,008317	0,009338	0,009711	0,011499	0,014156
$\frac{\partial \zeta}{\partial T}$[1/°C]	-0,000571	-0,000510	-0,000480	-0,000395	-0,000197

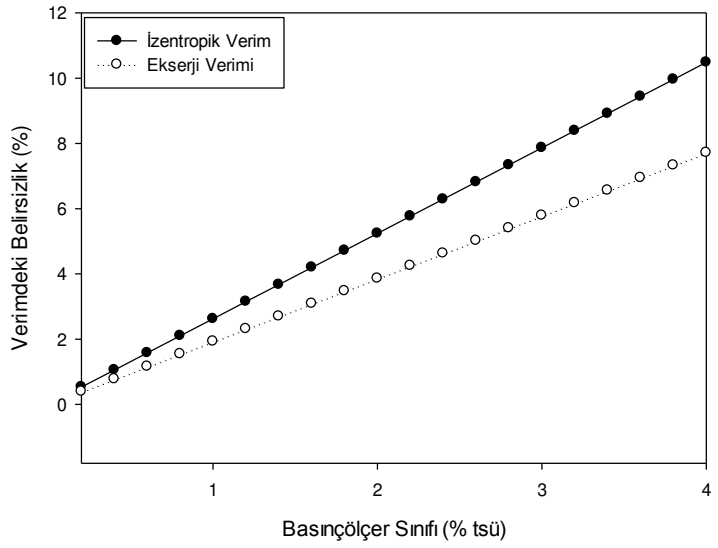
Çizelge 5.7'de görüldüğü gibi türbinin izentropik ve ekserji verimi, santralin güç çıkışına göre türbine giren buharın basınç ve sıcaklığıyla doğru orantılı bir biçimde artmaktadır. Türbinin ekserji verimi izentropik veriminden yüksektir. Diğer taraftan düşük çıkış gücünde izentropik verimindeki belirsizlik ekserji verimindeki belirsizliğe yaklaşmaktadır. Çıkış gücü arttıkça her iki verimdeki belirsizlik azalmakta ancak izentropik verimdeki belirsizlik her zaman daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni; Eş. 5.16'daki kısmı türev terimlerinin (Eş. 5.14 ve Eş. 5.15) büyüklüğünün Eş. 5.19'daki benzer ifadelerden (Eş. 5.17 ve Eş. 5.18) büyük olmasına ek olarak w_P ve w_T terimlerinin her iki verim için aynı olmasıdır. Ekserji verimindeki kısmı türevin mutlak değerindeki değişimin, özellikle de basınca bağlı terimin, güç seviyesi %60'dan %80'e çıkarken daha etkin olmasından dolayı her iki verimdeki belirsizlikteki değişimler belirginleşmektedir. Yine Çizelge 5.7'de görülen

ekstrem durumlar ölçü cihazlarının doğruluğu nedeniyle ile verimlerin alabilecekleri (gerçekte böyle bir durumun meydana gelme olasılığı çok düşüktür) en büyük aralığı göstermektedir.

Çizelge 5.7. YBT izentropik ve ekserji verimi belirsizliklerinin santral çıkış gücüyle değişimi

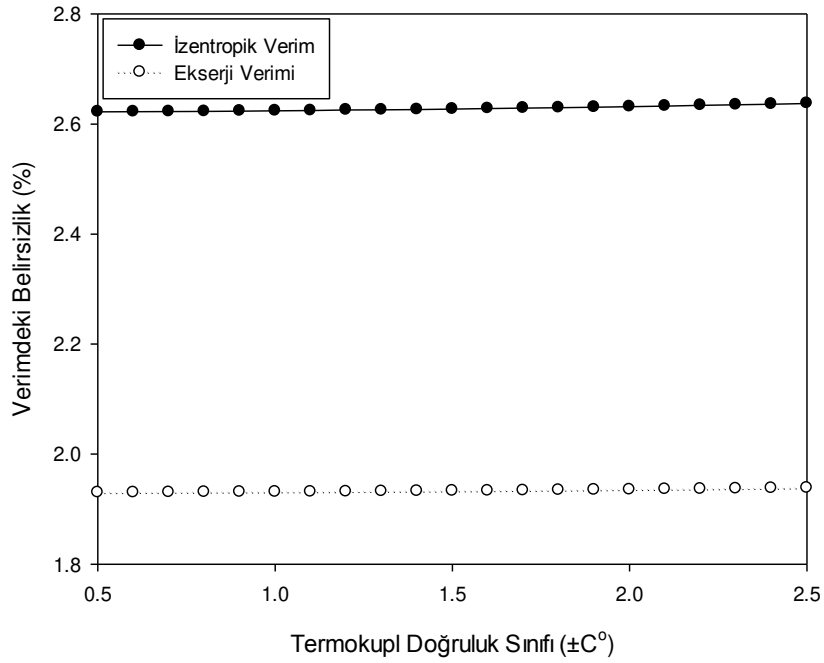
Çıkış Gücü (%)	İzentropik Verim (%)	İzentropik Verim Belirsizliği (%)	Ekstrem Minimum (%)	Ekstrem Maksimum(%)	Ekserji Verimi (%)	Ekserji Verimi Belirsizliği (%)	Ekstrem Minimum (%)	Ekstrem Maksimum(%)
100	88,71	2,62	83,16	94,57	94,00	1,50	91,29	97,02
85	84,99	2,72	79,76	90,51	91,59	1,68	88,94	94,54
80	83,55	2,75	78,41	88,97	90,62	1,75	87,97	93,54
60	82,42	3,21	76,78	88,43	89,93	2,07	86,87	93,28
40	72,05	3,35	66,69	77,74	82,60	2,55	79,37	86,02

YBT için gerçekleştirilen hassasiyet analizi basınç ve sıcaklık ölçerlerin doğruluk sınıfı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bugün ticari piyasada doğruluk sınıfı tam skala üzerinden 0,25/0,6/1,0/1,6/2,5 ve 4,0 olan basınç ölçerler ile IEC584-2 standardına göre I. Sınıf: ±1,0 veya 1+(t-1000)*0,003; ±1,5 veya 0,004t II. Sınıf: ±1,5 veya ±0,0025t; 2,5 veya ±0,0075t olan termokupllar bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Basınçölçer sınıfına göre YBT'nin izentropik ve ekserji verimindeki belirsizliklerin değişimi

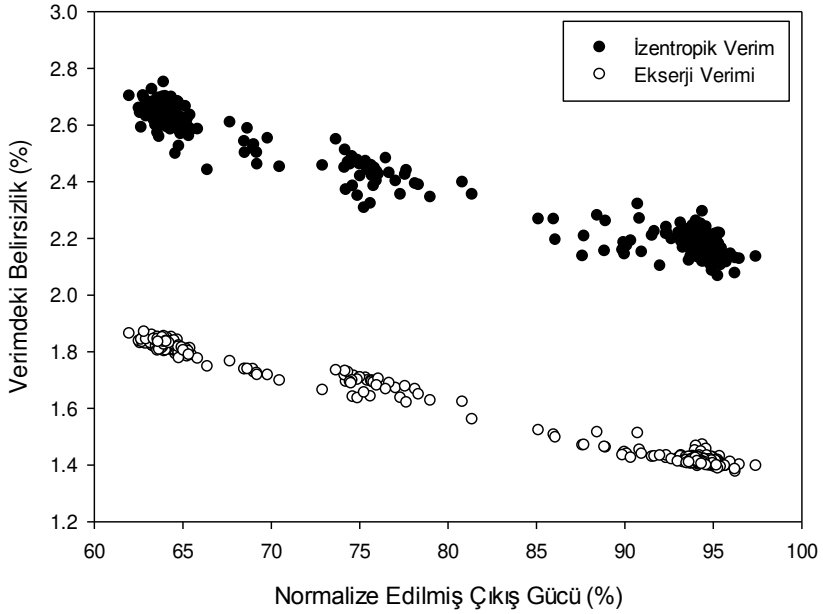
Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 santral tam güçte iken (%100) YBT'nin basınç ölçer ve termokupl sınıfına göre izentropik ve ekserji verimindeki belirsizliğin değişimini göstermektedir. Her iki verimin, sıcaklık yerine basınç ölçümüne karşı daha hassas olduğu anlaşılmaktadır. Hem İzentropik verim hem de ekserji verim hassasiyeti basınçölçerin doğruluk sınıfıyla doğrusal bir ilişki içindedir ancak bu ilişki izentropik verimin eğiminin yüksek olması nedeniyle ekserji verimine göre daha güçlüdür. Bunun nedeni Eş. 5.14 ve Eş. 5.17'deki kısmı türev ifadelerinden izentropik verimle ilgili olanının ekserji veriminin ilgili terimine göre daha büyük olmasıdır. Sıcaklık ölçüm sınıfının ise her iki verim türü için çok etkili olmadığı gözlemlenmektedir. Söz konusu etkinin genelde



Şekil 5.5. Termokupl sınıfına göre YBT'nin izentropik ve ekserji verimindeki belirsizliklerin değişimi

sabit olarak seyrettiği söylenebilir. Eş. 5.15. ve Eş. 5.18.'de sıcaklıkla ilgili kısmı türev terimlerinin büyüklüğün yüksek olmaması bu durumu açıklamaktadır.

Gerçek verilerle yapılan belirsizlik analizinde santralin DCS'inden her üç dakikada bir alınan verilerden Eş. 5.14-Eş. 5.19 arasındaki ifadeler hesaplanmıştır. Bu yapılırken basınç ölçümü belirsizliği santralde hali hazırda kullanılan ölçü kontrol sistemlerine uygun olarak w_P 1,67 bar sıcaklık ölçümü belirsizliği ise ±0,5 ºC alınmıştır. Şekil 5.6 santralin farklı çıkış güçlerindeki izentropik ve ekserji verimi için oluşan belirsizlikleri göstermektedir.



Şekil 5.6. Üçüncü ünitenin 25 Mayıs 2011 günü içerisinde santralin çıkış gücüne göre YBT'nin izentropik ve ekserji verimi belirsizlikleri

Şekil 5.6 aynı zamanda santralin çevrimiçi belirsizlik grafiği olarak değerlendirilebilir. Gerçek verilerle yapılan analizde de ekserji verimindeki belirsizliğin izentropik verim belirsizliğinden daha düşük olduğu görülmektedir. Önceki analizlerde de görüldüğü gibi ekserji verimindeki türevsel ifadelerin büyüklüğü, izentropik verimdeki benzer ifadelere göre daha küçük olduğundan bu beklenen bir sonuç olmuştur.

6. TERMOEKONOMİK ANALİZ VE OPTİMİZASYON

Termoekonominin gelişim tarihini açıklayan El Sayed 1960'larda başlayan maliyet ve verim arasındaki ilişkiyi nicelleştirme çabalarının halen devam ettiğine işaret etmektedir [El Sayed, 2003]. Öte yandan geleneksel enerji ve ekserji analizi bir santralin termoekonomik performansına ilişkin sınırlı bir resim çizebilmektedir. Ekserji analizinin bir bakış açısı getirebilmesine karşın santrale has bir dizi koşul ve sınır şartının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sınır şartlarından en önemlisi Bir Değere İndirgenmiş Elektrik Üretim Maliyeti (Levelized Cost of Electricity-LCOE) dir. Termoekonomik bir analiz yapabilmek için LCOE bir sınır şartı olarak hesaplanmalı ve ekserji analizi ile birleştirilmelidir.

6.1. Temel Ekonomik Tanım ve Veriler

Bir yatırımı değerlendirmede kullanılan ekonomik terminoloji ve anlam; mühendisler, ekonomistler ve bilim adamları arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Bu bölümde yer alan ekonomik tanımlar Bejan ve arkadaşlarının kullandıkları ve endüstride kullanılan temel terminolojiyi esas almaktadır.

Doğrudan ve dolaylı maliyet kalemlerini içeren Sabit Kapital Yatırım (Fixed Capital Investment) tesis arsası, tesisin inşaatı ve işletmeye alınması maliyetlerini kapsamaktadır. Doğrudan maliyetler, santralin inşa edilip işletmeye alınabilmesi için gereken tüm malzeme ve ekipman maliyetlerini, işçilik giderlerini ve diğer kaynak giderlerini kapsamakta iken dolaylı maliyetler mühendislik, süpervizyon, yüklenici karı ve proje ihtiyat kalemlerini içermektedir. Doğrudan maliyet saha içi ve saha dışı maliyetler olarak da ikiye ayrılabilir. Saha içi maliyetler kalıcı ekipman ve sistem maliyetlerine karşılık gelirken saha dışı maliyetler alt yapı giderleri, kamulaştırma ve diğer hizmet tesislerini kapsamaktadır. Toplam Kapital Yatırımı (Total Capital Investment-TCI) ise FCI ve deneme üretimi maliyetleri, işleyen kapital

(working capital), lisanslama ücretleri ve inşaat sırasında fonların kullanımı (Allowance for Funds During Construction-AFUDC) gibi diğer maliyet kalemlerini içermektedir.

Literatürde, iş sahibi maliyetleri ve Mühendislik-Satınalma maliyetleri (Engineering Procurement Costs-EPC) gibi sıkça kullanılan başka terimler de bulunmaktadır. İş sahibi maliyetleri arasında kamulaştırma veya arazi bedeli, arazideki diğer altyapılar, lisanslama giderleri, bazı vergiler, iletim hatlarının kapasitesinin arttırılması, su alma ve işleme sistemleri, ambarlar, yollar, şalt sahası ve proje yönetim giderleri sayılabilir. EPC maliyetleri arasında ise inşaat işleri, ekipman ve malzemeler, yedek parçalar, nakliye ve sigorta, tesisin inşa edilmesi ve devreye alınması, eğitim ve süpervizyon maliyetleri bulunmaktadır.

Yukarıda sözü edilen tanımlamalar bazen birbirleriyle kesişmekte bazen de aynı anlama gelen tanımlamalar yapılabilmektedir. Afşin-Elbistan B Termik Santrali için literatüre uygun maliyet kalemleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Afşin-Elbistan B Termik Santrali temel maliyet parametreleri (1998 ABD doları) [TEAŞ Genel Şartname, 1998;hesaplamalar]

Doğrudan Maliyetler		**Dolaylı Maliyetler**	
Saha içi Maliyetler		*Malzeme ve Ekipmanın Nakliye ve Sigortası*	21 625 750,80
Kazan		*Kazan*	21 625 750,80
Malzeme ve Ekipman	772 154 477 ,30	*Elektrik*	1 555 496,19
İnşa Etme ve İşletmeye Alma	4 538 006,70	*BGA*	904 751,73
Elektrik		*İnş. İşl. ve Yrd. Ekipm.*	6 933 831,39

Çizelge 6.1 (Devam). Afşin-Elbistan B Termik Santrali temel maliyet parametreleri (1998 ABD doları) [TEAŞ Genel Şartname, 1998;hesaplamalar]

Malzeme ve Ekipman	38 627 678,19	**Ara toplam**	31 019 830,10
İnşa Etme ve İşletmeye Alma	1 343 262,58	**SABİT KAPİTAL YATIRIM**	1 212 147 701,17
BGA		**Diğer Maliyetler**	
Malzeme ve Ekipman	84 398 874,40	*Deneme İşletmesi Giderleri*	35 625 000,00
İnşa Etme ve İşletmeye Alma	1 068 604,40	*Lisans Maliyeti*	100 000,00
İnşaat İşleri ve Mekanik Bileşenler	222 708 257,60	*AFUDC*	122 044 139,21
Ara toplam	1 124 839 161,17	**Ara toplam**	155 769 139,21
Saha dışı Harcamalar		**TOPLAM KAPİTAL YATIRIM**	1 367 916 840,38
Alt ve üst yapı	46 913 709,90		
Arsa Maliyeti	9 375 000,00		
Ara toplam	56 288 709,90		

Birçok mühendislik hesabında olduğu gibi ekonomik hesaplamalarda belirli kabuller içermektedir. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 hazırlanırken ve diğer hesaplamalarda kullanılan kabuller bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

Çizelge 6.2. Afşin-Elbistan B Termik Santrali iş sahibi giderleri, EPC maliyeti [TEAŞ Fizibilite Raporu, 1996;TEAŞ Genel Şartname 1998;hesaplamalar]

İş Sahibi Maliyeti	Bedel	EPC	Bedel
Kamulaştırma	9 375 000,00	İnşaat İşleri	269 621 967,50
Çevre Etki Değerlendirme	100 000,00	Kalıcı Ekipman	895 181 029,89
Şantiye Giderleri	59 800 000,00	Yedek Parçalar	22 959 673,09
Gümrük, Vergi, Resim ve Harçlar	31 818 000,00	Nakliye ve Sigorta	32 016 533,70

Çizelge 6.2 (Devam). Afşin-Elbistan B Termik Santrali iş sahibi giderleri, EPC maliyeti [TEAŞ Fizibilite Raporu, 1996;TEAŞ Genel Şartname 1998;hesaplamalar]

İşletme Sermayesi	16 497 000,00	İnşaat ve İşletmeye Alma	6 949 873,68
Beklenmeyen Giderler	11 875 000,00	Eğitim ve Süpervizyon	614 531,84
Toplam	129 465 900,00	Toplam	1 227 343 609,70
Gecelik Maliyet (İş sahibi maliyeti +EPC)			1 356 809 509,70
kW başına Gecelik Maliyet ($/kW)			942

6.2. Ekonomik Hesaplamalardaki Temel Kabuller

Afşin-Elbistan B Termik Santralinin FCI, TCI ve EPC maliyetleri hesaplanırken ilgili sözleşme referans alınmıştır. Ancak, konsorsiyum üyelerinin orijin şirketlerinin bulunduğu ülkelere göre sözleşme kapsamındaki ekipman ve malzemeler, nakliye ve sigorta giderleri gibi pek çok kalem ABD doları, Alman markı, Japon yeni ve Fransız frangı gibi dört farklı para birimi üzerinden fiyatlandırılmıştır. Tüm bu maliyetler sözleşme tarihi olan Temmuz 1998'de Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'nın çapraz kurları üzerinden ABD dolarına çevrilmiştir.

