



**YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ
TÜRBİNİN ENERJİ, EKSERJİ, EKONOMİK VE
ÇEVRESEL ANALİZİ**

Furkan İrşat ALBAYRAK

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Alper ERGÜN**

**YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ TÜRBİNİN ENERJİ,
EKSERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ**

Furkan İrşat ALBAYRAK

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Alper ERGÜN**

**KARABÜK
Şubat 2020**

Furkan İrşat ALBAYRAK tarafından hazırlanan “YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ TÜRBİNİN ENERJİ, EKSERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Alper ERGÜN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 07/02/2020

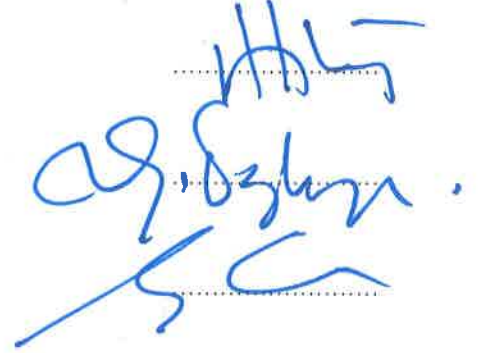
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Musa Galip ÖZKAYA (GÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Alper ERGÜN (KBÜ)



KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü





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

Furkan İrşat ALBAYRAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ TÜRBİNİN ENERJİ, EKSERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

Furkan İrşat ALBAYRAK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Alper ERGÜN

Şubat 2020, 50 sayfa

Enerji tüketiminin büyük bir bölümüne sahip olan demir çelik sektörü, faaliyet gösterdiği alanda tutunma ve rekabet yarışında hedeflenen seviyede kalma çabası göstermektedir. Bu amaçla, üretim kapasitesi, ilgili standartlara ulaşma çabası ve yüksek kalite düşük maliyet stratejilerinin yanı sıra, enerji fiyatlarının sürekli değişken ve enerji maliyetinin yüksek olması sebebiyle, farklı enerji tasarrufu yöntemlerine yönelmiştir. Enerji tasarrufu, öngörülebilir kazançların artırılması, maliyet ve enerji kaynaklarına bağımlılığın azaltılması ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesi açısından önemli bir yoldur. Enerji verimliliğinin artırılması, ilave yeni enerji kaynaklarının devreye sokulması için yapılacak yatırımlara göre ekonomik açıdan daha caziptir. Enerji tasarrufu araçlarından olan Yüksek Fırın Tepe Basıncı Düzenleyici Türbini (YFTBDT) ile enerji geri kazanım sistemi, yüksek fırın

sisteminin yan ürünü olan yüksek fırın gazının basınç farkından yararlanılarak ve söz konusu türbin sisteminden geçirilerek elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrildiği bir sistemdir. Bu sistem, yıllardır dünya üzerinde Brezilya, Çin, Japonya, Almanya, İtalya, Güney Kore gibi ülkelerde ve ülkemizdeki demir-çelik sektöründe uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek fırın tepe basıncı düzenleyici türbin sisteminin dünya üzerindeki yeri, kurulumunun sahip olduğu işletmelere getirileri, yüksek fırın tepe basıncı türbin sistemine sahip olan ülkelerin sayısal istatistikleri ve teknolojik avantajları ile ilgili veriler incelenmiştir. Demir-çelik fabrikalarında faaliyet gösteren yüksek fırın tepe basıncının düzenlenmesi amacıyla, aynı zamanda yanma işlemi gerçekleşmeden enerji kazanımı sağlayan tepe basıncı düzenleyici türbin ve jeneratör grubunun kurulması, revizyonu, devreye alınması sonrasında gerçekleşecek olan enerji, ekserji, çevresel ekonomi ve geri ödeme süreci hesaplamaları ele alınmıştır. Sonuç olarak; 2015 yılındaki toplam yatırım maliyetinin 400 000 \$ olan sistemin, 2018 yılı verilerine göre tepe basıncı en düşük 117 kPa ve en yüksek 127 kPa olup, bu basınca bağlı jeneratör çıkış gücü en düşük 4683 kW ve en yüksek 6127 kW olarak hesaplanmıştır. Yıllık çalışma süresi 8000 saat olarak alındığında yıllık üretim miktarı 42 400 MWh ve toplam tasarruf miktarı 3640 TEP/yıl olup bu üretim miktarına bağlı karbon salınımı azalımı miktarı saate ortalama 10 888 kgCO₂ olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, tesisin geri ödeme süresi 0.15 yıl olarak belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : YFTBDT, tepe basıncı, yüksek fırın.

Bilim Kodu : 92807

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ENERGY, EXERGY, ECONOMIC AND ENVIROMENTAL ANALYSIS OF THE BLAST FURNACE TOP PRESSURE RECOVERY TURBINE

Furkan İrşat ALBAYRAK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Alper ERGÜN

February 2020, 50 pages

Iron-steel industry, which has a large portion of energy consumption, strives to survive in its activity area and keep still at an aimed level in competition race. For this purpose, in addition to the production capacity, efforts to reach to the related standards and low-cost strategies at high quality; for the reason that energy costs continuously change and energy costs are high, different energy saving methods have been taken into account. Energy saving is an important method in terms of enhancing the predictable earnings, decreasing the dependency to the cost and energy sources and preventing the environmental pollution. Increasing the energy efficiency is more attractive with respect to the investments that will be done in order to activate the additional new energy sources, in terms of economy. The energy recovery system with Top Pressure Regulator Turbine (TRT) which is one of the energy saving tools, is a system in which the mechanical energy obtained by using the pressure difference of the blast furnace gas, which is the by-product of the blast furnace system, is

passed through the turbine system and converted into electrical energy. This system has been applied for many years on the world in iron-steel industry in countries such as Brazil, China, Japan, Germany, Italy, South Korea and in our country.

In this study, the worldwide data about the usage of top pressure regulator turbine system (TRT), the returns to the enterprises by the installation, the numerical statistics and technological advantages of the countries having the TRT are examined. In order to regulate the blast furnace peak pressure operating in iron and steel factories, energy, exergy, environmental economy and reimbursement process calculations to be realized after the establishment, revision and commissioning of the peak pressure regulating turbine and generator group, which also provides energy gain without combustion, are discussed. As a result; The total investment cost of the system was \$ 400 000 in 2015. According to the data of 2018, the peak pressure is 117 kPa and maximum 127 kPa and the generator output power is 4683 kW and 6127 kW. When the annual working time is taken as 8000 hours, the annual production amount is 42 400 MWh and the total saving amount is 3640 TOE / year and the amount of carbon emission reduction due to this production amount is calculated as 10 888 kgCO₂ per hour. On the side, the payback period of the facility is determined as 0.15 years.

Key Word : TRT, top pressure, blast furnace.

Science Code : 92807

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğretim Üyesi Alper ERGÜN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bilgi ve tecrübeleri ile TRT tesisinin hayat bulması adına gösterdiği ilgi ve çalıőmalarından dolayı Kardemir A.Ő. Enerji Tesisleri Müdürü Sayın Zafer őAHİN ve ekibine teşekkür ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
LİTERATÜR TARAMASI.....	7
BÖLÜM 3	12
SİSTEMİN TANIMI.....	12
3.1. YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ TÜRBİN	12
3.1.1. Sistemin Tanımı.....	12
3.1.2. Entegre Demir-Çelik Fabrikasında YFTBDT Kurulması.....	14
3.1.3. YFTBDT Sistemi ve Ekipmanları	16
3.1.4. YFTBDT Revizyonu	17
3.1.5. YFTBDT Sisteminin Faydaları	19
3.1.6. YFTBDT Dizaynına Bağlı Performans Değerlendirmeleri.....	21
3.1.6.1. Türbin Giriş Gaz Debisi.....	21
3.1.6.2. Türbin Giriş Gaz Basıncı	21
3.1.6.3. Türbin Giriş Gaz Sıcaklığı	22
3.1.6.4. Türbin Çıkış Gaz Basıncı.....	22

	<u>Sayfa</u>
3.1.6.5. Türbin Giriş Bağlı Nem Oranı	22
3.1.6.6. Türbin Giriş Gaz Toz İçeriği.....	22
3.1.6.7. Türbin Elektrik Üretim Gücü.....	22
3.1.6.8. Türbin Dönme Hızı	22
3.1.7. Yüksek Fırın Performansına Bağlı Değerlendirmeler	23
BÖLÜM 4	24
SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	24
4.1. TERMODİNAMİK ANALİZ	24
4.1.1. Güç Hesaplamaları	24
4.1.2. Enerji ve Entropi Analizi	25
4.1.3. Enerji Analizi.....	26
4.1.4. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerde Kütlenin Korunumu	26
4.1.5. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerde Enerjinin Korunumu	27
4.1.6. Ekserji Analizi	28
4.1.6.1 Ekserji Bileşenleri.....	30
4.1.6.2. Kinetik Ekserji	30
4.1.6.3. Potansiyel Ekserji.....	30
4.1.6.4. Fiziksel Ekserji.....	31
4.1.6.5. Kimyasal Ekserji.....	31
4.1.6.6. Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Ekserji Denkliği.....	31
4.1.6.7. İş Ekserjisi.....	32
4.1.6.8. Tersinir İş	32
4.1.7. Ekonomik Analiz.....	32
4.1.8. Çevresel Ekonomik Analiz.....	34
4.1.9. Çevresel Analiz.....	35
4.1.9.1. Termik Santrallerde Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarının Yarattığı Çevresel Etkiler.....	35
4.1.9.2. Termik Santrallerin Neden Olduğu Hava Kirliliği	35
4.1.9.3. Termik Santrallerin Yarattığı Su Kirliliği.....	36
4.1.9.4. Termik Santrallerin Yarattığı Toprak Kirliliği	36
4.1.9.5. Termik Santrallerin Canlılar Üzerinde Yarattığı Etkiler	37