Kamulaştırma masrafları 1996 değerini yansıtmakta olup sözleşme tarihine taşınmamıştır. Normalde mühendislik ve süpervizyon maliyetlerini içermesi gereken dolaylı maliyetler bu kalem altında verilememektedir çünkü sözleşme malzeme/ekipman ve inşa/işletmeye alma giderlerinde böyle bir ayrıma gitmemektedir. AFUDC değeri gerçekleşen değerden daha yüksek hesaplanmaktadır bunun nedeni kredi ödemelerinin eşit taksitler halinde yapıldığı kabulüdür. Gerçekte ise kredi ödemeleri inşaatın ve yapım işlerinin gereklerine göre doğrusal olmayan biçimde kullanıldığından bu değer daha düşük olacaktır. Ayrıca faiz oranları geri ödeme dönemi öncesi ve sonrası farklı değerlere sahiptir. LCOE hesapları yapılırken geri ödeme öncesi ve

sonrası dönemin ağırlıklı ortalamasını esas alan tek bir faiz oranı kullanılmıştır. Çizelge 6.1'de gösterilen FCI değeri, sözleşmede yer alan iş başı eğitim, gerekli ve tavsiye edilen yedek parçalar ve diğer bazı maliyetleri içermemektedir.

LCOE hesaplarında santralin devreye geçtiği tarihten itibaren oluşan birim elektrik üretimi başına yakıt ve işletme maliyeti eğilimlerinin santralin ileriki yıllarında da aynı biçimde süreceği öngörülmüştür. Ayrıca tüm LCOE hesapları için santralin ekonomik ömrü 20 yıl olarak öngörülmüştür. Bu sürenin sonunda oluşan santralin hurda maliyetinin santrali sökülme masraflarını karşıladığı varsayılmaktadır (zero salvage value).

Burada bahsedilmeyen diğer kabul ve sınır şartları ilgili alt bölümlerde açıklanmaktadır.

6.3. LCOE Analizi

LCOE analizi, bir santralin ömrü boyunca üreteceği elektrikten elde edeceği gelirleri, santralin kurulması ve işletilmesi için harcanan tüm giderlere eşitleyen birim elektrik üretim maliyetidir [IAEA, 2000]. LCOE özellikle farklı teknolojilerinin elektrik üretim maliyetlerini karşılaştırmada kullanılan önemli bir yöntemdir. Mali analizin amacına göre basitleştirilmiş ve ileri olarak adlandırılan çeşitli LCOE analizleri mevcuttur.

Santralin ömrü boyunca üreteceği elektriğin gelirlerini, santralin kurulması ve işletilmesi giderlerine eşitleyen satışa esas birim maliyet [IAEA, 2000]:

$$\sum \text{Şimdiki Değer (elektrik gelirleri)} = \sum \text{Şimdiki Değer (tüm giderler)} \qquad (6.1)$$

$$\sum_{t=t_0}^{T_L} \frac{C_{lev} E_t}{(1+d)^{t-T_D}} = \sum_{t=T_B}^{T_E} \frac{C_t}{(1+d)^{t-T_D}} \qquad (6.2)$$

Eş. 6.1 ve Eş. 6.2 ile verilebilir. Burada C_t t yılında santralin toplam maliyetini (kapital, yakıt, işletme-bakım), E_t t yılında üretilen elektrik enerjisini (kWh), d indirgenme oranını, T_B ihale çıkış referans tarihini, T_D indirgenmenin yapıldığı tarihi, T_0 ticari işletmenin başladığı tarihi, T_L santralin ekonomik ömrünü, T_E santralin sökülme tarihini göstermektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) Eş. 6.1 ve Eş. 6.2'de gösterilen yaklaşımı nükleer santral ihalelerinin teklif değerlendirilmesinde kullanılmasını tavsiye etmektedir. Afşin-Elbistan B Termik Santrali bir kömür santrali olduğundan, sökülme tarihi eşitlikten çıkarılmış ayrıca T_D değeri santralin ticari işletmeye başladığı tarih alınarak Eş. 6.2'de bazı sadeleştirmeler yapılmıştır.

Yukarıda açıklananlara ek olarak Eş. 6.2 kullanılırken dikkat edilmesi gereken başka hususlar da bulunmaktadır. Her kuruluşa has değişkenlik gösterebilen indirgenme oranı, LCOE değerinin nominal veya gerçek alınıp alınmaması örnek olarak verilebilecek noktalar arasındadır. Çalışmada kullanılan indirgenme oranı ticari referans faiz oranlarının (Commercial Interest Reference Rates) CIRR bir fonksiyonu olarak Eş. 6.3'deki gibi alınmıştır.

$$d = (100 * CIRR + 0.25 * (10 - CIRR))/100 \quad (6.3)$$

Burada yer alan CIRR sözleşmenin imza tarihindeki değer olarak alınmıştır. CIRR değerleri dinamik olarak aydan aya projenin tipi, kredinin vadesi, kamu veya özel sektöre göre değişiklik arz etmektedir.

6.3.1. Ekonomik ömür giderleri

Afşin-Elbistan B Termik Santrali gibi bir santralin ömür giderleri arasında yatırım maliyeti, yakıt, işletme-bakım giderleri bulunmaktadır. Yatırım maliyetleri iş sahibi giderleri ve TCI gibi kalemlerden oluşmaktadır (Bkz Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2). %100 kredili anahtar teslim olarak ihale edilen santralin kredi maliyetleri fizibilite [TEAŞ Fizibilite Raporu, 1996]

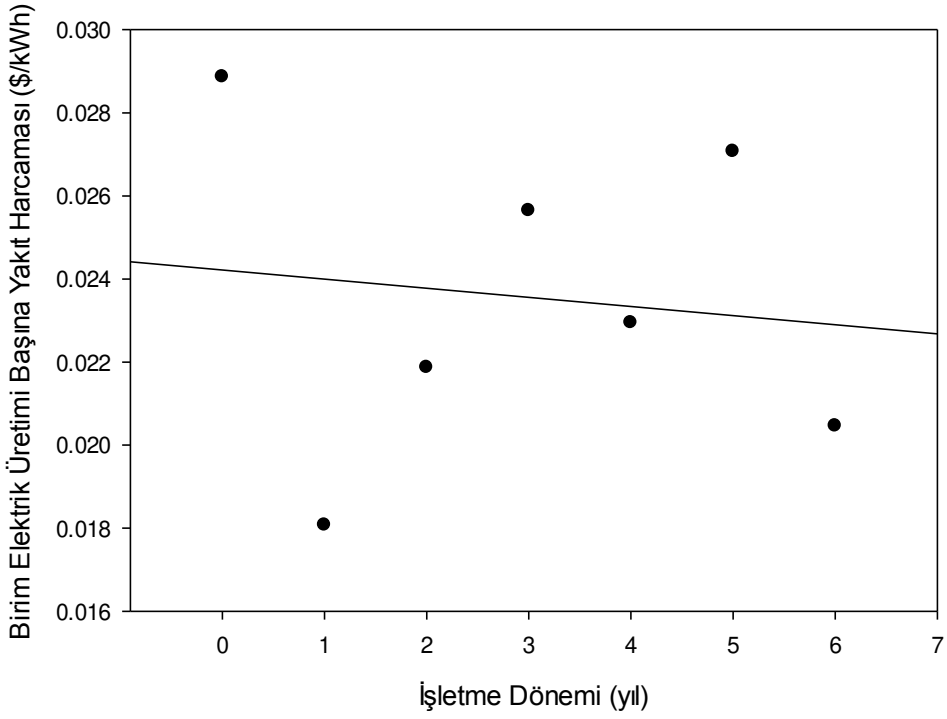
çalışmalarındaki koşullara uygun olarak hesaplanmıştır. Gerçekte santralin yapımında çok çeşitli krediler kullanılmıştır ancak yatırıma kara verilirken fizibilite raporları geçerli olduğundan LCOE analizinde de aynı yaklaşımdan yararlanılmıştır.

İki farklı kredi ile inşa edildiği öngörülen santralin indirgenme oranı, taahhüt, yönetim giderleri ve ödeme koşulları Çizelge 6.3'de verilmektedir.

Çizelge 6.3. Afşin-Elbistan B Termik Santrali için örnek alınan kredi ve ekonomik parametrelere ait karakteristik (1998 ABD doları) [TEAŞ Fizibilite Raporu, 1996;hesaplamalar]

	Kredi A (%60,55)	**Kredi B (%39,45)**
Miktar ABD doları	733 920 758,06	478 226 943,11
CIRR (%)	6,63	6,63
Yönetim Masrafı (%)	0,5	0,5
Taahhüt Masrafı (%)	0,5	0,5
Geri Ödeme Dönemi (ay)	120	60
İndirgenme Oranı (%)	9,11	9,11
Faiz Oranı (%)	5,42	6,67

Yakıt giderleri santralin işletmeye geçtiği 2005 yılında bu yana elde edilen gerçek verilerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Yakıt giderlerini üretilen enerjiye göre formülize edebilmek için her yıldaki yakıt giderleri ABD dolarına çevrilerek o yıl üretilen satışa esas net elektrik enerjisine bölünmüştür. Birim elektrik üretimine göre oluşan yakıt maliyeti hafif bir biçimde azalan eğilime sahiptir bunun nedeni Türk lirasının ABD doları karşısında yıllara sari değişkenlik göstermesi ve diğer bazı faktörlerin yakıt fiyatı içerisine gömülü olmasındandır.



Şekil 6.1. Santralin işletmeye geçtiği yıldan itibaren oluşan birim elektrik üretimi başına yakıt harcaması

Şekil 6.1'deki birim elektrik üretimi başına yakıt harcamasına dağılımına ait regresyon ifadesi,

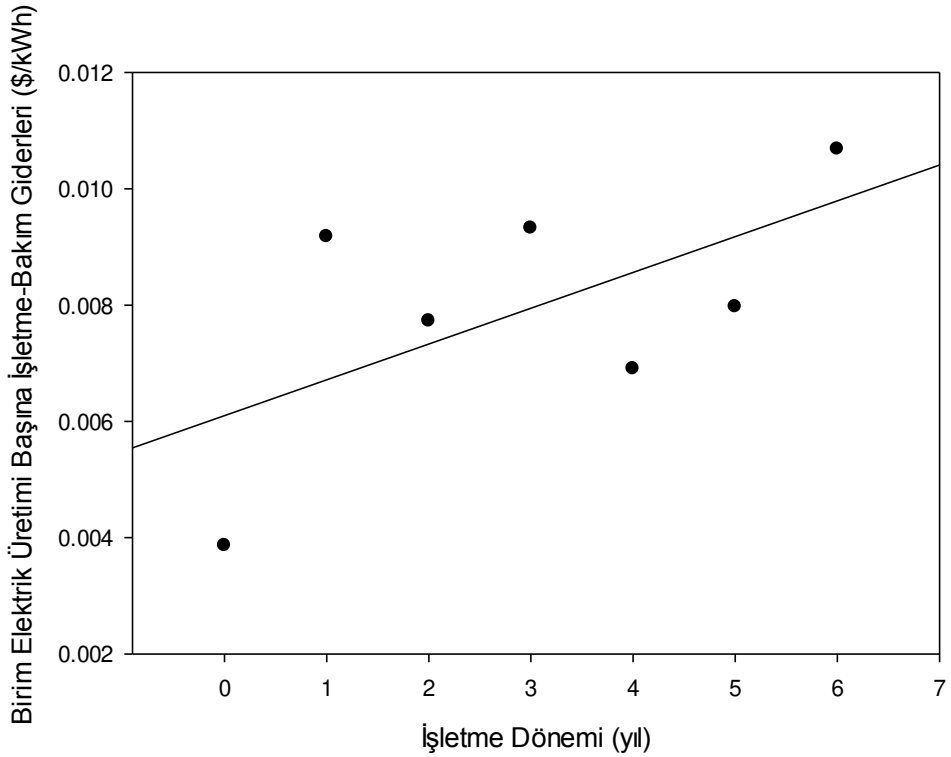
$$C_{kömür} = -2.197 * 10^{-4} t + 0.024218 \quad (6.4)$$

ile verilmektedir. Burada t yılı $C_{kömür}$ ise birim elektrik üretimi başına yapılan yakıt harcamasıdır (dolar/kWh).

İşletme ve bakım giderleri de benzer biçimde yani gerçek veriler ışığında ele alınmıştır. Gerçekte işletme ve bakım giderleri sabit ve değişken maliyet bileşenlerinden oluşur ancak tutulan veriler böyle bir ayrıma gitmediğinden birim elektrik üretimine endekslenerek tek bir değerde birleştirilmiştir (Şekil 6.2):

$$C_{O\&M} = 6.15487 * 10^{-4}t + 6.1009 * 10^{-3} \quad (6.5)$$

Burada t yine yılı, $C_{O\&M}$ birim elektrik üretimi başına yapılan işletme ve bakım giderlerini (dolar/kWh) göstermektedir. Eş. 6.4'ün azalan bir trende sahip olması yadırganabilir ancak uluslararası piyasa koşulları ve ulusal ekonomi dinamikleri nedeniyle emtia fiyatlarında iniş ve çıkışlar görülebilir. Oysa işletme ve bakım giderleri Eş. 6.5'te de görüleceği gibi asla azalmaz. Bunun nedeni örneğin işçilik gibi bazı kalemlerin hiçbir zaman için düşmemesidir. Bu bağlamda Eş. 6.4 ve Eş. 6.5'in toplamı beklendiği gibi artan bir eğilime sahip olacaktır.



Şekil 6.2. Santralin işletmeye geçtiği yıldan itibaren oluşan birim elektrik üretimi başına işletme-bakım giderleri

6.3.2. LCOE'de kullanılan teknik parametreler

Afşin-Elbistan B Termik Santralinin çevrim özellikleri önceki bölümlerde verilmişti. Bununla beraber LCOE analizinde veya diğer fizibilite çalışmalarında bir dizi teknik parametrenin de tanımlanması gerekir.

Çizelge 6.4. Ekonomik hesaplarda kullanılan temel teknik parametreler

Kurulu Güç	1 440 MW
Ünite Sayısı	4
İç İhtiyaç	BGA devrede iken %10
	BGA devrede değilken % 8,41
Nominal Çalışma Saati	8 760
Planlı Çalışma Saati	6 500
Emre Amadelik (%)	%74,20
Kabul Edilen Devreye Giriş Süreleri	
1. Ünite	42. ay
2. Ünite	48. ay
3. Ünite	54. ay
4. Ünite	60. ay

Çizelge 6.4'te hesaplamalarda kullanılan bazı teknik parametreler gösterilmektedir. Buna göre santralin iç enerji ihtiyacı BGA sisteminin kullanılıp kullanılmamasına göre %8,41 ile %10 arasında değişmektedir. Yıllık çalışma saati 6500 olarak planlanan santralin hedeflenen emre amadelik oranı %74,20 olmaktadır. Ünitelerin devre giriş tarihleri burada verilenden farklı olabilir ancak programda kolay formülize edilebilmeleri amacıyla altı aylık aralıklarla devreye girdikleri ve yine aynı aralıklarla ömürlerini tamamladıkları varsayılmıştır. Santralin öngörülen ekonomik ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir.

6.4. Termoekonomik Analiz

Termoekonomik analizde, santralin her bir bileşenine maliyet denge denklemleri uygulanmak suretiyle geleneksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Maliyet denge denklemleri bir sistemin ürün maliyetinin o ürünü oluşturmak için yapılan harcamalar olan yakıt fiyatı ve yatırım/işletme-bakım maliyetleri toplamı olduğunu ifade eder [Bejan ve ark., 1996]:

$$\dot{C}_{k,P} = \dot{C}_{k,F} + \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{O\&M} \tag{6.6}$$

Eş. 6.6'da k alt indisi k. termodinamik bileşeni, *P* alt indisi ürünü, *F* alt indisi yakıtı, $\dot{C}$ \$/s olarak maliyet oranını, $\dot{Z}$ \$/s olarak yatırım maliyet oranını veya işletme-bakım maliyet oranını, CI yatırım maliyetini, O&M işletme bakımı simgelemektedir. Burada sözü edilen ürün veya yakıt her termodinamik bileşenin girdi ve çıktısına karşılık gelmektedir.

Hem çevrimin hem de bileşenlerin termoekonomik analizlerinde ekserjinin kullanılması şarttır. Bir bileşene giren ve bu bileşenden çıkan çeşitli ısı ve iş etkileşimleri olabilir. Ekserji maliyetlendirmesinde ekserjinin birim maliyeti,

$$\dot{C} = c\dot{E} = c(\dot{m}e) \tag{6.7}$$

İle tanımlanmaktadır. Burada *c* birim ekserji başına ortalama maliyeti (\$/GJ), $\dot{m}$ kütlesel debiyi (kg/s) ve *e* spesifik ekserjiyi (kJ/kg) göstermektedir. Isı ve iş etkileşimleri için ise,

$$\dot{C} = c_w\dot{W} \text{ ve } \dot{C} = c_q\dot{E}_q \tag{6.8}$$

kullanılmaktadır. c_w ve c_q Eş. 6.7'de tanımlanan birim ekserji başına ortalama maliyet birimiyle aynı birime sahiptir.