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5	38
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
BÖLÜM 6	45
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. 2035 Yılı enerji talebinde enerji kaynaklarının payı	3
Şekil 1.2. Yıllara göre birincil enerji talebi	3
Şekil 3.1. Kuru tip YFTBDT sistemi	15
Şekil 3.2. YFTBDT modernizasyon çalışmaları	17
Şekil 3.3. Jeneratör revizyonu çalışmaları	18
Şekil 5.1. Türbin çalışma parametrelerinin aylara göre değişimi	41
Şekil 5.2. Giriş basıncı ve sıcaklığa göre türbin gücündeki değişim	42
Şekil 5.3. Debiye bağlı güç değişimi	42
Şekil 5.4. Aylara göre performans değerleri	43
Şekil 5.5. Ekserji sıcaklık ve debiye bağlı kayıpları	43
Şekil 5.6. Çevresel maliyet analizi sonuçları	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. YFTBDT sisteminin özellikleri ve üretim kapasitesi	20
Çizelge 3.2. YFTBDT sistemi dizayn parametreleri.....	21
Çizelge 3.3. 2018 Yılı yüksek fırın çalışma parametreleri.....	23
Çizelge 4.1. Enerji ile ekserjinin karşılaştırılması	29
Çizelge 5.1. 2018 Yılı verilerine göre YFTBDT performans hesaplamaları.....	40



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO₂ : karbon dioksit

CO : karbon monoksit

H₂ : hidrojen

kg : kilogram

t : ton

m³ : metreküp

Nm³ : normal metreküp

kPa : kilopaskal

kW : kilowatt

MW : megawatt

kWh : kilowatt saat

MWh: megawatt saat

TWh : terawatt saat

Gj : gigajoule

°C : santigrat derece

dB : desibel

K : kelvin

S : entropi

h : entalpi

\dot{E} : ekserji

\dot{e}_x : ekserji

U : iç enerji

KE : kinetik enerji

PE : potansiyel enerji

T : sıcaklık

P : basınç

\dot{V} : hacimsel debi
 ρ : yoğunluk
 ΔT : sıcaklık farkı
 Q : ısı enerjisi
 W : güç
 I : ekserji kaybı
 c_p : ısı kapasitesi
 \dot{m} : kütleli debi
 m : kütle
 k : Boltzmann sabiti
 η : verim
 ε : rasyonel verim
 v : hız
 i : yıllık faiz oranı
 B : yatırım maliyeti
 S : kurtarma değeri
 mg : miligram
 rpm : devir
 ppm : milyonda bir
 KH : kontrol hacmi
 Θ_{CO_2} : karbondioksit miktarı
 Ψ_{CO_2} : karbondioksit emisyon miktarı
 P_{CO_2} : karbondioksit fiyatı
 Z_{CO_2} : karbondioksit maliyeti

KISALTMALAR

TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
USD	: Amerikan Doları
TL	: Türk Lirası
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Lojik Kontrolcü)
UEA	: Uluslar Arası Enerji Ajansı
YFTBDT	: Yüksek Fırın Tepe Basıncı Düzenleyici Türbin
TRT	: Top Pressure Recovery Turbine (Tepe Basıncı Düzenleyici Türbin)
SFF	: Batan Fon Faktörü
ASV	: Yıllık Kurtarma Değeri
AMC	: Yıllık Bakım Maliyeti
CRF	: Sermaye Kurtarma Faktörü
FAC	: Sabit Yıllık Maliyet
AC	: Yıllık Maliyet

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde enerji, her geçen gün insan hayatında giderek önemi artan vazgeçilmez bir olgu haline gelerek, ülkelerin kalkınmasında en önemli rolü oynamaktadır. Gelişmekte olan ülkemizde, gelişen ekonomi ve refah seviyesine ek olarak sanayi ile birlikte nüfus artışı enerji sarfının da artışına sebep olmaktadır. Gün geçtikçe artan enerji fiyatlarının sürekli değişken olması ve maliyetinin yüksek olması açısından da, enerji büyük bir ekonomik faktör haline gelmiştir. Bu durum dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir bölümüne sahip olan sanayi ve demir-çelik sektörünün enerji tasarrufuna ve buna bağlı olarak her tüketicinin bir üretici olması döneminin başlamasına sebep olmaktadır.