Afşin-Elbistan B Termik Santraline has termoekonomik eşitlikler Çizelge 6.5'de verilmektedir. Çizelge 6.5'de yer alan eşitliklerin ekserji bilgisi önceki bölümlerden bilinmektedir. Yatırım ve işletme-bakım giderleri ise santralin ekonomik ömrü için LCOE hesapları ile belirlenmiştir. Malzeme ve ekipmanlar için fiyat kırılım ağacı incelenerek elde edilen $\dot{Z}$ değerleri Çizelge 6.6'da verilmektedir. Çizelge 6.6'da yer alan her denklemdeki $\dot{Z}$ değeri, incelenen bileşenin maliyetinin saha maliyetine oranı sabit kabul edilip bir değere indirgenmiş yatırım maliyeti veya işletme-bakım maliyeti ile çarpılarak hesaplanmıştır. Çalışma sadece bir ünite ile ilgili olduğundan ve santralde dört ünite bulunduğu için ilgili maliyetler önce dörde sonra ekipman sayısına bölünmüştür. Örneğin ısıtıcılar için $\dot{Z}$ değeri hesaplanırken, fiyat kırılımından ısıtıcılar ve dearatörün fiyatı bulunarak önce saha içi maliyete, sonra ünite sayısı olan dörde sonra yedi tane ısıtıcı olduğundan yediye bölünür. Elde edilen bu oran, santralin ömrünü baz alan bir değere indirgenmiş yatırım veya işletme-bakım maliyeti ile çarpılır. Kazanın malzeme ve bileşen kırılımı çok karmaşık olduğundan türbin-generatör, kondenser ve soğutma sistemi, BFPT, ısıtıcılar ve dearatör yatırım maliyetleri hesaplandıktan sonra kalan maliyet tamamen kazana atfedilmiştir. Benzer yaklaşım işletme bakım maliyetleri için de kullanılmıştır. Buna göre bir ekipmanın işletme-bakım giderindeki payı yatırım tutarındaki payla doğru orantılıdır.

Çizelge 6.5. Santralin incelenen bileşenleri için oluşturulan termoekonomik denge denklemleri, sınır şartları ve kabuller

Bileşen	Maliyet Denge Eşitliği	Yardımcı Eşitlik	Sınır Şartları ve Kabuller
Kazan	$c_{25}\dot{E}_{25} + c_{28}\dot{E}_{28} + c_F\dot{E}_{Kömür} + c_{35}\dot{E}_{35} + c_s\dot{E}_s + \dot{Z}_{Kazan} = c_{26}\dot{E}_{26} + c_{29}\dot{E}_{29} + c_{36}\dot{E}_{36} + c_{kül}\dot{E}_{kül}$	$\frac{c_{26}\dot{E}_{26} - c_{25}\dot{E}_{25}}{\dot{E}_{26} - \dot{E}_{25}} = \frac{c_{29}\dot{E}_{29} - c_{28}\dot{E}_{28}}{\dot{E}_{29} - \dot{E}_{28}}$	$\dot{C}_s = c_s\dot{E}_s = 0$ $\dot{C}_{kül} = c_{kül}\dot{E}_{kül} = 0$ $\dot{C}_{35} = c_w\dot{W}_{hava,komp}$ $\dot{C}_{Fuel} = LCOF + c_w\dot{W}_{kömür\ sistemi}$ $\dot{C}_{36} = c_w\dot{W}_{BGA\ ortak}$ $\dot{Z}_{SG} = (LCOI + LCO\&M) * 0.1402$
YBT	$c_{2'6}\dot{E}_{2'6} + \dot{Z}_{YBT} = c_{27}\dot{E}_{27} + c_E\dot{E}_E + c_A\dot{E}_A + c_B\dot{E}_B + c_w\dot{W}_{YBT}$	Yok	$c_{2'6} = c_{26}$ $c_{27} = c_{28}$ $\dot{Z}_{YBT} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0069$
OBT	$c_{2'7}\dot{E}_{2'7} + c_{29}\dot{E}_{29} + \dot{Z}_{OBT} = c_{30}\dot{E}_{30} + c_C\dot{E}_C + c_A\dot{E}_A + c_{1'7}\dot{E}_{1'7} + c_{21}\dot{E}_{21} + c_w\dot{W}_{OBT}$	$c_{30} = c_c = c_a = c_{1'7} = c_{21}$	$c_{2'7} = c_{27}$ $\dot{Z}_{OBT} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0069$
ABT	$c_{30}\dot{E}_{30} + c_D\dot{E}_D + \dot{Z}_{ABT} = c_{15}\dot{E}_{15} + c_{12}\dot{E}_{12} + c_9\dot{E}_9 + c_5\dot{E}_5 + c_{32}\dot{E}_{32} + c_w\dot{W}_{ABT}$	Yok	$\dot{Z}_{ABT} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0069$
BFPT	$c_{31}\dot{E}_{31} + c_F\dot{E}_F + \dot{Z}_{BFPT} = c_K\dot{E}_K + c_A\dot{E}_A + c_{33}\dot{E}_{33} + c_w\dot{W}_{BFPT}$	Yok	$c_{31} = c_{30}$ $\dot{Z}_{LPT} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0008$
Kondenser	$c_{34}\dot{E}_{34} + c_M\dot{E}_M + \dot{Z}_{Kondenser} = c_1\dot{E}_1 + c_M\dot{E}_M$	Yok	$c_{34} = c_{33}$ $c_{soğutma\ suyu} = 0$ $\dot{Z}_{ABT} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0098$

Çizelge 6.5 (Devam). Santralin incelenen bileşenleri için oluşturulan termoekonomik denge denklemleri, sınır şartları ve kabuller

Kondenser Pompası	$c_1\dot{E}_1 + c_w\dot{W}_{CP} + \dot{Z}_{KP} = c_2\dot{E}_2$	Yok	$\dot{C}_w = c_w\dot{W}_{KP}$ $\dot{Z}_{CP} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0098$
Isıtıcı 1	$c_3\dot{E}_3 + c_4\dot{E}_4 + c_5\dot{E}_5 + c_7\dot{E}_7 + \dot{Z}_{Isıtıcı1} = c_8\dot{E}_8 + c_{ć}\dot{E}_{ć}$	Yok	$c_4 = 0$ $\dot{Z}_{Isıtıcı1} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Isıtıcı 2	$c_{ć}\dot{E}_{ć} + c_9\dot{E}_9 + c_{11}\dot{E}_{11} + \dot{Z}_{Isıtıcı2} = c_7\dot{E}_7 + c_{10}\dot{E}_{10}$	Yok	$\dot{Z}_{Isıtıcı2} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Isıtıcı 3	$c_{10}\dot{E}_{10} + c_{12}\dot{E}_{12} + c_{14}\dot{E}_{14} + \dot{Z}_{Isıtıcı3} = c_{11}\dot{E}_{11} + c_{13}\dot{E}_{13}$	Yok	$\dot{Z}_{Isıtıcı3} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Isıtıcı 4	$c_{13}\dot{E}_{13} + c_{15}\dot{E}_{15} + \dot{Z}_{Isıtıcı4} = c_{14}\dot{E}_{14} + c_{16}\dot{E}_{16}$	Yok	$\dot{Z}_{Isıtıcı4} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Dearatör	$c_{16}\dot{E}_{16} + c_{17}\dot{E}_{17} + c_{18}\dot{E}_{18} + \dot{Z}_{Dearatör} = c_{19}\dot{E}_{19}$	Yok	$\dot{Z}_{Dearatör} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Isıtıcı 6	$c_{20}\dot{E}_{20} + c_{21}\dot{E}_{21} + c_{23}\dot{E}_{23} + Z_{Isıtıcı6} = c_{22}\dot{E}_{22} + c_{18}\dot{E}_{18}$	Yok	$\dot{Z}_{Isıtıcı6} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$
Isıtıcı 7	$c_{22}\dot{E}_{22} + c_{24}\dot{E}_{24} + \dot{Z}_{Isıtıcı7} = c_{23}\dot{E}_{23} + c_{25}\dot{E}_{25}$	Yok	$\dot{Z}_{Isıtıcı7} = (LCOI + LCO\&M) * 0.0004$

Çizelge 6.6. $\dot{Z}$ değeri hesabında kullanılan çeşitli bileşenlerin yatırım bedeli (saha içi maliyetler) içerisindeki payları

Yatırım Oranı (%) (Bileşen Fiyatı/Saha içi Maliyet)	Santral	Ünite
Türbin-Generatör (4 takım)	8,30	0,69
Kondenser ve Soğutma Sistemi (4 takım)	3,93	0,98
BFPT (4 takım)	0,33	0,08
Isıtıcılar ve Dearatör (4*7 takım)	1,09	0,04
Kazan ve Yardımcıları (4 takım)	56,08	14,02

Bir ürünün birim ekserji başına ortalama maliyet analizinin termodinamik bileşendeki verimsizliklerin gerçek nedenini belirlemede çok yeterli olmadığı iddia edilmektedir [Zhang ve ark., 2006]. Ancak bu çalışmada sınır şartlarının bir termodinamik bileşenin girdi çıktı maliyetlerini nasıl değiştireceğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır.

6.5. Optimizasyon

Optimizasyon kavramı geniş bir yelpazede değerlendirilebilecek nitelikte bir kavramdır. Günümüzde elektrik üretim faaliyetlerindeki optimizasyon problemleri çok yönlü boyutlara sahip olduğundan bütün koşulları gözeten çözümler oldukça kompleks ve ileri teknikleri gerektirebilmektedir. Örneğin, 50 yıl öncesine kadar elektrik üretiminde enerji verimi ve maliyet temel değişken olarak görülürken; bugün çevresel etkiler, özellikle elektriğin serbest piyasadaki şartları, frekans kontrolüne katılım zorunluluğu, işletme güvenliği gibi çok çeşitli etki ve faktörlerin bir arada olduğu multi-disipliner değişkenlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu değişken kategorileri arasında termodinamik, tasarım, çevre, ekonomi, şebeke gerekleri sayılabilir.

Çalışmada gerçekleştirilen optimizasyon ekserji verimi, primer frekans kontrolüne katılım, enerji talebi ve BGA'nın devrede olduğu çevresel koşullar gibi bir dizi değişkeni esas almakta öte yandan karbon vergisi gibi çevresel

etkileri optimizasyon içerisine dahil etmemektedir. Bunlara ek olarak, optimizasyon tamamen işletmesel değerler üzerinden hedef fonksiyonu gerçekleştirmeye çalışmaktadır.

6.5.1. Hedef fonksiyon

Burada ele alınan hedef fonksiyon primer frekans kontrolü altında çalışan ünitenin, BGA sistemi devrede iken YBT'nin ve santralin ekserji verimini mümkün olan en üst düzeyde tutan minimum LCOE değeridir. Bu fonksiyon matematiksel olarak ifade edilecek olursa:

$$Minimize\ LCOE = F\big(\{PFK, BGA\}; maksimum(\zeta_{YBT}, \zeta_{çevrim})\big) \quad (6.9)$$

Fonksiyonun ilk iki terimi ünitelerin uymak zorunda olduğu koşulları gösterirken sonraki terimler termodinamik değişkenlerden gelen amaçları temsil etmektedir. BGA ile ilgili koşul, çevresel bir ceza ödenmemesi için zorunlu bir koşuldur ve burada yapılan analizde bulunması yeterlidir. Gerçekte LCOE değerinin satışa esas elektrik üzerinden değerlendirilmesine karşın iç ihtiyacın LCOE üzerine etkisi çok küçük olduğundan (Bkz Şekil 6.4) BGA'nın LCOE üzerindeki bu minör etkisi dikkate alınmamıştır. Ancak, PFK santralin çıkış gücü üzerine ciddi bir kısıtlama getirdiğinden LCOE üzerine olan etkisi hatırı sayılır bir düzeydedir ve bu nedenle optimizasyonun PFK dikkate alınarak yapılması gerekmektedir. Son iki terim ise fonksiyonun, ilk iki terimdeki kısıtlamalar dahilinde mümkün olan en yüksek ekserji verimini hedeflediğini göstermektedir.

<u>Primer frekans kontrolü etkisi</u>

Primer Frekans Kontrolü (PFK) şebeke frekansının düşmesine veya yükselmesine tepki olarak ünite aktif güç çıkışının hız regülatörü ile otomatik arttırılması veya düşürülmesi yoluyla sistem frekansının yeni bir denge

noktasına getirilmesidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim yapan tesisler hariç, kurulu gücü 50 MW ve üzerinde olan tüm elektrik üretim tesislerinin primer frekans kontrolüne katılması gerekmektedir.

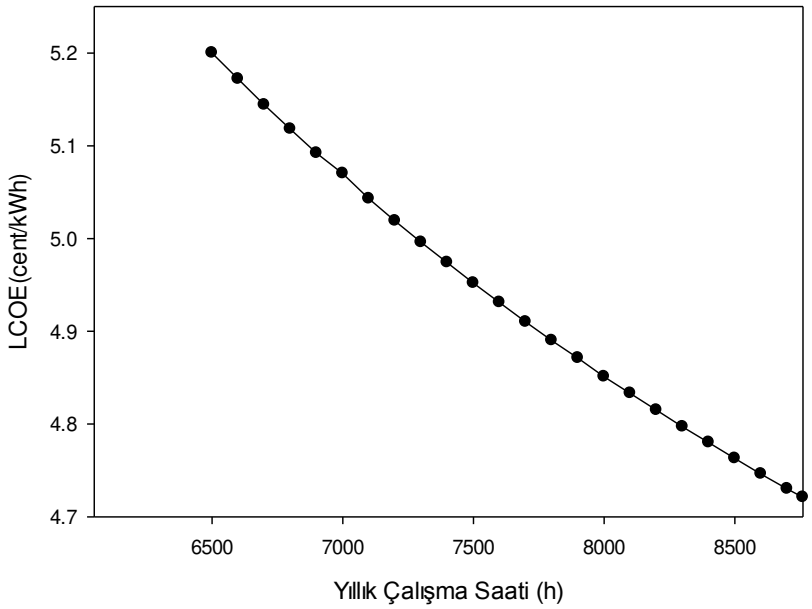
PFK katılım oranı tüzel kişiliğin kurulu gücünün %2'si olarak uygulanmaktadır. Bu oran sahip olunan santral ve ünitelerine istenilen biçimde dağıtılabilir. Örneğin, Afşin Elbistan B Santrali 1 440 MW kurulu güce sahip olduğundan 28,8 MW gücünde primer frekans rezervi tutması gerekir. Bu rezervi isterse sadece tek ünitede tutabilirken isterse 4 ünitesinin her birine 7,2 MW olarak yansıtabilir. Bu bölümde yapılan optimizasyonda her ünitenin 7,2 MW primer frekans rezervi tuttuğu bir başka deyişle 352,8 MW nominal gücünde çalışarak gerektiğinde 345,6-360 MW aralığında yük alıp yük atabileceği öngörülmüştür.

6.6. Sonuçlar

LCOE analizi sonuçları, termoekonomik analiz ve optimizasyon sonuçları ile sonuçların literatür bulgularıyla karşılaştırılması bu bölümde yapılmaktadır.

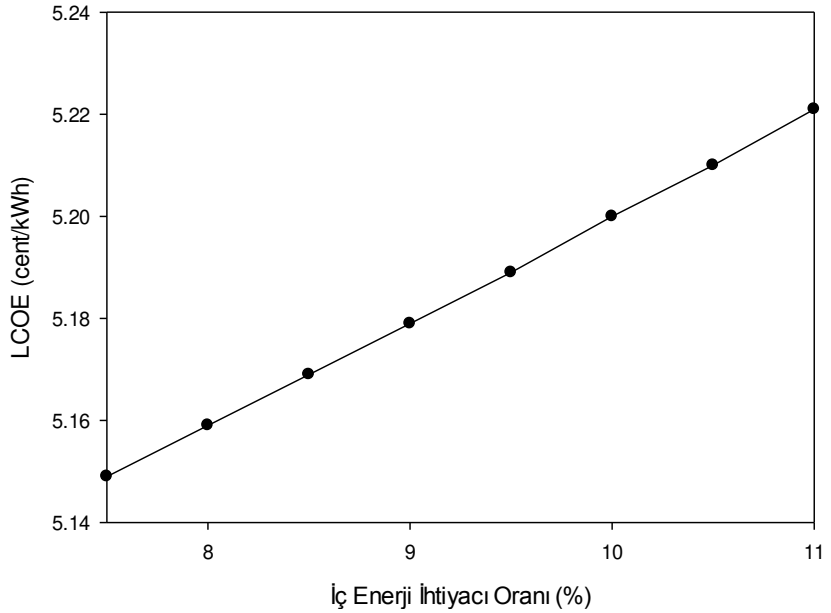
6.6.1. LCOE analiz sonuçları

Şekil 6.3-Şekil 6.6 buraya kadar sözü edilen teknik ve ekonomik parametrelerin LCOE değerini nasıl etkilediğini göstermektedir. Diğer parametreler sabit tutulurken; yıllık çalışma saati, iç tüketim oranı ve indirgenme oranı LCOE ile büyük oranda doğrusal bir ilişki içindedir. Planlı bakım ve revizyonlar için yıllık 6500 saat olarak öngörülen santralin çalışma süresi %34,77 arttırıldığında, bir başka deyişle santral ömrü boyunca tam güçte hiç durmadan çalıştırıldığında LCOE değeri %9,21 oranında azalmaktadır (Şekil 6.3).