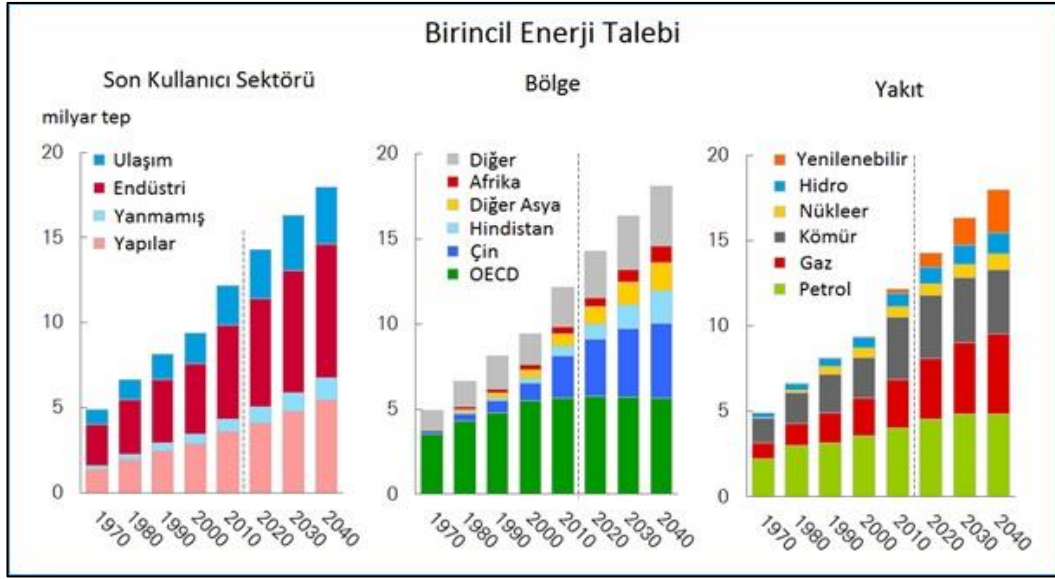
Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin, endüstriyel işletmelerde ise üretim kalitesi ve miktarının düşüşüne yol açmadan, birim veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Enerji verimliliğinin artırılması amacıyla yapılan yeni yatırımlara ilave olarak yeni enerji kaynaklarının kullanılması, enerji maliyetlerinin düşmesi ve enerji kaynaklarına bağımlılığın azaltılması açısından daha önemlidir. Bu amaçla, tasarruf edilerek kazanılabilecek enerjiyi elde etmek için pahalı yatırımların yapılması daha uzun zaman ihtiyacını ortaya çıkarmakta olup, yapılacak enerji tasarrufları ile daha hızlı ve ucuza elde etmek mümkün olmaktadır [1].

Fosil kaynakların sektördeki büyük paya sahip olması ile birlikte fosil kaynaklı yakıtların sınırlı ve çevresel etkileri ile beraber enerji maliyetlerinin yüksek olması yenilenebilir enerji kaynaklardan üretim şekilleri, enerji iletimi ve depolama yöntemlerinin önemini de azımsanmayacak oranda artırmaktadır. Bu da dünya ülkelerini sanayi ve demir çelik, bina ve ulaştırma sektörlerinde her geçen gün daha yenilikçi, çevreci ve verimli ürünleri geliştirmeye yönlendirmektedir. Bu çerçevede;

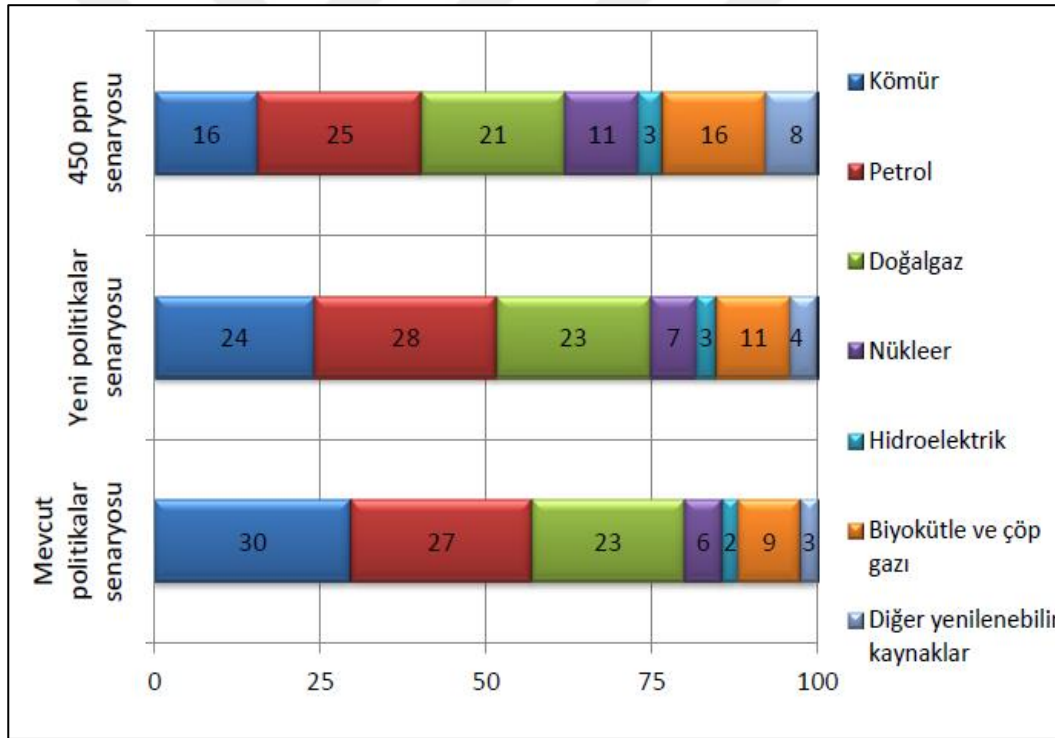
enerji üretimi ve iletiminden nihai tüketimine kadar olan bütün aşamalarda enerji verimliliğinin geliştirilmesi, bilinçsiz ve gereksiz kullanımın önlenmesi, enerji yoğunluğunun gerek sektörler bazında ve gerekse makro düzeyde azaltılması ulusal enerji politikalarının öncelikli ve önemli bileşenlerindedir.