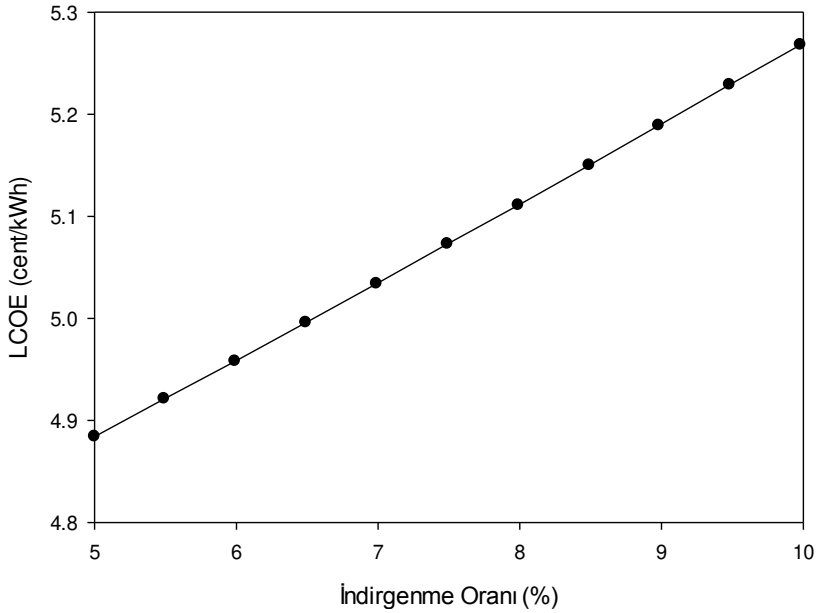
Şekil 6.3. Santralin planlanan yıllık çalışma saatini aşması durumunda LCOE değişimi

İç ihtiyacın LCOE üzerinde ne kadar etkili olduğunun da araştırılması gerekmektedir çünkü serbest piyasaya satılabilecek elektrik santralin içinde harcanmakta ve bir fırsat maliyeti oluşturmaktadır. Santral iç ihtiyacı BGA sisteminin devrede olup olmadığı aralık içinde %7,5 ile %11 arasında değiştirildiğinde, iç ihtiyaçta %46,67'lik bir artış (%7,5'tan %11'e çıktığında) LCOE değerini %1,40 oranında arttırmaktadır (Şekil 6.4). Oldukça doğrusal bir ilişki gösteren iç ihtiyaç LCOE üzerinde çok etkili görünmemektedir.



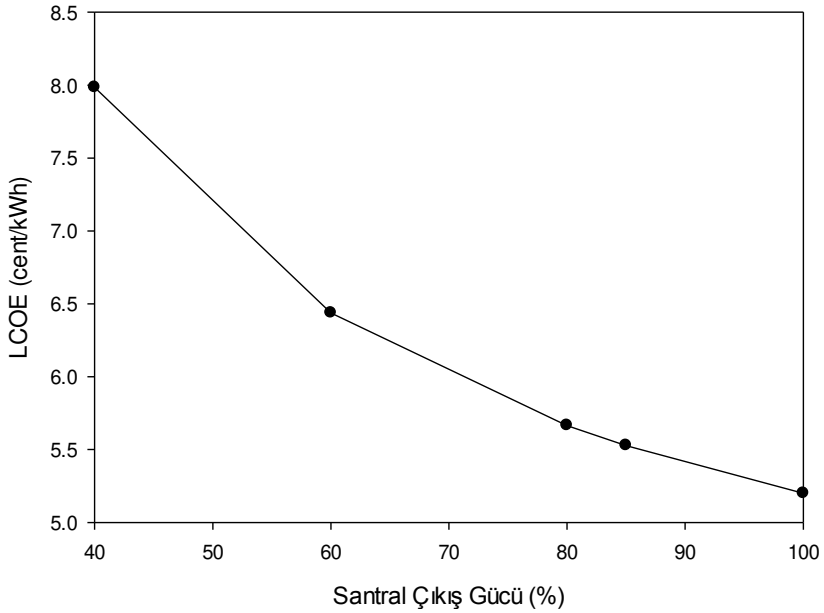
Şekil 6.4. Santral iç ihtiyacının LCOE üzerindeki etkisi

İndirgenme oranı LCOE analizinde en önemli ekonomik parametrelerin başında gelmektedir. Santralin ömrü boyunca elde edeceği tüm gelirleri ve yapacağı tüm giderleri aynı tarihe bu parametre ile getirilmektedir. Pek çok çalışma LCOE değerlerini ya %5 ya da %10 için vermektedir. İndirgenme oranı incelenen aralıkta (%5-%10 arasında) %99,6 oranında arttırıldığında LCOE değeri %7,86 oranında artmaktadır. İndirgenme oranı ülke riski, politik konjonktür, proje riski, iş sahibinin mali durumu, uluslararası piyasaların genel tablosu gibi bir dizi mali ve siyasi koşula bağlı olduğundan bu etkinin nasıl bir etki yarattığını görmek bakımından Şekil 6.5 önem taşımaktadır.



Şekil 6.5. Ekonomik hesaplamalarda kullanılan indirgenme oranının LCOE üzerine etkisi

Son olarak santralin çıkış gücü 360-144 MW aralığında değiştirildiğinde bir başka deyişle santral ömrü boyunca %100 güçte çalışmak yerine %40 güçte çalıştırıldığında LCOE değeri %53,56 oranında artmaktadır (Şekil 6.6). Şekil 6.6'da santralin bütün ömrü boyunca sanki aynı güç seviyesinde elektrik üretecekmiş gibi çalıştığı öngörülmektedir. Bu nedenle düşük güç seviyesinde LCOE değeri hızla yükselmektedir.



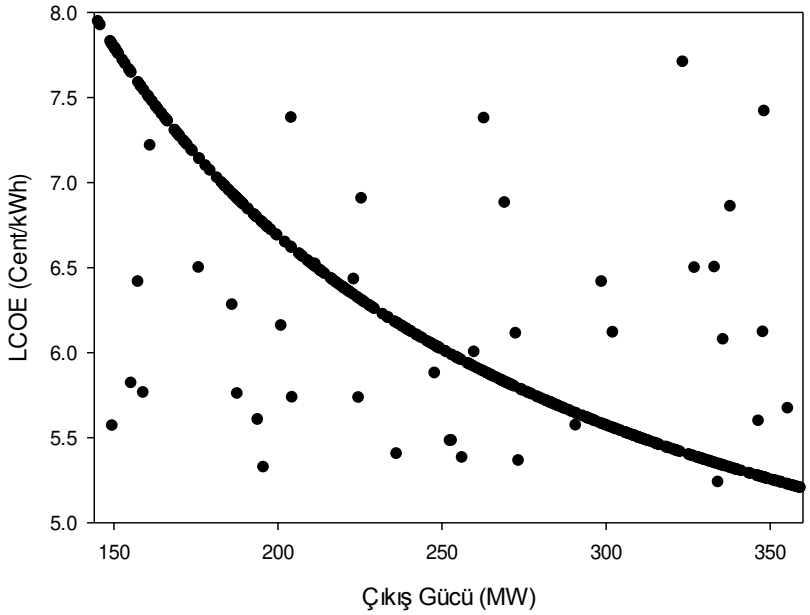
Şekil 6.6. Santral çıkış gücünün LCOE üzerine etkisi

Tüm bu parametreler değişebilecekleri aralık boyunca önemlerine göre sıralandıklarında Çizelge 6.7'de görüleceği gibi en büyük etkiyi santralin çıkış gücü yapmakta onu yıllık çalışma süresi, indirgenme oranı ve iç tüketim izlemektedir.

Çizelge 6.7. Çeşitli teknik ve ekonomik parametrelerin LCOE üzerindeki etkisi

Parametre	**LCOE Değişim Aralığı (cent/kWh)**	**Kabulden meydana gelen sapmaya göre normalize edilmiş LCOE etkisi (%LCOE/%parametre)**
Güç Çıkışı (%) (100-40)	+2.785	0.8927
Yıllık Çalışma Saati (h) (6500-8760)	-0.479	0.2649
İndirgenme Oranı (%) 9.11-5.0	-0.316	0.1347
İç İhtiyaç (%) 10-8.41	-0.0325	0.0393

Bir elektrik üretim santrali kurulmadan önce yapılan fizibilite çalışmalarında santralin genellikle %100 çıkış gücünde ve yılda 6500 saat (%74 kapasite kullanım faktörü) çalışacağı kabulüyle hesap yapılır. Gerçekte ise şebeke talebi, primer ve sekonder frekans kontrolü, doğal gaz alım anlaşmalarının yarattığı zorunluluklar, mevsimsel etkiler nedeniyle hidroelektrik kaynakların öncelik kazanması gibi bazı nedenlerle söz konusu kabuller doğruluk kazanmayabilir hatta bu nedenle santralin ömrü boyunca çok farklı güç seviyelerinde çalışacağı söylenebilir. Bu durumu simüle etmek amacıyla Monte Carlo analizi ile santralin ömrü boyunca 144-360 MW arasında rastgele güç seviyesinde çalıştığı kabul edilmiştir. %95'lik güvenlik payını (n bir örneklemdeki numune sayısını göstermek üzere, konservatif bir hata veya güvenlik payı $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ile gösterilir [Utts ve Heckard, 2006]) sağlamak amacıyla 400 rastgele çıkış gücü için LCOE değerleri hesaplanmıştır.

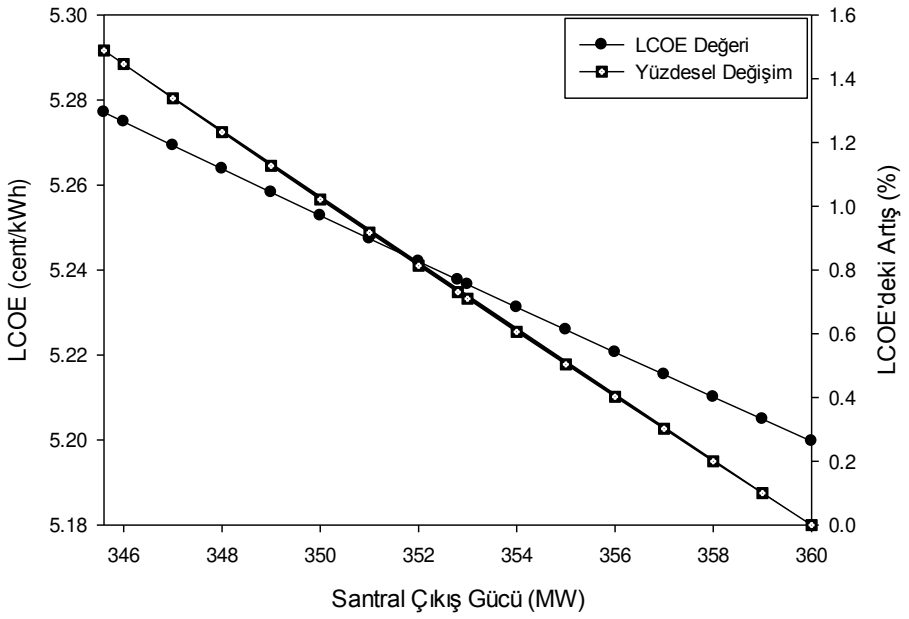


Şekil 6.7. Monte Carlo simülasyonu ile santralin ömrü boyunca rastlantısal farklı güç seviyelerinde çalışması durumunda oluşacak LCOE dağılımı

Şekil 6.7'de görüldüğü gibi pek çok nokta temel bir eğri oluşturmakta az sayıda diğer nokta ise dışarıda kalmaktadır. Söz konusu eğri santralin

rastlantısal çıkış gücüne bağlı olarak LCOE değerlerinin izleyeceği yolu göstermektedir. Buradaki analiz farklı bir LCOE değeri çıkarmak yerine santralin rastlantısal olarak izleyeceği çıkış gücüne karşılık LCOE'nin eğrisel bir değişime sahip olacağı göstermesi bakımından önemlidir. Monte Carlo analizleri yapılırken MS Excel'in rastgele sayı üreten S_Sayı_Üret() fonksiyonundan yararlanılmıştır. Gerçekte bu tip sayı üreten fonksiyonların motifleri son derece önemlidir. İdealde üretilen sayıların tamamen rastlantısal olması gerekir. Bu bağlamda burada yapılan Monte Carlo analizindeki sayısal rastlantı MS Excel'in başarabildiği ölçüyle sınırlıdır.

Rastlantısal güç seviyeleri için yukarıda sözü edilen analize ek olarak santralin Primer Frekans Kontrolüne (PFK) katılımının LCOE üzerine etkisinin araştırılması gerekmektedir. Bölüm 6.5'de açıklanan koşullar altında çalışan santral PFK katılımı Şekil 6.8'de görüldüğü gibi bir etki yaratmaktadır.



Şekil 6.8. Santralin primer frekans kontrolüne katılımının LCOE üzerine etkisi

En düşük LCOE değeri santral tam güçte çalışırken oluştuğundan bu değerin altında çalışılan her güç seviyesi LCOE'nin artmasına yol açacaktır. Santralin PFK'da çalışması gereken 352,8 MW güç seviyesinde LCOE 5,2377 cent/kWh'tir. PFK'nın gerektirdiği en düşük güç seviyesi olan 345,6 MW'da bu değer 5,2771 olmaktadır ki bu da GCC çıkış gücüne göre oluşan LCOE'nin %1,49 oranında üzerinde bir değere karşılık gelmektedir. Gerçekte LCOE değerindeki bu artışın dengeleme piyasasında oluşan parasal değerle karşılanması gerekmektedir.

Sonuçların literatürdeki bulgularla karşılaştırılması

Bir değere indirgenmiş maliyet analizi için en çok kabul gören kaynak Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Nükleer Enerji Ajansı (NEA) ve OECD işbirliği ile yayımlanan *Projected Costs of Generating Electricity* başlıklı raporlar serisidir. Bunun dışında MIT raporlar serisi arasında bulunan *The Future of Nuclear Power (2003), The Future of Coal (2007), Update of Future of Nuclear Power (2009) ve The Future of Natural Gas (2010)* adlı raporlar da referans sayılabilecek kaynaklar arasında sayılabilir. Ancak özellikle karşılaştırma amacıyla bir kaynak referans alındığında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta söz konusu referansın tarihidir. Geçmişte hesaplanan bir LCOE değerinin farklı bir tarihe taşınmasında standart bir yaklaşım bulunmamaktadır. Böyle bir taşıma, örneğin, Türkiye'deki Tüketici Fiyatları Endeksi (TÜFE) veya Üretici Fiyatları Endeksi (ÜFE) ile taşınabileceği gibi, faiz, bono ve tahvil gibi kıymetli fonların değişimi ile veya ABD'deki tüketici fiyatları endeksi (Consumer Price Index-CPI) veya Hand-Whitman gibi enerji sektörüne özelleşmiş endekslerle de yapılabilir. Bu kadar farklı yatırım aracı ve endekse göre yapılacak maliyet taşımalarının çok farklı sonuçlar vermesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle çok çeşitli ülkeye ait santrallerin yer aldığı, LCOE üzerine özelleşmiş olan ve Afşin-Elbistan B Termik Santralinin yapıldığı tarihe en yakın değerleri içeren kaynak [IAE-NEA-OECD, 2005] karşılaştırmada esas alınmıştır. 2005 yılında

yayınlanmasına karşın raporda verilen değerler 1 Temmuz 2003 yılını esas almaktadır.

Çizelge 6.8. Genel kabullerle yapılan bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyeti (LCOE) (birden fazla santrali olan ülkeler için ortalama alınmıştır. Kaynaktan alınan değerler 1 Temmuz 2003 tarihli ABD doları üzerinden verilmektedir) [IAE-NEA-OECD, 2005].

Ülke	**%5 indirgenme oranı ile LCOE (cent/kWh)**	**%10 indirgenme oranı ile LCOE (cent/kWh)**	**% Değişim**
Kanada	3,11	4,12	32,47
ABD	2,85	3,73	30,88
Çek Cumhuriyeti	3,41	4,37	28,15
Danimarka	3,19	4,14	29,78
Finlandiya	3,64	4,45	22,25
Fransa	3,25	4,29	32,00
Almanya	3,84	4,67	21,61
Slovakya	5,23	5,98	14,34
Türkiye TR-1 TR-2 TR-3	 4,34 3,71 4,08	 5,23 4,57 4,96	 20,51 23,18 21,57
Japonya	4,95	6,91	39,59
Güney Kore	2,26	2,82	24,78
Bulgaristan	3,13	4,26	36,10
Romanya	4,55	5,15	13,19
Güney Afrika Cumhuriyeti	1,68	2,68	59,52
ORTALAMA	**3,58**	**4,52**	**28,12**
Afşin-Elbistan B (Temmuz 2002 ABD Doları)	**4,88**	**5,27**	**7,90**

Çizelge 6.8 incelendiğinde %5 indirgenme oranında oluşan fiyat aralığı, bir başka deyişle, maksimum ile minimum arasındaki fark 3,55 cent/kWh gibi büyük bir değerdir. İndirgenme oranının %10 olması durumunda aralık azalarak 3,30 cent/kWh olmaktadır. Tüm indirgenme oranları için en düşük LCOE değeri Güney Afrika Cumhuriyetinde iken en yüksek LCOE %5 indirgenme oranında Slovakya'da, %10 indirgenme oranında ise Japonya gerçekleşmektedir. Türkiye'den seçilen kömür yakıtlı üç termik santralin ortalama LCOE değeri %5 ve %10 indirgenme oranı için sırasıyla 4,04 cent/kWh ve 4,92 cent/kWh olarak gösterilmektedir. Santrallerin açık adı verilmeyen raporda; TR-1 340 MW gücünde pulverize linyit yakan BGA/NO_x tesisine sahip önceden kullanılan bir sahada kurulmuş, TR-2 540 MW gücünde pulverize kömür yakan BGA/NO_x tesisine sahip yeni bir sahada kurulmuş, TR-3 160 MW gücünde akışkan yataklı linyit yakıtlı kireçtaşı kullanan yeni sahada kurulmuş bir santraldir. Buna göre her iki durumda da Türkiye'deki bu üç santralin LCOE değeri ortalamadan yüksek ancak %5 indirgenme oranından %10 indirgenme oranındaki değişim (%21,75) dünya ortalamasından aşağıdadır. Çizelge 6.8'de verilen santraller pulverize kömürle çalışmakta ancak bazıları baca gazı arıtma ve NO_x arıtma tesislerine sahip olan santrallerdir. Bu gibi tesislerin maliyet üzerinde hatırı sayılır bir etkisi olduğu unutulmamalıdır.

Yapılan çalışmayla Afşin-Elbistan B için belirlenen değerler, kendisine benzeyen TR-1 santraliyle karşılaştırıldığında, %5 indirgenme oranı için %12,44; %10 indirgenme oranı için ise %0,76 daha yüksek öngörülmektedir. İndirgenme oranı %5 iken LCOE sayısal değeri daha büyük olduğundan Çizelge 6.8'in son sütunundaki yüzdece değişim daha düşük gerçekleşmektedir. Sayısal değerler arasındaki farkın her iki çalışmadaki kabullerin farklı olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Söz konusu raporu standardize edebilmek amacıyla uzman görüşüyle belirlenen kabullere göre santrallerin ekonomik ömrü 40 yıl, ortalama kapasite kullanım faktörü %85 ve indirgenme oranları %5/%10 olarak alınmıştır. Bu çalışmada ise santral ekonomik ömrü 20 yıl, ortalama kapasite kullanım faktörü %74,2 ve

indirgenme oranı ise %9,11 olarak kabul edilmiştir (Bkz Çizelge 6.3 ve 6.4). Buna göre santralin gerçek LCOE değeri 5,20 cent/kWh'dir ki TR-1 santraline çok yakın bir sonuç olarak belirlenmiş olmaktadır. Afşin-Elbistan B santralinin elektrik üretim maliyeti bu çalışmadaki sonuçlara göre dünya ortalamasının %16,59 üzerinde görünmektedir. Yine de tüm kabullerin ilgili çalışmadakilerle eşitlenmesi ve gerçek kredi kullanımlarının yansıtılmasıyla daha sağlıklı bir sonuç alınacağına inanılmaktadır. Bununla beraber, bu çalışmanın amacı LCOE değerini sayısal olarak belirlemekten çok bu değerlerin hangi faktörlerden nasıl etkilendiklerini göstermektir.

6.6.2. Termoekonomik analiz ve optimizasyon sonuçları

Afşin-Elbistan B Termik Santrali için iki farklı sınır şartı uygulanmıştır: birincisi üretilen elektrik birim maliyetini $c_{\dot{W}} = LCOE$ alan sabit sınır şartı diğeri ise bilinen ve bilinmeyenlere göre her bileşen için duruma özgü (durumsal) sınır şartları. Sabit sınır şartında türbinde üretilen birim elektrik (ekserji) ortalama fiyatı LCOE alınarak giriş, çıkış ve çekilen buhar fiyatları beşinci bölümde açıklanan program tarafından hesaplanmış çıkan sonuçlar da türbinden önceki ve sonraki bileşenlere sınır şartı olarak uygulanmıştır. Bu süreç çevrimdeki her bir noktaya ait değerler elde edilinceye kadar sürdürülmüştür (Çizelge 6.5 dördüncü sütun). Durumsal sınır şartında ise Çizelge 6.5'de verilen eşitlikler simultane olarak her bir ekserji akışı için MS Excel Solver Generalised Reduced Gradient (GRG2) yöntemiyle çözülmüştür. Sınır şartlarına göre çözümün yakınsamadığı durumlarda, yakınsamanın sağlanması için kazan, YBT, OBT önce çözülerek buradan elde edilen değerler diğer bileşenlerin tahminleri ve sınır şartları olarak kullanılmıştır.

Çizelge 6.9. Sabit ve durumsal sınır şartlarına göre santralin incelenen noktaları için birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet

Nokta	Fiziksel + Kimyasal Toplam Ekserji (kW)	Birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet ($/GJ) sabit sınır şartlı ($c_{\dot{W}} = LCOE$)	Birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet ($/GJ) durumsal sınır şartlı
1	713,13	2800,30	778,69

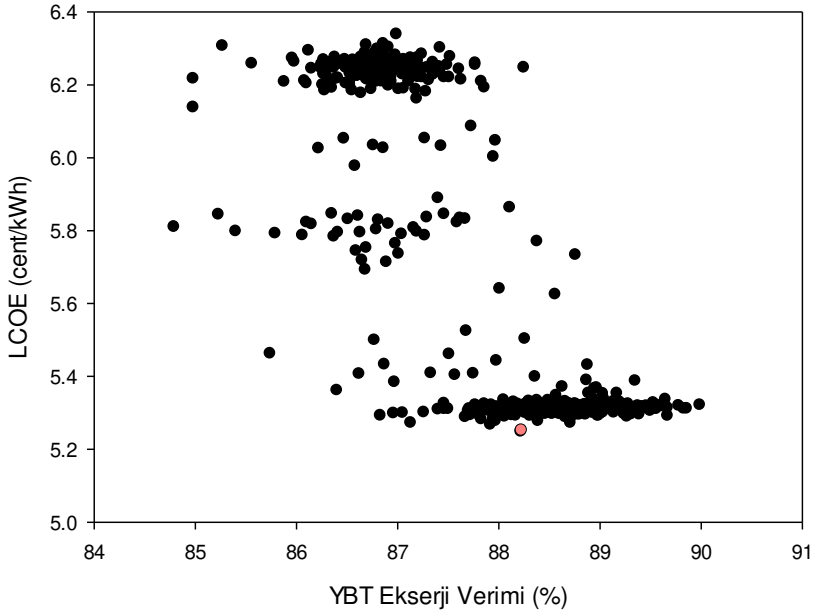
Çizelge 6.9 (Devam). Sabit ve durumsal sınır şartlarına göre santralin incelenen noktaları için birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet

2	876,73	27373,23	724,38
3	1126,51	691,65	722,84
4	634,27	0	0
5	9567,12	5,63	4,27
6’	2762,55	292,31	300,13
7	407,74	5,57	4,26
8	532,40	58,00	58,00
9	8817,91	5,51	4,26
10	6943,34	152,94	155,21
11	538,68	5,60	4,27
12	9085,01	5,55	4,26
13	11129,55	100,17	100,54
14	420,57	5,65	4,28
15	9649,60	5,65	4,28
16	15841,17	73,86	73,32
17	24176,55	13,62	4,04
17’	45540,63	13,62	4,04
18	5425,04	8,91	2,96
19	34887,87	44,27	36,46
20	41909,29	0,71	0,75
21	26401,42	13,62	4,04
22	58040,11	6,40	1,26
23	4744,13	5,83	2,26
24	38586,31	5,83	2,26
25	78942,45	7,24	1,93
26	567670,69	7,23	11,93
26’	566924,11	7,23	11,93
27	451971,53	5,83	2,26
28	395760,74	5,83	2,26
29	469947,05	13,62	4,04
30	302775,65	13,62	4,04
31	17797,23	13,62	4,04
32	96265,83	20,09	6,42
33	6915,65	18,08	4,47
34	103181,48	18,08	4,47
35	48461,46	0,0020	0,0020
36	138869,04	0,0177	0,0177
Spray	442,46	0,00	0
Fuel	1366178,50	4,77	4,77
M	3926,50	13,62	4,04

Çizelge 6.9 her iki sınır şartına göre elde edilen birim ekserji başına oluşan ortalama maliyetleri göstermektedir. Bazı değerlerin birbirine paralellik göstermesine karşın farklılık gösteren değerler de bulunmaktadır. Öncelikle sistemde düşük ekserjiye sahip olan kondenser ve alçak basınç ısıtıcıları gibi bileşenlerin ortalama maliyetleri yüksektir. Her bileşende besi suyuna ekserji eklenmesiyle çalışan akışkan kazana yaklaştıkça birim maliyet düşmektedir. Sınır şartlarına bağlı olarak kazanı terk eden bir akışın ortalama maliyeti düşebilmektedir. Kazanın giriş çıkış ortalama maliyetleri arasındaki fark durumsal sınır şartları için daha yüksektir. Öte yandan üretilen birim elektrik maliyetinin sabitlendiği yani türbinin bir fiyatta elektrik üretmeye zorlandığı sabit sınır şartları durumunda türbinden çıkan her akışın farklı bir maliyeti bulunmaktadır. Durumsal sınır şartlarında ise türbinden çıkan her buharın ortalama maliyeti birbirine eşittir. Yine durumsal sınır şartlarına göre YBT'nin ürettiği elektriğin biri maliyeti LCOE'den yüksek OBT ve ABT'nin ise daha düşüktür.

Termoekonomik optimizasyon yapılırken bölüm 6.5.'de anlatıldığı gibi pek çok koşul içerisinde en uygun çalışma koşulu belirlenmektedir. Afşin-Elbistan B santralinin optimum çalışma koşullarını belirlemede en uygun bileşen YBT olarak seçilmiştir. Bunun temel nedeni, bu bileşenin çalışma koşullarının diğer bileşenler arasında en kolay ve doğru izlenebilir oluşunun yanı sıra, çevrim sırasında OBT ve ABT'den önce gelmesinden dolayı veriminin bu türbin gruplarını etkilemesinden, ayrıca, YBT'den çıkan buharın tekrar kızdırma için kazana gönderiliyor olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.9 YBT'nin bir tam günlük süreçte farklı güç seviyelerindeki ekserji verimine karşı o güç seviyelerine göre hesaplanmış olan LCOE değerlerini göstermektedir. Dikkat edilecek olursa en düşük LCOE değerine karşı YBT'nin belirli bir ekserji verimi karşılık gelmektedir. Bu verim değeri en yüksek olmamakla birlikte en düşük LCOE'ye karşılık gelmektedir.



Şekil 6.9. YBT'nin ekserji verimi ve santralin çıkış gücüne karşılık oluşan LCOE kümesi

Şekil 6.9 çalışma koşullarının belirli alanda kümelendiğini göstermektedir. Ancak, LCOE değerinin 5,248 cent/kWh ve YBT ekserji veriminin %88,22 olduğu çalışma koşulu bu santralin LCOE açısından optimum çalışma koşulunda olduğu değerdir.

Çizelge 6.10. Tasarımsal ve işletme koşulları ile optimize edilmiş termodinamik ve termoekonomik değerler (son satır optimize edilmiş koşulları göstermektedir)

Çıkış Gücü (%)	Yüksek Basınç Türbini							Santral/Ünite		
	$\dot{m}$(kg/s)	Pg (bar)	Tg (°C)	Pç (bar)	Tç (°C)	$\dot{W}$ (MW)	ζ(%)	P_{el} (MW)	ζ(%)	LCOE (cent/kWh)
100	287,8	166,7	538,0	40,6	330,1	102,97	94,0	360	26,21	5,20
85	241,8	166,7	538,0	33,6	313,6	92,10	91,6	306	25,88	5,53
97,4	298,2	177,9	539,3	39,0	333,0	100,51	88,2	351	29,42	5,25

Çizelge 6.10'da en son satırda, YBT çalışma koşulları üzerinden optimize edilen santralin PFK baskısı altında en düşük LCOE ve mümkün olan en yüksek türbin/santral verimini sağlayan koşulları gösterilmektedir. İlk iki

satırda ise santralin tasarımsal koşulları gösterilmektedir. Çizelge 6.10 ve Şekil 6.9'a dikkat edilecek olursa optimum çalışma koşulları YBT'nin en yüksek ekserji verimini sağlamamaktadır ancak PFK baskısı altında santralin en düşük LCOE değerini işaret etmektedir. Öte taraftan, PFK baskısı ve yük talebi ile belirlenen en yüksek çıkış gücüne karşılık gelen santralin maksimum ekserji verimi, LCOE değerinin 5,20 cent/kWh'den 5.25 cent/kWh değerine çıkması pahasına gerçekleşmiştir.

Sonuçların literatürdeki bulgularla karşılaştırılması

Termoekonomi alanında yapılmış pek çok çalışma bulunmasına karşın daha önce de ifade edildiği her çalışma sistemi farklı açılardan ve farklı ilgi alanlarına göre değerlendirmektedir. Bazı çalışmalar verimi maksimize eden veya yakıt tüketimini minimize eden hedeflere sahipken bazıları yakıt, ekipman veya bakım giderlerini minimize eden parasal hedeflere sahiptir. Bazı optimizasyon hedefleri ise basitlik, güvenilirlik, güvenlik veya iş sağlığı/güvenliği gibi alışagelmemiş kriterleri içerebilmektedir [El Sayed, 2003]. Yukarıda belirtilenlere ek olarak bir santralin veya bileşenlerinin maliyet bilgilerinin açık biçimde yayımlanmaması, elektriğin serbest piyasada bir emtia haline gelmesiyle üretim maliyetlerin stratejik hale gelmesi de termoekonominin uygulanmasında ve bu bilgilerin yayınlanmasında karşılaşılan zorluklar arasında yer almaktadır. Nitekim bazı çalışmalarda [Zhang ve ark., 2006] parasal birim yerine normalize edilmiş maliyetlerin verilmesinin temelinde bu gibi nedenlerin yattığı düşünülmektedir.

Çalışma, her noktadaki birim ekserji başına oluşan ortalama maliyetin sayısal değerleri ile ilgilenmemekle beraber farklı sınır şartlarının etkilerini görmek amacıyla Çizelge 6.9 oluşturulmuştur. Aynı çizelgede yapılan analiz yöntemine literatürdeki en yakın örneğin sonuçları da gösterilmektedir. Sınırlı kaynakla yapılan karşılaştırmada tüm çalışmaların LCOE yöntemini kullanmaması veya sadece belirli ekipmanlara yönelik analizler yapılmış olması [Can ve ark., 2002] ve çeşitli kaynaklarda farklı yıllarda hesaplanan

LCOE değerlerinin tek bir tarihe taşınmasında karşılaşılan zorluklar etkili olmaktadır. Özellikle belirli bir zaman döneminde (örneğin 1994-1998) yapılan santral için hesaplanan LCOE değerinin bugüne getirilmesinde indirgenme oranının ne olacağı, teknolojik değişimlerin etkisinin nasıl hesaplanacağı, Handy-Whitman gibi özel indekslerin kullanılıp kullanılmayacağı veya hesapların hangi bazda yapılacağına dair standartlaşmış bir yaklaşım bulunmamaktadır. Rehabilitasyon, ekipman kapasitesi değişimi ve teknolojik değişimlerin etkisini dikkate alan bazı yaklaşımlar bulunsa da 10 yılı aşan dönemler için yapılan hesaplar geçerliliklerini yitirmektedir. Bu nedenle; Bejan ve arkadaşlarının inceledikleri, Ocak 1996 yılında inşaata başlandığı ve inşasının iki yılda tamamlandığı kabul edilen, 30 MW net güce sahip doğal gaz kojenerasyon santrali [Bejan ve ark., 1996], Afşin-Elbistan B santralinin fizibilite çalışmalarının 1996 yılında başlaması ve yapım protokolün 1998 yılında imzalanması nedeniyle özellikle tercih edilmiştir. Buna ek olarak buhar türbinlerinin termoekonomisi üzerine yakın zamanda yapılan bir çalışmanın [Zalet-Aguilar ve ark., 2007] sonuçları da karşılaştırma amacıyla tablolaştırılmıştır (Çizelge 6.11).

Çizelge 6.11. Türbinin farklı seviyelerinde farklı kaynaklara göre birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet değerleri

Termoekonomik Büyüklük	**YBT**	**OBT**	**ABT**
Sabit sınır şartıyla birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet ($/GJ)	14,44		
Durumsal sınır şartıyla birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet ($/GJ)	56,19	4,45	3,58
Birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyet ($/GJ) [Bejan ve ark., 1996]	18,76		
Birim ekserji ekonomik maliyeti ($/GJ) [Zaleta-Aguilar ve ark., 2007]	7,02	6,91-6,94	6,94

Çizelge 6.11'de görüldüğü gibi üretilen elektriğin maliyeti kaynaklara göre farklılıklar göstermektedir. Sayısal büyüklükler karşılaştırıldığında çalışmanın sabit sınır şartları ile elde edilen elektrik üretim maliyeti Bejan ve arkadaşlarına yakın ancak ondan küçüktür. Gerçekte yapılan hesaplar benzerlikler göstermekle beraber yapılan kabuller ve kullanılan yöntemler arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farka yol açan iki temel neden olduğu düşünülmektedir: birincisi Afşin-Elbistan B kurulu güç bakımından oldukça büyük bir termik santraldir bu nedenle üretilen elektriğin birim maliyeti düşük olmaktadır. İkinci olarak da santralde kullanılan yakıt olan linyit ucuz bir kaynaktır, dünyada ülkeden ülkeye değişiklik gösterse de doğal gaz genel olarak kömürden daha pahalı bir yakıttır. Durumsal sınır şartında 3,58-56,19 $/GJ birim ekserji başına ortalama maliyet hesaplanmasına karşın her türbinin ürettiği elektrikle ağırlıklandırıldığında söz konusu maliyet 19,10 $/GJ olarak hesaplanmaktadır. YBT daha az elektrik ürettiğinden ortalama birim ekserji maliyeti daha yüksek bir değerdedir. Zaleta-Aguilar ve arkadaşları 300 MW gücünde rejenaratif bir çevrimi *Ekserji Maliyet Teorisi* ve *Termoekonominin Genel Teorisi* yöntemiyle incelemişlerdir. Bu yöntemin sonuçları birim ekserji başına ortalama indirgenmiş maliyetten daha düşük seviyede tahmin ettiği söylenebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Termodinamiğin ikinci kanununun keşfi üzerinden çok zaman geçmiş olmasına rağmen bu kanunun özellikle enerji sistemlerindeki uygulamalarının son 40-50 yıl içerisinde yoğunlaştığı bilinmektedir. Bu tez çalışması ikinci kanunun; kömürün kimyasal ekserjisinden, belirsizlik analizine, bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyetiyle termoekonomik hesapların birleştirilmesine kadar mümkün olan bütün alanlarını gerçek bir santral üzerinde uygulayarak göstermektedir.