Enerji verimliliği, gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde güncelliği yüksek bir politika alanıdır. Başta ABD, Japonya ve AB ülkeleri olmak üzere, bu konuda yeni yasal düzenlemeler yapılması için adımlar atılmakta, ulusal ve sektörel hedefler belirlenmektedir. Dünyada enerji verimliliğine verilen bu önem, çevresel kaygıların yanı sıra, endüstriyel ve ekonomik kaygıların da bir ürünü olarak düşünülebilir. Özellikle 2007-2008 küresel finansal krizinden sonra, başta ABD olmak üzere birçok gelişmiş ekonominin bu konuda somut adımlar atmak veya mevcut yapılarını güçlendirmek konusunda harekete geçtiği gözlemlenmektedir.

1990-2016 yılları arasında geçen yirmi altı yılda dünyada birincil enerjinin arzında ve dünya elektrik üretimindeki kaynakların paylarında önemli gelişmeler ve değişiklikler olmuştur. Bu gelişmelere göre, dünyada enerji alanında gelecekteki talepleri karşılamak için senaryolar yapılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı, dünyadaki iklim değişikliği, kullanılan kaynakların giderek azalması, teknoloji ve enerji verimliliğindeki gelişmeler, ekonomik ve sosyal şartların getireceği zorunluluklar düşünülerek senaryolar yapmaktadır. Bu çerçevede, yenilenebilir enerji kaynakları payının ise, mevcut politikalar dışında yapılan Yeni Politikalar ve 450 ppm Senaryolarında belirtildiği gibi, 2035 yılında dünyada birincil enerji arzı toplamında ve kaynakların kompozisyonunda mevcut trendin dışına çıkılacağı öngörülmektedir [2].



Şekil 1.1. 2035 Yılı enerji talebinde enerji kaynaklarının payı [3].



Şekil 1.2. Yıllara göre birincil enerji talebi [4].

2035 yılı enerji talebinde enerji kaynaklarının payı Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre 2035 yılında mevcut politikalara bağlı kalındığında kömür kullanım oranının yaklaşık %30 oranında diğer yenilenebilir kaynakların oranının ise yaklaşık %2.6 olacağı öngörülmektedir. 450 ppm senaryosuna bakıldığında ise kömür kullanım oranının

yaklaşık %15 seviyelerine düştüğü, diğer yenilenebilir kaynakların oranının ise yaklaşık %8 oranına kadar yükseleceği öngörülmektedir.

Türkiye demir çelik sanayisinde 2001 yılından itibaren hızlı bir büyüme sürecine girmiş ve Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi 2000 yılındaki 17.5 milyon ton seviyesinden, %70 oranında artışla, 2008 yılında 29.7 milyon ton seviyesine yükselmiştir. Aynı dönemde, elektrik ocaklarının üretim kapasitesi %91 oranında artışla, 13.6 milyon tondan, 26.1 milyon tona yükselirken, entegre tesislerin kapasitesi ise % 30 oranında artışla, 8 milyon tona yükselmiştir.

2000 yılında dünya sıralamasında 17. ve Avrupa sıralamasında 5. konumdan, 2005 yılında dünyanın en büyük 11., Avrupa'nın ise 3. çelik üreticisi konumuna, 2016 yılının ilk 7 aylık döneminde %21 oranındaki üretim artışı ile büyük çelik üreticisi ülkeler arasında üretimini en fazla artıran ülke konumunu sürdürmüş ve dünya sıralamasında 10'uncu sırada yer almıştır.

2016 yılı Haziran ayında 127.7 milyon tona ulaşan dünya ham çelik üretimi, Temmuz ayında 2015 yılına kıyasla %11.5 oranında artışla, 127.5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2016 yılı Ocak-Temmuz döneminde ise dünya ham çelik üretimi de 2015 yılı aynı dönemine göre %8.3 oranında artışla, 819 milyon tondan 887 milyon tona yükselmiştir. Söz konusu dönemde ise Türkiye 19 milyon 262 bin tonluk ham çelik üretimi gerçekleştirmiş olup 2015 yılı aynı döneminde 15 milyon 917 tonluk üretim gerçekleştirmiştir. Türkiye'yi %19.2 oranındaki üretim artışı ile 12'nci sırada yer alan Tayvan ve % 18.9 oranındaki üretim artışı ile de 6'ncı sırada yer alan Güney Kore takip etmiştir. Öte yandan üretim sıralamasında ilk sırada yer alan Çin'in ham çelik üretimi bir önceki yılın aynı dönemine göre %10.3 oranında artarak 410 milyon tona yükselmiştir. En büyük 15 çelik üreticisi arasında ikinci sırada yer alan Japonya'nın üretimi %1 oranında gerilerken, üçüncü sırada yer alan ABD'nin ham çelik üretiminde %5.2 oranında artış görülmüştür. Türkiye ise 2015 yılı itibari ile üretimini %19.3 oranında artışla 2.4 milyon tondan 2.8 milyon tona yükselterek, Ukrayna'nın önüne geçmiş ve dünyanın en fazla ham çelik üreten 9'uncu ülkesi olmuştur [5].

Entegre demir-elik fabrikaları, büyük çapta enerji tüketicisi olmalarının yanında enerji üretme faaliyetleri de yürütmektedir. Entegre demir-elik fabrikalarında üretim başında yer alan kok fabrikalarında girdi olarak kullanılan koklaşabilir kömürden elde edilen kok gazı ve sıvı ham demir üretimi prosesinden elde edilen yüksek fırın gazı entegre demir-elik fabrikalarında yer alan enerji üretim tesislerinde değerlendirilir. Kok gazı ısı, buhar ve elektrik üretilmesi dışında haddehane tav fırınlarında kullanılırken, yüksek fırın gazı ise ısı, buhar ve elektrik üretilmesi faaliyetlerinin dışında bazı tav fırınlarında kullanılırken bazı tav fırınlarında kullanılmaması tercih edilmektedir. Aynı zamanda yüksek fırın gazı, yüksek fırın çıkışında sahip olduğu basıncın tepe basıncı düzenleyici türbin ile kontrol altında tutulması sonucu elde edilebilecek enerji potansiyeline de sahiptir. Yapılan bu çalışmada yüksek fırın tepe basıncı düzenleyici türbinin enerji, ekserji ve çevresel maliyet analizi ile geri ödeme süresi konuları ele alınmıştır.

Karbon salınımı, karbon içerikli yakıtların (fosil yakıtlar: petrol, doğalgaz, kömür vb.) yanması sonucu açığa çıkmasıyla oluşan karbondioksit gazının atmosfere yayılmasıdır. Bu gaz, bireysel ve kurumsal kullanımlar sonucu ortaya çıkmaktadır. Karbondioksit gazının havaya salınımı sonucu hava kirliliği meydana gelmektedir. Bu gazın havayı kirletmesi başlangıçta dikkate alınmamakla birlikte günümüzde kirliliğin boyutlarının korkunç seviyelere ulaşmasıyla dikkat çekmeye başlamıştır. Özellikle son yıllarda küresel ölçekte iklim değişiklikleri meydana gelmiştir. Bu değişiklikler küresel ısınma olarak adlandırılmaktadır [6].

Karbon salınımının hava kalitesini olumsuz etkilemesinin yanında en çok üzerinde durulan nokta atmosferde yükselerek sera gazı etkisine yol açmasıdır. Yani yeryüzünden yansıyan güneş işınlarının uzaya çıkamadan tekrardan dünyaya dönmesiyle yer kürenin sıcaklığının artırmasına neden olmasındır. Karbondioksit dışındaki çeşitli gazlar da (metan, karbonmonoksit, azot oksitler) benzer etkiye yol açmakta ve bunların etkisi de eşdeğer etki miktarındaki karbondioksit ile ölçülmektedir.

Atmosferik karbondioksit seviyesi sanayi devriminin başlangıcından bu yana sürekli artmaktadır ve küresel ekonomi büyüdükçe bu düzeyin daha da hızlı artacağı tahmin

edilmektedir. Önemli iklim değişiklikleri belli gazların özellikle de karbon gazının atmosferik yoğunluğunun artmasıyla önemli ölçüde ilişkilidir. Yenilenebilir enerji teknolojileri fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında çok düşük ya da sıfıra yakın sera gazı emisyonu üretmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojileri hidro, rüzgar, güneş, jeotermal, atık enerji ve biokütle enerjisini içermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı 2050 yılına kadar petrol talebinde %70 ve karbon emisyonunda %130 artış beklemektedir [7].

Kurumsal faaliyetlerin, ürünlerin veya hizmetlerin yüksek karbon salınımına sebep olması işletmeleri iş süreçlerini tekrar değerlendirip düşük karbonlu yaklaşımlara yöneltmiştir. Ülkemizde iklim değişikliği ile mücadele, 2009 yılında Kyoto Protokolü'nün ardından 2010 yılında hız kazanmıştır. Ayrıca, karbon dioksit salınımının azaltılması amacıyla temel uluslararası strateji belgelerinden olan Birleşmiş Milletler'in İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi imzalanmıştır.