Temelinde özgünlük bulunan bir doktora çalışması yine özgün bir ürün veya hizmet üretmek amacıyla proje kavramıyla büyük benzerlikler göstermektedir. Bu tez çalışmasının planlama, yürütüme ve sonlandırması, proje yönetim tekniklerine uygun bir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Bugün, ekonomi ve sosyal yaşamın bir parçası haline gelen elektrik enerjisinin önemi katlanarak artmaktadır. Elektronik cihaz kullanımının yaygınlaşması, bir ara mal ve nihai mal olması ile son yıllarda ticari bir emtia haline gelmesiyle bu önem büsbütün artmaktadır. Yakın gelecekte elektrikle çalışan araçların yaygınlaşmasıyla elektriğin geleceği gerçekten de parlak görünmektedir. Bu çerçeveden bakıldığında enerji açısından dışa bağımlı olan, ithal ettiği doğal gazdan büyük oranda elektrik üreten ve sınırlı fosil kaynaklara sahip olan Türkiye'nin kömür kaynaklarından, özellikle de, linyitten yararlanması ekonomik gelişimine büyük katkıda bulunacaktır. Bu katkıyı maksimize etmek ise ancak elindeki kaynakları verimli ve etkin bir biçimde kullanmasından geçmektedir.

Türkiye'nin en büyük kömür havzası olan Afşin-Elbistan bölgesinden çıkan linyit son derece düşük kaliteli, kül ve kükürt oranı yüksek bir karakteristiğe sahiptir. Böyle bir karakteristiğe sahip yakıtla çalışan bir santralin işletme ve bakım faaliyetleri de bir o kadar zorlaşmaktadır. Türkiye'deki tersiyer kömürlerin incelendiği bir çalışma ile Afşin-Elbistan B linyiti çalışmada

açıklanan yöntemlerin ortalamasıyla karşılaştırıldığında, 7088 kJ/kg olan kimyasal ekserjisinin sadece Muğla-Milas-Çakıralan bölgesindeki 6601 kJ/kg yüksek olduğu bulunmuştur.

Literatürde kömürün içerisinde bulunan ekserjinin belirlenmesine yönelik olarak farklı pek çok model ve yöntem bulunmaktadır. Yine yapılan birçok çalışma bu model ve yöntemlerden yararlanmaktadır ancak kömürün ekserjisi bir girdi olarak düşünüldüğünde seçilen her model/yönteme göre farklı sonuçlar elde edilebilir. Standart bir yöntem bulunmadığından her araştırmacı kendine göre bir ekserji verimi bulmaktadır. Yapılan çalışma tüm koşullar aynı iken seçilen kimyasal ekserji belirleme yöntemine göre ekserji veriminin ortalamadan -%2,08 ile +%4,29 arasında değişebildiğini göstermektedir. Eğer ortalamadan en az sapan yöntem tercih edilecek olursa bu JAM olacaktır.

Belirli bir aralıktaki kömürü yakabilen kazan en iyi, en kötü ve tasarım kömürünü yaktığında farklı çıkış güçlerinde kazan ekserji verimi farkı %18,23'ü bulabilmektedir. Bu çalışmada tanımlanan Kazan Performans Göstergesi kazanda kullanılan kömürü ülkedeki en iyi kömürle karşılaştırarak bu değeri ekserji verimine oranlamaktadır. Bu göstergeye göre santralin kazanı kötü kömürü daha başarılı bir biçimde yakmaktadır.

Kömürün içerisinde bulunan nemin kimyasal ekserji değerine etkisinin pek çok modelde benzer biçimde seyrettiği belirlenmiştir. Yaygın biçimde kullanılan JAM'e göre nem oranındaki her %1'lik azalmaya karşın santrale giren kömürün kimyasal ekserjisi %1,083 oranında artmaktadır.

Santralin enerji veya ekserji verimi çıkış gücü ile doğrusal bir ilişki içerisinde değildir. Daha yüksek güce çıkmak için kazan için gereken kömür miktarı doğrusal ilişki ile gereken miktardan daha fazla olduğundan verim aynı oranda artmamaktadır. Santral, termodinamiğin birinci kanunu açısından incelendiğinde kondenser, baca gazı ve kazan enerji kaybı açısından en

önemli bileşenler olmaktadır. BFPT ve LUVO enerji kaybı açısından önemli bir yer tutmamaktadır. Isıtıcılar arasında alçak basınç ısıtıcıları enerji kaybı açısından daha önemli bir yer tutmaktadır. Kömürle sağlanan enerjinin geri kalanı YBT, OBT ve ABT'de enerjiye dönüştürülmektedir. Tüm güç seviyelerinde brüt elektrik üretiminde en yüksek pay ABT'ye aittir.

Genel bir kural olarak, bir bileşende enerji ve ekserji verimleri arasındaki fark açıldıkça o bileşende ekserji yıkımının arttığı söylenebilir. Örneğin, kazanın enerji ve ekserji verimi arasındaki fark yüksektir diğer taraftan YBT ve BFPT gibi bileşenlerde enerji ve ekserji verimi birbirine yaklaşmaktadır. Kazan tüm çıkış gücü seviyelerinde kömürle sağlanan ekserjinin %50'sinden fazlasını kullanmakta ve toplam ekserji yıkımının %70'nin fazlasından sorumlu olmaktadır.

Ölü hal koşullarının belli başlı bazı bileşenlerin ekserji verimine etkisi incelendiğinde literatürdeki sonuçlara benzer olarak azalan T_0 referans sıcaklığıyla verimin hafif bir eğilimle arttığı gözlemlenmektedir. Referans sıcaklığı kazan ekserji verimi için farklı güç seviyelerinde incelendiğinde verimin, artan T_0 değeriyle hafif biçimde kapanan bir makas motifiyle %3,47'dan %3,36'ya indiği gösterilmiştir.

Ekserji kaybı teriminin yıkım terimi içerisine alınıp alınamayacağı araştırması sonucunda kaybın YBT için çok az olduğu ve ekserji yıkımıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, benzer analizlerin diğer termodinamik bileşenler için de yapılması gerekebilir.

Literatürde yapılmış pek çok ekserji analizi bulunmaktadır. Bu çalışmalardan Türkiye'deki santralleri ele alanlar değerlendirildiğinde santralin kazan, türbin ve ekserji verimi ortalaması sırasıyla %45,95 %87,15 ve % 34,23'tür. Afşin-Elbistan B Termik Santrali tam güç çıkışında kazan, türbin ve santral verimi sırasıyla %44,12 %91,00 ve %26,21 olarak bulunmuştur. Aynı bileşenler ve santral verimi bakımından hem Türkiye'deki hem de dünyadaki tüm

çalışmaların ortlaması %52,03 %84,23 ve %35,91 olarak hesaplanmaktadır. Buna göre Afşin-Elbistan B kazanı ekserji veriminde ortalamadan biraz daha düşük ancak bir standart sapma dahilinde (%41,24) türbin ekserji veriminde ortalamadan bir standart sapma yukarıda (%91,70) ve çevrimin ekserji veriminde ise bir standart sapmanın dışında (%27,03) ancak ona çok yakın bir değerdedir. Özellikle santral veriminin düşük görünmesinde kömürün kimyasal ekserjisini belirleme teknikleri neden olabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu alanda bir standart bulunmadığından farklı ekserji verimleri bulunması mümkün görünmektedir.

Literatürdeki hiçbir çalışmada istatistiksel bir analiz yapılmadığı görülmektedir. Oysa yapılan bir çalışma sonunda en önemli amaçlardan biri olan santral performansını belirleme ancak bu tip analizle gerçekleştirilebilir.

Termodinamiğin ikinci kanunu veya ekserji analizinin bir uygulama alanı da santral ve ekipmanların gerçek zamanlı performans izlemesindeki kullanımıdır. Modern santrallerin dijital kontrol sistemlerinden alınacak verilerle bu tip bir izleme rahatlıkla yapılabilir. Ekipman karakteristiğinin belirlenmesi sayesinde bu karakteristikte meydana gelen değişmelerle bakım faaliyetlerine girdi oluşturmak, arızaları gerçekleşmeden tespit etmek mümkündür. İkinci kanun ile gerçek zamanlı izlemede en önemli engel, santraldeki her ekipman için gereken sıcaklık, basınç ve debi ölçerlerin bulunmamasıdır.

Güç santrallerinin ekserji verimi üzerine pek çok analiz olmasına karşın, verimde oluşan belirsizlik üzerine pek çalışma olmaması şaşırtıcıdır. Santralin hem enerji hem de ekserji veriminde belirsizliğe yol açan belki onlarca faktör sayılabilir ancak kapalı kutu yöntemiyle belirlenen en önemlilerinin sırasıyla kömürün kalorisinin belirlenmesi, elektrik çıkışının akım-gerilim trafosundaki ölçümü ve kömürünün debisindeki belirsizlik olduğu söylenebilir. Bileşen bazında yapılan analizlerde örnek olarak YBT'den yola çıkarak belirsizlik kaynağı olarak basınçölçerlerin hassasiyetinin sıcaklık

ölçerler hassasiyetinden daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Olabilecek en iyi veya en kötü senaryoya ilişkin YBT için yapılan ekstrem durum analizi santralin farklı güç seviyelerinde izentropik ve ekserji veriminin azalan çıkış gücü ile birlikte arttığını göstermektedir. Bunun nedeni belirsizliklerde baskın olan basınçölçer hassasiyetinin tam skala üzerinden belirlenmesidir.

Bir değere indirgenmiş elektrik üretim maliyetleri (LCOE) termoekonomik analiz için bir sınır şartı oluşturmaktadır. Öncelikle literatürde santral ekonomisine yönelik güvenilir verilerin ve hesaplamaların bulunmasında ciddi problemler vardır. Çalışma bu bağlamda gerçek verilere olabildiğince yakın değerler sağlamaktadır. Literatürdeki LCOE değerleri arasında ülkeden ülkeye ve santral tipine göre büyük farklılıklar olabilmektedir ancak çalışmada üretilen elektriğin birim maliyeti yerine bu maliyeti etkileyen faktörler üzerinde durulmaktadır. Bu açıdan bakıldığında santralin güç çıkışı seviyesi, yıllık çalışma saati, indirgenme oranı ve iç ihtiyaç oranı sıralaması oluşmaktadır. Buna ek olarak santralin Primer Frekans Kontrolüne (PFK) katılımının bir maliyeti vardır. Frekans tutarken çalıştığı çıkış gücü olan 352,8 MW'da LCOE değeri %0,725 oranında artarken PFK'nın gerektirdiği en düşük çıkış gücü olan 345,6 MW'da bu oran %1,49'un üzerine çıkmaktadır.

LCOE değerlerinin bir sınır şartı olarak belirlenmesiyle çevrimdeki her noktada yakıt ve ürünün ortalama fiyatı belirlenebilmektedir. Çalışmada, türbinlerin ürettiği elektriğin birim maliyetini LCOE'ye eşitleyen ve literatürdeki gibi belirli bazı kabullerle her noktadaki maliyeti belirleyen iki farklı yaklaşım karşılaştırılmıştır. Her iki yaklaşımda da çalışan akışkan kondenserden kazan doğru gittikçe ortalama ekserji maliyeti azalmış buna karşın türbinin ürettiği elektriğin LCOE'ye eşitlenmesi durumunda çekilen her buharın farklı maliyeti oluştuğu gösterilmiştir.

Santralin PFK baskısı altında en düşük LCOE ve en yüksek YBT/çevrim ekserji verimi ile çalışabileceği koşul 351 MW ve ana buharın 177,9 bar-

539,3 ºC aralığı olarak belirlenmiştir. PFK etkisiyle santralin nominal LCOE değeri 5,20 cent/kWh'den 5,25 cent/kWh çıkmaktadır.

Çalışmanın sonuçlarına göre aşağıda yer alan önerilerin bundan sonraki çalışmalara ve endüstriye ışık tutacağı düşünülmektedir:

- Doktora çalışmaları özgün birer proje olarak değerlendirildiğinde proje yönetim tekniklerine uygun bir biçimde yönetilebilir. Proje yönetiminin bütün alanları kullanılmasa da en azından bütünleştirme, kapsam, zaman ve kalite yönetim alanlarından yararlanılması çalışmaların daha doğru ve sağlam bir biçimde yönetilmesinde anahtar rol oynayacaktır.

- Literatürde aynı santral için bile farklı ekserji verim değerleri hesaplandığı, birçok araştırmada enerji veriminin ekserji veriminden yüksek olduğu az bir kısmında da ekserji veriminin enerji veriminden yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle kimyasal ekserji hesaplamalarının, tasarım değerleri ve gerçek verilerle yapılan incelemelerin acilen bir standarda oturtulmasına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

- Santrale gelen kömür neminin her %1'lik azalışına karşılık ekserjisi %1,083 oranında arttığından, kontrol hacmi santral sınırları olarak alınarak, kömür kırıcılardan geçmeden önce ön ısıtmaya tabi tutularak kazanın ve santralin ekserji veriminin artması sağlanabilir.

- Türbin kabin sıcaklığı, kestirimci bakım felsefesiyle, termal kameralarla belirli bir periyotla izlenerek türbinlerin ısı kaybı profili çıkarılabilir. Bu bağlamda normal koşullar belirlenerek sapma olması durumunda proaktif bakımları gerçekleştirmek mümkün olacaktır.

- PFK baskısı altında çalıştığı koşullarda optimize edilmiş değerleri yakalaması durumunda santral, mümkün olan en yüksek ikinci kanun veriminde ve en düşük LCOE'de çalışmış olacaktır.

- Santralin verimini algılarken basınçölçerlerin termokupllara göre daha hassas olması nedeniyle bu cihazları alırken daha yüksek doğruluk ve hassasiyete sahip cihazların alınması yararlı olacaktır. Bu şekilde santrale ait resim daha doğru bir çerçeveden görünecektir.

- Santralde sadece teknik anlamda değil yönetimsel anlamda yapılacak iyileştirmeler de daha etkin ve verimli bir işletmeye yol açacaktır. Bu bağlamda işletme ve bakım yönetim sistemlerinin kurulması ve özellikle ikinci kanunu baz alan termodinamik performans sistemlerinin adı geçen yönetim sistemlerine entegre edilmesi gereklidir.

KAYNAKLAR

Acır, A., Bilginsoy, A.K., Coşkun, H., "Investigation of varying dead state temperatures on energy and exergy efficiencies in thermal power plant" ***Journal of the Energy Institute***, 85 (1): 14-21 (2011).

Aljundi, I.H., "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan", ***Applied Thermal Engineering***, 29 (2-3) 324-328 (2008).

Alstom Power Boiler GmbH., "Efficiency calculation according to DIN 1942 Can 2x160 MW" ***Alstom GMBH***, Annex A, (2006).

Ameri, M., Ahmadi, P., Hamidi, A., "Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study", ***International Journal of Energy Research*** 33:499-512 (2009).

Amirabedin, E., Yılmazoğlu, M.Z., "Design and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant Using Different Types of Turkish Lignite" ***International Journal of Thermodynamics (IJoT)***, 14 (3): 125-133 (2011).

Babcock Borsing Power Commissioning, "Afşin-Elbistan B Santrali Ünite I-IV Kazan ve Ateşleme Sisteminin İşletme Talimatları, ***BBPC, Oberhausen,*** 10-11 (2004).

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., "Thermal Design & Optimization", ***John Wiley & Sons***, New York, 114,116, 131-134,519-522 (1996).

Besbelli, B., Karaca, K., Gökmenoğlu, O., "Afşin-Elbistan Kömür Havzası HB ve HD Sektörlerinin Jeoloji, Rezerv ve Hidrojeoloji Raporu", ***MTA, Ankara,*** 1 (2009).

Bilgen, S., Kaygusuz, K., "The calculation of the chemical exergies of coal based fuels by using the higher heating values", ***Applied Energy*** 85: 776-785 (2008).

British Petroleum, "BP Statistical Review of World Energy June 2012", ***BP Statistical Review Full Report, London,*** 1-2 (2012).

British Petroleum, "BP Statistical Review of World Energy, Electricity, June 2012", ***BP Statistical Review Electricity, London,*** 2 (2012).

Can, F.O., Celik, N., Dagtekin, I., "Energetic-exergetic-economic analyses of a cogeneration thermic power plant in Turkey" ***International Communications in Heat and Mass Transfer*** 36: 1044-1049 (2009).

Cihan, A., Hacıhafızoğlu, O., Kahveci, K., "Energy-exergy and modernization suggestions for a combined-cycle power plant" ***International Journal of Energy Research***; 30:115-126 (2006).

C.S., Bresolin, J.C., Diniz da Costa, V., Rudolph, P.S., Schneider., "Foruier transform method for sensitivity analysis in coal fired power plant" ***Energy Conversion and Management*** 48: 2699-2707 (2007).

Çengel, Y., Boles, M.A., "Thermodynamics: An Engineering Approach Sixth Edition (SI Units)", ***Mc Graw Hill***, New York, 2,56 (2007).