Bu çalışmada, entegre demir-çelik fabrikasında faaliyet göstermesi sonucunda, elde edilecek enerji miktarının, yüksek enerji maliyetleri ve çevre kirliliğine olumlu yönde etki sağlayacağı etkinin belirlenmesi amacıyla, yüksek fırına ait yüksek fırın tepe basıncının işletme için gerekli seviyelere düşürülmesi sonrasında, açığa çıkan enerji potansiyelinin faydalı elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan Yüksek Fırın Tepe Basıncı Düzenleyici Türbinin (YFTBDT) enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmanın bu bölümünde geçmiş yıllarda bilim insanları tarafından yapılan, bu tez çalışması ile ilgili araştırmalar incelenmiştir. Literatür taraması yapılırken, dünya genelinde farklı ülkelerde yapılan Tepe Basıncı Düzenleyici Türbin üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Bu kapsamda incelenen çalışmalara ulusal ve uluslararası veritabanları, YÖK Ulusal Tez Merkezi, GoogleScholar arama motoru kullanılarak erişilmiştir. Taramalar sırasında, tez çalışmasına uygun anahtar kelimeler kullanılmıştır.

Junichiro ve ark. (2007) yapmış oldukları çalışmada, dünya demir-çelik sektöründeki bölgelere bağlı CO₂ salınımının azaltılması potansiyelleri ve teknolojik olanakların minimum maliyetlerini değerlendirilmiştir. Mevcut durumdaki çelik üretim tesisleri, enerji tasarruf teknolojileri ve küresel enerji sistemi modeli incelenerek modellenmiştir. Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya olmak üzere, iki tür hedef ele alınarak ve aşağıdan yukarıya tip hedeflerinde çelik sektöründe enerji verimliliği hedefleri etkin teknolojik tepki-maliyet bağıntısı ve salınım azaltma yolları incelenmiştir. Modelleme ile ilgili iyileştirmelerin yapılması amacıyla, 2020’li yıllarda çelik sektöründeki kok kuru söndürme, kok gazı geri kazanımı düşük ölçekli enerji verimliliği, YFTBDT sistemi ve plastik atıkların geri kazanımı gibi yüksek ölçekli enerji verimliliğine sahip sistemlerin incelenmesi ve modellenmesi çalışmaları yapılmıştır. Yazarlar, 2030 yılında ise enerji verimliliği tahmini olarak %15 oranında artacağını ve YFTBDT sistemi, yeni nesil kok fırınlarının inşa edilmesi, oksijen gazı geri kazanım tesisleri, kok kuru söndürme tesisleri çelik üretim endüstrisindeki enerji verimliliğinin hedefine ulaşmasında büyük rol oynadığını belirtmişlerdir [8].

Guo ve Fu (2009) yapmış oldukları çalışmada, Çin'in kömür kaynaklı ton ham çelik başına düşen spesifik enerji tüketimi oranının değerlendirilmesi amacıyla, 2004 yılında Japonya (656 kg/t) ile demir-çelik üretiminin ortalama verilerinin kıyaslanması sonucunda, 705 kg/t ile spesifik enerji tüketiminin Japonya'dan %7.5 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Süreç içinde spesifik enerji tüketimini düşürmek amacıyla kok kuru söndürme teknolojisi, pulvarize kömür enjeksiyon teknolojisi ve YFTBDT sistemi teknolojisi kullanılmıştır. YFTBDT sisteminin kullanılmasıyla yüksek fırınlardaki enerji tüketiminin %30 kadar kısmının geri kazanılabildiği ve enerji tüketim değerinin 11 kg/t kadar azaldığı belirtilmiştir. 2007 yılının sonlarına Çin'de 2000 m³ hacmin üzerindeki 49 adet yüksek fırına YFTBDT sistemi kurulmuş olup 2030 yılına kadar olan süreçte tesis edilen ve edilecek büyük hacimli tüm yüksek fırınlara YFTBDT sisteminin kurulmasına devam edilmesi planlandığını belirtmişlerdir [9].

Wu ve Yang (2011) yapmış oldukları çalışmada, mevcut sanayideki enerji tüketiminin %70'inin demir çelik sektöründe olduğunu, bu tüketimin ise %39'unun yüksek fırınlara, %11.9'unun kok fabrikalarına, %7.77'sinin çelikhane, %17.5'inin elektrik fırınlarına, %5.55'inin ise sinter fabrikalarına ait olduğunu belirtmiştir. Yazarlar, yüksek fırınların enerji tüketiminde büyük pay sahibi olduğunu ve sıvı ham demir elde edilmesi sırasında yüksek basınç ve sıcaklık açığa çıkmakta olup bu basınç enerjisi septum (düşürücü) valflerde kaybedilmekte olduğunu ifade edilmiştir. Yüksek fırınlardaki bu basınç enerjisinin geri kazanılması için kullanılmakta olan YFTBDT sistemi ile yüksek fırınların enerji tüketiminin %20'sinin geri kazanımını sağlanabildiğini ve hacmi 1000 m³'ten büyük olan her yüksek fırında kurulabilen bir sistem olduğunu ifade edilmiştir [10].