Dewulf, J., Langenhove, V.H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B.R., Grubb, G.F., Paulus, D.M., Sciubba, E., "Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology", ***American Chemical Society Environmental Science and Technology***, 42(7):2221-2232 (2008).

DIN 1942 Deutsche Norm, "Acceptance testing of steam generators (VDI Code of practice)" UDC 621.18:003.62:389.16, (1994).

Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, "Afşin-Elbistan B Termik Santrali Tanıtım Katoloğu", ***EÜAŞ AEB TS Tanıtım Kataloğu, Ankara,*** 17-25 (2006-2011).

Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, "Bakım Yönetiminde Temel Yaklaşımlar Raporu", ***EÜAŞ, Ankara***, 12, (2007).

Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, "Yıllık Rapor/Annual Report", ***EÜAŞ* Yıllık Raporlar, *Ankara*,** 17-25 (2006-2011).

European Association for Coal and Lignite, "Coal Industry Across Europe 2011", ***Euracoal, Brusells,*** 5-6,56 (2011).

El-Sayed, Y.M., "The Thermoeconomics of Energy Conversions First Edition", ***Elsevier***, Oxford, 11 (2003).

Eraslan, E., Arıkan, A., "Ücretlendirmede Kıdem Yöntemi, Kıdem ve Başarı Değerlendirme: Bir İmalat İşletmesinin İç Üretim Bölümünde Uygulama", ***Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 19(2):139-150 (2004).

Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Çetin, B., Dağdaş, A., Sevilgen, S.H., Şahin, B., Teke, İ., Güngör, C., Ataş, S., "Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey", ***International Journal of Thermal Sciences***, 48: 2179-2186 (2009).

Ertesvåg, I.S., “Uncertainties in heat-pump coefficient of performance (COP) and exergy efficiency based on standardized testing”, ***Energy and Buildings*** 43: 1937-1946 (2011).

Eskin, N., Gungor, A., Özdemir, K., “Thermodynamic analysis of a FBCC steam power plant” ***Energy Conversion and Management*** 50: 2428-2438 (2009).

Ganapathy, T., Alagumurthi, N., Gakkhar, R.P., Murugesan, K. “Exergy Analysis of Operating Lignite Fired Thermal Power Plant”, ***Journal of Engineering Science and Technology Review*** 2 (1): 123-130 (2009).

Guillen, M., “Five Equations That Changed The World-The Power and Poetry of Mathematics Dünyayı Değiştiren Beş Denklem-Matematiğin Gücü ve Şiirselliği 11. Basım”, Tanrıöver G., ***Tübitak Popüler Bilim Kitapları***, Ankara, 171-172;189 (2006).

Guoqiang, L., Hua, W., Wenhui, M., Chunwei, Y., “Energy and exergy analysis for 300 MW thermal system of Xiaolongton Power Plant”, Proceedings ***International Conference on Computer distributed control and intelligent environmental monitoring***, Changsa, 180–184 (2011).

Hilalci, A., “Çatalağzı Termik Santralına Ekserji Analizinin Uygulanması”, Yüksek Mühendislik Tezi, ***Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Zonguldak, 38-46 (2004).

Holman, J.P., “Experimental methods for engineers. Eighth edition”, ***McGraw-Hill International Edition***, 63-65;72-73 (2012).

Hussein, I.B., Yusoff, M.Z., Boosroh, M.H., “Exergy Analysis of a 120 MW Thermal Power Plant”, ***Proceedings BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering***, Bangladesh, 177-182 (2001).

International Atomic Energy Agency, “Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants 1999 Edition, Technical Report Series No.396”, ***IAEA-TECDOC-396***, 60-61, ***Viyana*** (2000).

International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050”, ***IAE Fact Sheet, Paris*** (2008).

International Energy Agency, “Energy Efficiency Indicators For Public Electricity Production From Fossil Fuels”, ***IAE Information Paper, Paris,*** 5 (2008).

International Energy Agency-Nuclear Energy Agency-Organization for Economic Co-operation and Developlment, “Projected Costs of Generating Electricity 2010 Edition”, ***IAE-NEA-OECD***, ***Paris*** (2010).

International Energy Agency-Nuclear Energy Agency-Organization for Economic Co-operation and Developlment, "Projected Costs of Generating Electricity 2005 Update", ***IAE-NEA-OECD***, ***Paris*** (2005).

İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) "Enerji-Kömür" http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=komur&bn=511&hn=&nm=384&id=40692 (2012).

Kim, D.J., "A new thermoeconomic methodology for energy systems" ***Energy*** 35: 410-422 (2010).

Koroneos, C., Haritakis, I., Michaloglou, K., Moussiopoulos, N., "Exergy analysis for power plant alternative designs, Part I.", ***Energy Sources***, 26:1277-1285 (2004).

Kopaç, M., Hilalci, A., "Effect of Ambient Temperature on the Efficiency of the Regenerative and Reheat Çatalağzı Power Plant in Turkey", ***Applied Thermal Engineering***, 27:1377-1385 (2007).

Kotas, T.J., "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", ***Butterwoths***, 37 (1985).

Küçüekefe, O.B., "Bir Termik Santralde Enerji ve Ekserji Analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Balıkesir, 55-91 (2004).

Mitrović, D., Zivkovic, D., Laković, M.S., "Energy and Exergy Analysis of 348.5 MW Steam Power Plant. ***Energy Sources***, Part A" 32:1016-1027 (2010).

Moran, M. J., "Fuel Chemical Availability", Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use Corrected Edition, ***ASME Press***, New York, 146-171 (1989).

Nikulshin, V., Wu C., Nikulshina V., "Exergy efficiency calculation of energy intensive systems", ***Exergy an International Journal*** 2, 78-86 (2002).

Oktay, Z., "Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant", ***Applied Thermal Engineering*** 29: 550-557 (2009).

Olgun, A., "Kömür ve Kokun Üst Isıl Değeri İçin Standart Test Metodu ASTM D 5865-02", ***TKİ, Kütahya*** (2006).

Oman, J., Senegačnik, A., Dejanovič, B., "Influence of lignite composition on thermal power plant performance Part 1: Theoretical survey", ***Energy Conversion & Management*** 42: 251-263 (2001).

Regulagadda, P., Dincer, I., Natarer, G.F., "Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses" ***Applied Thermal Engineering***, 30: 970-976 (2010).

Rosen, M., Dinçer, İ., "Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems", ***International Journal of Thermal Sciences***, 43: 121-133 (2004).

Rosen, M. A., "Exergy and economics: Is exergy profitable?" ***Exergy, an International Journal*** 2: 218-220 (2002).

Sözen, A., Alp, İ., Özdemir, A., "Assessment of operational and environmental peformance of the thermal power plants in Turkey by using data envelopment analysis", ***Energy Policy***, 38: 6194-6203 (2010).

Srivastava, A., "Second law (exergy) analysis of various types of coal", ***Energy Conversion and Management****,* 28 (2): 117-121 (1988).

Şen, İ., "Buhar Çevrim Santralinin Termodinamiğin İkinci Kanununa Göre Analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Isparta, 43-109 (2006).

Tekel, E., "Termik Santrallerin Enerji ve Ekserji Analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Denizli, 65-94 (2006).

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü, "Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2011-2020)", ***TEİAŞ*****, Ankara,** 4 (2011).

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü, "Primer Frekans Kontrol Hizmetinin Uygulanmasına İlişkin El Kitabı", ***TEİAŞ*****, Ankara,** 9 (2009).

Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü," 4x350 MW Afşin-Elbistan B Termik Santrali Fizibilite Raporu", ***TEAŞ Fizibilite Raporu, Ankara,*** (1996).

Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü,"4x360 MW Afşin-Elbistan B Termik Santrali Genel Şartnamesi-Cilt II", ***TEAŞ Genel Şartname, Ankara,*** (1998).

Türkiye Elektrik Üretim-İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü," Afşin-Elbistan B Power Plant Technical Specification", ***TEAŞ SPT, Ankara,*** I-26/27 (1998).

Utlu, Z., Hepbaşlı, A., "Assessment of Turkish Utility sector through energy and exergy analyses", ***Energy Policy*** 35: 5012-5020 (2007).

Utts, J.M., Heckard, R.F., "Statistical Ideas and Methods", ***Thomson Brooks/Cole***, Belmont, 334-335 (2006).

Wylen G.J.V., Sonntag R.E., “Fundamentals of Classical Thermodynamics 3rd Edition SI Version”, ***John Wiley & Sons***, New York, 264 (1985).

Yantovski, E., “What is Exergy?”, ***Proc. Int. Conf. ECOS 2004***, Meksika, 801-817 (2004).

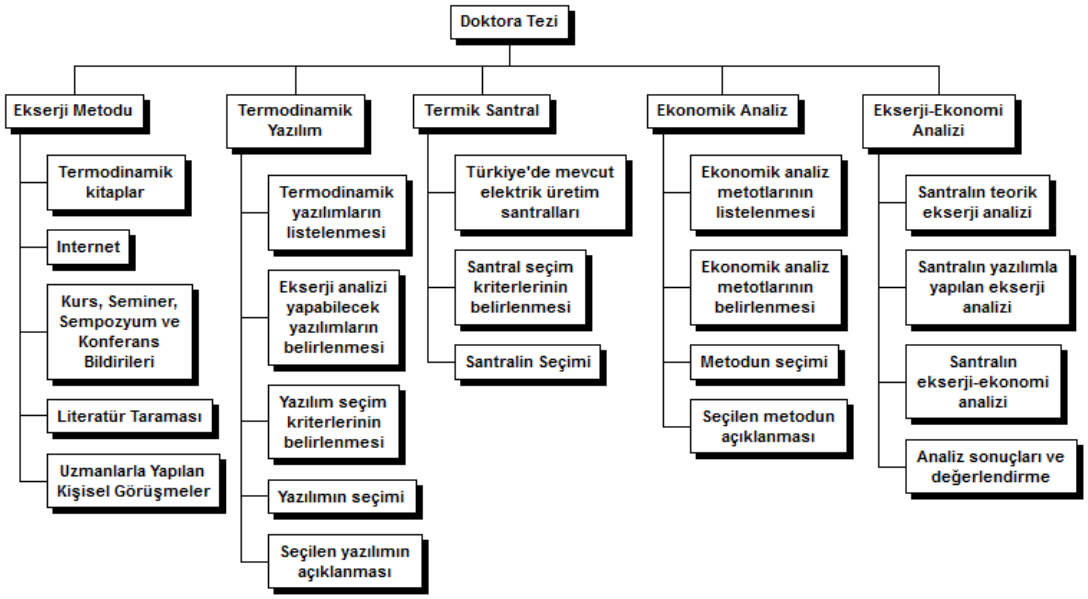
Zaleta-Aguilar, A., Correas-Uson, L., Kubiak-Szyzka, J., Sierra-Espinosa, F.Z., “Concept on thermoeconomic evaluation of steam turbines”, ***Applied Thermal Engineering*** 27: 457-466 (2007).

Zhang, C., Wang, Y., Zheng, C., Lou, X., “Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomics”, ***Energy Conversion and Management*** 47: 817-843 (2006).

Zhao, H., Chai, Y., “Exergy analysis of a power cycle system with 300 MW capacity”, ***Proceedings International Conference on Advances in Energy Engineering***, Beijing, 247-250 (2010).

EKLER

EK-1. Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol



Şekil 1.1. Tez çalışmasının İş Dağılım Ağacı (İDA)

1. Doktora Tezi
   - 1.1. Ekserji Metodu
     - 1.1.1. Termodinamik Kitaplar
       - 1.1.1.1. Termodinamik kitapların listelenmesi
       - 1.1.1.2. Önemli kitapların seçilmesi
       - 1.1.1.3. Seçilen kitaplarda kullanılacak kısımların belirlenmesi
     - 1.1.2. İnternet
       - 1.1.2.1. İnternet taraması
       - 1.1.2.2. İnternette yer alan önemli kaynakların seçilmesi
       - 1.1.2.3. Kaynaklarda kullanılabilecek kısımların belirlenmesi
     - 1.1.3. Kurs, Seminer, Sempozyum ve Konferans Bildirileri
       - 1.1.3.1. Bildirilerin taraması

EK-1 (Devam). Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol

1.1.3.2. Bildirilerde yer alan önemli kaynakların seçilmesi
1.1.3.3. Bildirilerde kullanılabilecek kısımların belirlenmesi
1.1.4. Literatür Taraması
1.1.4.1. Makale veritabanının oluşturulması
1.1.4.2. İlgili makalelerin taranarak listelenmesi
1.1.4.3. Makalelerin sınıflandırılması ve özetlenmesi
1.1.4.3.1. Termik santrallar
1.1.4.3.2. Gaz türbin santralları
1.1.4.3.3. Kojenerasyon santralları
1.1.4.3.4. Önemli makalelerin özetlerinin (kendi cümlelerinle) çıkarılması
1.1.4.4. Önemli makalelerin güçlü ve zayıf yönlerinin ortaya konması
1.1.4.5. Önemli makalelerin hangi bilinen ve bilinmeyenleri ortaya koyduğunun açıklanması
1.1.4.6. Önemli makalelerin ortaya koyduğu (varsa) ihtilaflı alanlar
1.1.4.7. Araştırma gerektiren önemli sorunlar ve soruların belirlenmesi
1.1.4.8. Mevcut çalışmaları zenginleştirebilecek alanların belirlenmesi
1.1.5. Uzmanlarla Yapılan Kişisel Görüşmeler
1.1.5.1. Uzmanların listelenmesi
1.1.5.2. Kişisel Görüşmeler
1.1.5.3. Görüşmelerin raporlanması
1.2. Termodinamik Yazılım
1.2.1. Termodinamik yazılımların listelenmesi

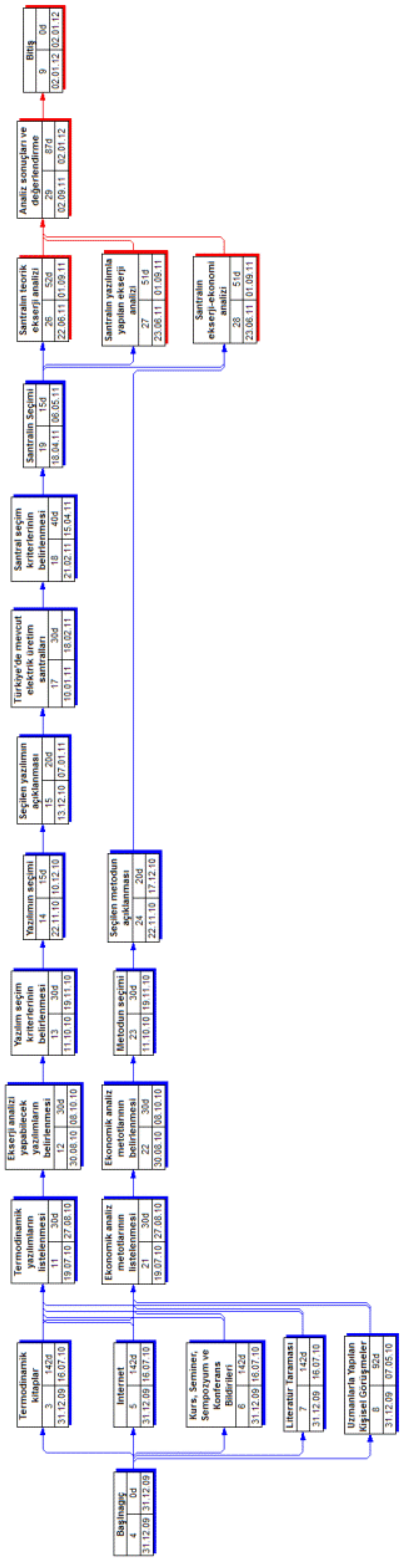
EK-1 (Devam). Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol

1.2.2. Ekserji analizi yapabilecek yazılımların belirlenmesi
1.2.3. Yazılım seçim kriterlerinin belirlenmesi
1.2.4. Yazılımın seçimi
1.2.4.1. Puanlama alanlarının belirlenmesi
1.2.4.2. Puanlamanın yapılması
1.2.4.3. Yapılan seçimin gerekçelendirilmesi
1.2.5. Seçilen yazılımın açıklanması
1.3. Termik Santral
1.3.1. Türkiye'de mevcut elektrik üretim santralların listelenmesi
1.3.2. Santral seçim kriterlerinin belirlenmesi
1.3.2.1. Kamu santrallarının seçiminin açıklanması
1.3.2.1.1. Termik santralın seçiminin açıklanması
1.3.3. Santralın seçimi
1.3.3.1. Puanlama alanlarının belirlenmesi
1.3.3.2. Puanlamanın yapılması
1.3.3.3. Santralın seçimi
1.3.3.4. Yapılan seçimin gerekçelendirilmesi
1.4. Ekonomik Analiz
1.4.1. Ekonomik analiz metotlarının listelenmesi
1.4.2. Ekonomik analiz metotlarının belirlenmesi
1.4.3. Metodun seçimi
1.4.4. Seçilen metodun açıklanması
1.5. Ekserji-Ekonomi (Toplam) Analizi
1.5.1. Santralın teorik ekserji analizi
1.5.2. Santralın yazılımla yapılan ekserji analizi
1.5.3. Santralın ekserji-ekonomik analizi
1.5.4. Analiz sonuçları ve değerlendirme
1.5.4.1. Teorik hesaplarla yazılımın karşılaştırılması
1.5.4.2. Ekonomik hesapların açıklanması

EK-1 (Devam). Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol

1.5.4.3.	Teorik/yazılım/ekonomik analiz yapan makale sonuçlarıyla karşılaştırması
1.5.4.4.	Sonuç ve değerlendirme

EK-1 (Devam). Detaylı İDA kırılım yapısı ve kritik yol



Şekil 1.2. Çalışmaya ait kritik yol (kırmızı ile gösterilenler kritik yolu göstermektedir)

EK-2. Kredi ödeme tabloları, işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.1. Eximbank kredi geri ödeme tablosu

AY	Kümülatif Toplam	Faiz	Taahhüt Masrafları	Yönetim Giderleri	Geri Ödeme Taksiti	TOPLAM
0	73392075,81	0,00	1834801,90	3669603,79	0,00	5504405,69
6	146784151,61	1988925,25	1467841,52	0,00	0,00	3456766,77
12	220176227,42	3977850,51	1284361,33	0,00	0,00	5262211,84
18	293568303,22	5966775,76	1100881,14	0,00	0,00	7067656,90
24	366960379,03	7955701,02	917400,95	0,00	0,00	8873101,96
30	440352454,84	9944626,27	733920,76	0,00	0,00	10678547,03
36	513744530,64	11933551,53	550440,57	0,00	0,00	12483992,09
42	587136606,45	13922476,78	366960,38	0,00	0,00	14289437,16
48	660528682,25	15911402,03	183480,19	0,00	0,00	16094882,22
54	733920758,06	17900327,29	0,00	0,00	0,00	17900327,29
60	697224720,16	19889252,54	0,00	0,00	36696037,90	56585290,45
66	660528682,25	18894789,92	0,00	0,00	36696037,90	55590827,82
72	623832644,35	17900327,29	0,00	0,00	36696037,90	54596365,19
78	587136606,45	16905864,66	0,00	0,00	36696037,90	53601902,56
84	550440568,54	15911402,03	0,00	0,00	36696037,90	52607439,94
90	513744530,64	14916939,41	0,00	0,00	36696037,90	51612977,31
96	477048492,74	13922476,78	0,00	0,00	36696037,90	50618514,68
102	440352454,84	12928014,15	0,00	0,00	36696037,90	49624052,06
108	403656416,93	11933551,53	0,00	0,00	36696037,90	48629589,43
114	366960379,03	10939088,90	0,00	0,00	36696037,90	47635126,80
120	330264341,13	9944626,27	0,00	0,00	36696037,90	46640664,17
126	293568303,22	8950163,64	0,00	0,00	36696037,90	45646201,55
132	256872265,32	7955701,02	0,00	0,00	36696037,90	44651738,92
138	220176227,42	6961238,39	0,00	0,00	36696037,90	43657276,29
144	183480189,51	5966775,76	0,00	0,00	36696037,90	42662813,67
150	146784151,61	4972313,14	0,00	0,00	36696037,90	41668351,04
156	110088113,71	3977850,51	0,00	0,00	36696037,90	40673888,41
162	73392075,81	2983387,88	0,00	0,00	36696037,90	39679425,78
168	36696037,90	1988925,25	0,00	0,00	36696037,90	38684963,16
174	0,00	994462,63	0,00	0,00	36696037,90	37690500,53
TOPLAM		298338788,15	8440088,72	3669603,79	733920758,06	

EK-2 (Devam). Kredi ödeme tabloları işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.2. Ticari kredi geri ödeme tablosu

AY	Kümülatif Toplam	Faiz	Commit, Fee	Manag,Fee	Geri Ödeme Taksiti	TOPLAM
0	47822694,31	0,00	1195567,36	2391134,72	0,00	3586702,07
6	95645388,62	1594886,86	956453,89	0,00	0,00	2551340,74
12	143468082,93	3189773,71	836897,15	0,00	0,00	4026670,86
18	191290777,25	4784660,57	717340,41	0,00	0,00	5502000,98
24	239113471,56	6379547,42	597783,68	0,00	0,00	6977331,10
30	286936165,87	7974434,28	478226,94	0,00	0,00	8452661,22
36	334758860,18	9569321,13	358670,21	0,00	0,00	9927991,34
42	382581554,49	11164207,99	239113,47	0,00	0,00	11403321,46
48	430404248,80	12759094,84	119556,74	0,00	0,00	12878651,58
54	478226943,11	14353981,70	0,00	0,00	0,00	14353981,70
60	430404248,80	15948868,55	0,00	0,00	47822694,31	63771562,86
66	382581554,49	14353981,70	0,00	0,00	47822694,31	62176676,01
72	334758860,18	12759094,84	0,00	0,00	47822694,31	60581789,15
78	286936165,87	11164207,99	0,00	0,00	47822694,31	58986902,30
84	239113471,56	9569321,13	0,00	0,00	47822694,31	57392015,44
90	191290777,25	7974434,28	0,00	0,00	47822694,31	55797128,59
96	143468082,93	6379547,42	0,00	0,00	47822694,31	54202241,73
102	95645388,62	4784660,57	0,00	0,00	47822694,31	52607354,88
108	47822694,31	3189773,71	0,00	0,00	47822694,31	51012468,02
114	0,00	1594886,86	0,00	0,00	47822694,31	49417581,17
TOPLAM		159488685,53	5499609,85	2391134,72	478226943,11	

Çizelge 2.3. İşletme dönemi gider tablosu

AY	Üretim Miktarı (kWh)	Birim Yakıt Fiyatı($/kWh)	Birim İşletme ve Bakım Giderleri ($/kWh)	Toplam Harcama ($)	Yakıt Harcaması ($)
48	1053000000	0,0242	0,0061	31905900,00	25482600,00
54	2106000000	0,0241	0,0064	64233000,00	50754600,00
60	3159000000	0,024	0,0067	96981300,00	75816000,00
66	4212000000	0,0239	0,007	130150800,00	100666800,00
72	4212000000	0,0238	0,0073	130993200,00	100245600,00
78	4212000000	0,0237	0,0076	131835600,00	99824400,00
84	4212000000	0,0236	0,0079	132678000,00	99403200,00
90	4212000000	0,0235	0,0082	133520400,00	98982000,00
96	4212000000	0,0234	0,0085	134362800,00	98560800,00
102	4212000000	0,0233	0,0088	135205200,00	98139600,00

EK-2 (Devam). Kredi ödeme tabloları işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.3 (Devam). İşletme dönemi gider tablosu

108	4212000000	0,0232	0,0091	136047600,00	97718400,00
114	4212000000	0,0231	0,0094	136890000,00	97297200,00
120	4212000000	0,023	0,0097	137732400,00	96876000,00
126	4212000000	0,0229	0,01	138574800,00	96454800,00
132	4212000000	0,0228	0,0103	139417200,00	96033600,00
138	4212000000	0,0227	0,0106	140259600,00	95612400,00
144	4212000000	0,0226	0,0109	141102000,00	95191200,00
150	4212000000	0,0225	0,0112	141944400,00	94770000,00
156	4212000000	0,0224	0,0115	142786800,00	94348800,00
162	4212000000	0,0223	0,0118	143629200,00	93927600,00
168	4212000000	0,0222	0,0121	144471600,00	93506400,00
174	4212000000	0,0221	0,0124	145314000,00	93085200,00
180	4212000000	0,022	0,0127	146156400,00	92664000,00
186	4212000000	0,0219	0,013	146998800,00	92242800,00
192	4212000000	0,0218	0,0133	147841200,00	91821600,00
198	4212000000	0,0217	0,0136	148683600,00	91400400,00
204	4212000000	0,0216	0,0139	149526000,00	90979200,00
210	4212000000	0,0215	0,0142	150368400,00	90558000,00
216	4212000000	0,0214	0,0145	151210800,00	90136800,00
222	4212000000	0,0213	0,0148	152053200,00	89715600,00
228	4212000000	0,0212	0,0151	152895600,00	89294400,00
234	4212000000	0,0211	0,0154	153738000,00	88873200,00
240	4212000000	0,021	0,0157	154580400,00	88452000,00
246	4212000000	0,0209	0,016	155422800,00	88030800,00
252	4212000000	0,0208	0,0163	156265200,00	87609600,00
258	4212000000	0,0207	0,0166	157107600,00	87188400,00
264	4212000000	0,0206	0,0169	157950000,00	86767200,00
270	4212000000	0,0205	0,0172	158792400,00	86346000,00
276	4212000000	0,0204	0,0175	159634800,00	85924800,00
282	4212000000	0,0203	0,0178	160477200,00	85503600,00
288	4212000000	0,0202	0,0181	161319600,00	85082400,00
294	3159000000	0,0201	0,0184	121621500,00	63495900,00
300	2106000000	0,02	0,0187	81502200,00	42120000,00
306	1053000000	0,0199	0,019	40961700,00	20954700,00

EK-2 (Devam). Kredi ödeme tabloları işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.4. Santral için yapılan LCOE hesabı (MS Excel sonuçları)

Ay	Toplam Faiz Yatırım Harcaması	Toplam Yakıt ve İşletme Giderleri	Toplam Üretim	Toplam Faiz Yatırım İşletme 48, aya taşıma	Toplam Üretim 48, aya taşıma	Sadece Faiz Yatırım 48, aya taşıma	Sadece İşletme Giderleri 48, aya taşıma	Sadece Yakıt Giderleri	Sadece Yakıt 48, aya taşıma
0	9091107,76	0	0	12886339,19	0	12886339,19	0	0	0
6	22897907,51	0	0	31072017,70	0	31072017,70	0	0	0
12	26178682,70	0	0	34008098,81	0	34008098,81	0	0	0
18	29459457,88	0	0	36637026,71	0	36637026,71	0	0	0
24	32740233,06	0	0	38979668,65	0	38979668,65	0	0	0
30	36021008,25	0	0	41055670,30	0	41055670,30	0	0	0
36	39301783,43	0	0	42883521,99	0	42883521,99	0	0	0
42	42582558,62	0	0	44480621,53	0	44480621,53	0	0	0
48	45863333,80	31905900,00	1053000000	77769233,80	1053000000	45863333,80	31905900,00	25482600,00	25482600,00
54	49144108,99	64233000,00	2106000000	108539117,11	2016133439	47047047,22	61492069,89	50754600,00	48588815,88
60	137246653,31	96981300,00	3159000000	214664651,31	2895152453	125783471,02	88881180,29	75816000,00	69483658,86
66	117767503,83	130150800,00	4212000000	217516050,79	3695481906	103325659,90	114190390,89	100666800,00	88322017,55
72	115178154,35	130993200,00	4212000000	206766958,10	3537789479	96741705,29	110025252,81	100245600,00	84199389,61
78	112588804,86	131835600,00	4212000000	196539160,15	3386826054	90531504,67	106007655,48	99824400,00	80267777,47
84	109999455,38	132678000,00	4212000000	186807740,62	3242304491	84675149,15	102132591,47	99403200,00	76518385,99
90	107410105,90	133520400,00	4212000000	177548960,43	3103949907	79153748,38	98395212,05	98982000,00	72942822,81
96	104820756,42	134362800,00	4212000000	168740202,62	2971499145	73949379,89	94790822,73	98560800,00	69533080,00
102	102231406,93	135205200,00	4212000000	160359919,82	2844700280	69045040,83	91314879,00	98139600,00	66281516,53
108	99642057,45	136047600,00	4212000000	152387584,17	2723312136	64424602,17	87962982,00	97718400,00	63180841,56
114	97052707,97	136890000,00	4212000000	144803639,49	2607103828	60072765,07	84730874,42	97297200,00	60224098,43
120	46640664,17	137732400,00	4212000000	109251735,40	2495854324	27637298,99	81614436,40	96876000,00	57404649,46
126	45646201,55	138574800,00	4212000000	104503519,19	2389352024	25893837,62	78609681,58	96454800,00	54716161,34
132	44651738,92	139417200,00	4212000000	99961598,26	2287394355	24248845,10	75712753,16	96033600,00	52152591,30

EK-2 (Devam). Kredi ödeme tabloları işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.4 (Devam). Santral için yapılan LCOE hesabı (MS Excel sonuçları)

138	43657276,29	140259600,00	4212000000	95617012,55	2189787392	22697092,40	72919920,15	95612400,00	49708173,80
144	42662813,67	141102000,00	4212000000	91461191,09	2096345482	21233617,44	70227573,65	95191200,00	47377407,89
150	41668351,04	141944400,00	4212000000	87485935,03	2006890895	19853711,85	67632223,17	94770000,00	45155045,15
156	40673888,41	142786800,00	4212000000	83683401,53	1921253486	18552908,34	65130493,19	94348800,00	43036078,10
162	39679425,78	143629200,00	4212000000	80046088,30	1839270370	17326968,69	62719119,61	93927600,00	41015729,24
168	38684963,16	144471600,00	4212000000	76566818,82	1760785610	16171872,38	60394946,44	93506400,00	39089440,55
174	37690500,53	145314000,00	4212000000	73238728,18	1685649928	15083805,67	58154922,51	93085200,00	37252863,40
180	0	146156400,00	4212000000	55996098,26	1613720411	0,00	55996098,26	92664000,00	35501849,04
186	0	146998800,00	4212000000	53915622,65	1544860248	0,00	53915622,65	92242800,00	33832439,43
192	0	147841200,00	4212000000	51910740,06	1478938463	0,00	51910740,06	91821600,00	32240858,50
198	0	148683600,00	4212000000	49978787,44	1415829672	0,00	49978787,44	91400400,00	30723503,89
204	0	149526000,00	4212000000	48117191,31	1355413840	0,00	48117191,31	90979200,00	29276938,94
210	0	150368400,00	4212000000	46323465,06	1297576052	0,00	46323465,06	90558000,00	27897885,12
216	0	151210800,00	4212000000	44595206,18	1242206300	0,00	44595206,18	90136800,00	26583214,82
222	0	152053200,00	4212000000	42930093,60	1189199269	0,00	42930093,60	89715600,00	25329944,42
228	0	152895600,00	4212000000	41325885,15	1138454136	0,00	41325885,15	89294400,00	24135227,69
234	0	153738000,00	4212000000	39780415,02	1089874384	0,00	39780415,02	88873200,00	22996349,50
240	0	154580400,00	4212000000	38291591,34	1043367612	0,00	38291591,34	88452000,00	21910719,84
246	0	155422800,00	4212000000	36857393,83	998845361	0,00	36857393,83	88030800,00	20875868,05
252	0	156265200,00	4212000000	35475871,45	956222950	0,00	35475871,45	87609600,00	19889437,36
258	0	157107600,00	4212000000	34145140,23	915419309	0,00	34145140,23	87188400,00	18949179,70
264	0	157950000,00	4212000000	32863381,05	876356828	0,00	32863381,05	86767200,00	18052950,65
270	0	158792400,00	4212000000	31628837,56	838961209	0,00	31628837,56	86346000,00	17198704,77
276	0	159634800,00	4212000000	30439814,15	803161323	0,00	30439814,15	85924800,00	16384490,99
282	0	160477200,00	4212000000	29294673,91	768889079	0,00	29294673,91	85503600,00	15608448,30
288	0	161319600,00	4212000000	28191836,77	736079289	0,00	28191836,77	85082400,00	14868801,64

EK-2 (Devam). Kredi ödeme tabloları işletme dönemi giderleri ve LCOE hesabı

Çizelge 2.4 (Devam). Santral için yapılan LCOE hesabı (MS Excel sonuçları)

294	0	121621500,00	3159000000	20347333,20	528502161	0,00	20347333,20	63495900,00	10622893,44
300	0	81502200,00	2106000000	13053512,20	337300057	0,00	13053512,20	42120000,00	6746001,14
306	0	40961700,00	1053000000	6280539,13	161453448	0,00	6280539,13	20954700,00	3212923,62
TOPLAM	Toplam Faiz Yatırım Harcaması	Toplam Yakıt ve İşletme Giderleri	Toplam Üretim	4008005641,18	77080468386	1431316330,77	2576689310,42	3807858600,00	1744771775,79
LCOE($/kWh)	9091107,76		0	Toplam Faiz Yatırım İşletme 48. aya taşıma	0,05199768	2,84	512	Sadece Yakıt Giderleri	3,47
LCOE($/GJ)	22897907,51		0	12886339,19	14,4438004	($/s)	($/s)	0	($/s)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı adı	: EGE Ahmet
Uyruğu	: T.C.
Doğrum yeri ve tarihi	: 03.10.1974 Ankara
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (312) 212 69 00/2117
e-posta	: ahmet.ege@euas.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi	2001
Lisans	Hacettepe Üniversitesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-	EÜAŞ Genel Müdürlüğü	Mühendis/Başmühendis
2001-2003	Delft Üniversitesi	Araştırmacı
1999	Grup Ofis Ltd.	Çevirmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Şahin, H.M., Ege, A., İskender, S., “Chemical exergy analysis of a natural gas combustion chamber and Its effects on exergy efficiency” ***11th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET-2012)*** Vancouver 329 (2012).

2. B., Başoğlu, A., Ege, M.E., Atmaca, S., Özek., “Kamuda Proje Yöneticisi Olmak” Ulusal Proje Meslek Konferansı Ankara 93-105 (2010).

3. EÜAŞ Genel Müdürlüğü “Bakım Yönetiminde Temel Yaklaşımlar Raporu” BYS Proje Çekirdek ve Destek Grubu Ankara (2007).

4. T.C. Sağlık Bakanlığı “Sağlık Bilgi Sistemlerinin Mimari ve Teknolojik Altyapı Analizi” A., Timoshkin, Y., Samyshkin, L., Nevzat, A., Ege, Ankara (2004).

5. High Temperature Gas Cooled Reactor Research TUDelft Interfacultair Reactor Instituut IRI-131-2003-006 A. Ege Delft The Netherlands (2003).

6. COBRA Kodu ile Bazı PWR Parametrelerinin İncelenmesi İstanbul Teknik Üniversitesi Nükleer Enerji Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi A.Ege İstanbul (2001).

Hobiler

Spor uluslararası ilişkiler kitap okuma