Tanaka (2012) yapmış olduğu çalışmada, çelik sanayisindeki enerji performans kabulleri hakkında çalışmalar yapmış ve seçilen sınırlara bağlı araştırma bulgularına göre, enerji tüketiminin 16 ile 21 GJ/ton çelik arasında değiştiğini belirtmiştir. Almanya Federal İstatistiksel verilerine göre, 1991 ile 2012 yılları arasındaki ilerleyen teknolojiye bağlı enerji verimliliği ile ilgili spesifik enerji tüketimi iyileşmelerini inceleyerek verimliliğin maksimum oranda hayata geçirilmesini beklemektedir [11].

Arens ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada, dünyadaki en büyük çelik üretim ve CO₂ salınımı yapan ülkelerinden biri olan Almanya'nın CO₂ global salınım oranının %3-5 olduğunu belirtmişlerdir. 2010 yılındaki çelik üretim miktarı yaklaşık 44 milyona ulaşmış ve bu üretimle Avrupa'nın en iyi ve dünyanın yedinci büyük çelik üretici ülkesi olduğunu belirtmişlerdir. Enerji verimliliğinin artırılmasının bir anahtarının da CO₂ salınımlarının ve enerji tüketimlerinin düşürülmesi olduğunu ifade etmişlerdir [12].

Kuşoğlu ve ark. (2014) yapmış oldukları çalışmada, bir işletmede YFTBDT sistemi kurulum maliyeti, işletmeye bağlı toplam maliyetler ve yatırım geri ödeme süresi ile ilgili kurulum sürecine bağlı fizibilite çalışması yapmışlardır. YFTBDT sistemleri 380 m³ ve üzeri hacimli yüksek fırın tesislerinde kullanılabilen ve tesis kapasitesine bağlı olarak bu sistemlerden 300 kW ile 36 000 kW arasında elektrik üretebildiğini, belirtilmiştir. YFTBDT sistemlerinin yaklaşık geri ödeme sürelerinin kurulum ve devreye alma sonrası 1.5-2 yıl arasında değişmekte olduğunu ve yıllık karbon salınım miktarlarında ise tesis kapasitesine bağlı olarak 176 000 milyon tona kadar CO₂ gazının atmosfere atılmasının önlediğini ifade edilmiştir [13].

Cai ve ark. (2016) yapmış oldukları çalışmada, YFTBDT sisteminin demir-çelik sektöründe ikinci en değerli enerji geri kazanım sistemlerinden biri olduğunu ve türbin istemine bağlı dönen jeneratörde enerji tüketiminin %30 kadarının geri kazanılabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışmada, türbin sisteminin geometrik modellemesine ve nümerik yaklaşımına yer vererek türbinden geçen saatlik 695 600 Nm³ yüksek fırın gazının tasarım parametrelerini ve buna bağlı türbin verimliliği, erozyon morfolojisini, türbin kanatçık yapısına etkilerini incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, kanatçıklardaki toplam basınç kaybının, gaz hızının düşük olması sebebiyle %0.7 olduğunu, gaz akışının türbin kademelerinde düzgün dağılım göstermesi sebebiyle türbin performansının %90.1 oranlarında olduğunu belirtmişlerdir [14].

Liu ve Gao (2016) yapmış oldukları çalışmada, Çin demir-çelik sanayisindeki orta ve büyük çaplı kuruluşların enerji maliyetlerinin %20'den %30 oranlarına çıktığını ve CO₂ salınımlarının ise 2007 yılında tahmini olarak 1232.9 Mt olduğunu

belirtmişlerdir. Tipik yaş tip YFTBDT sistemi yatırımı için 20 USD/t sıvı ham demir ve enerji üretimi ise yaklaşık 30 kWh/t olduğunu ifade etmişlerdir. YFTBDT sistemi Çin demir çelik sanayisinde 1980 yıllarında kurulmaya başlamış olup kuru tip bir 420 m³ hacimli bir Yüksek fırın için kurulan YFTBDT sisteminin maliyeti yaklaşık 3.3 milyon USD ve tesisin geri ödeme süresinin ise yaklaşık 2 yıl olduğu belirtilmiştir. 2008 yılı sonlarında hacmi 1000 m³'ten büyük olan 158 adet yüksek fırın tesisin 60 adedinde yaş tip YFTBDT sistemi, 91 adedinde ise kuru tip YFTBDT sistemi kurulduğunu ayrıca 2011 yılında orta ve büyük ölçekli 530 tane yüksek fırının %70'nde kuru tip kurulmuş olup bu oranın 2014 yılında %100 oranına ulaştığı ifade etmişlerdir [15].

Kuşoğlu (2017) yapmış olduğu çalışmada, YFTBDT sisteminin dünya üzerindeki yeri, kurulumunun sahip olduğu işletmelere getirileri, yüksek fırın tepe basıncı türbin sistemine sahip olan ülkelerin sayısal istatistikleri ve teknolojik avantajları ile ilgili veriler incelenmiştir. Örnek bir işletmeye ait yüksek fırın tepe basıncı türbin sisteminin yapımı aşamasındaki fizibilite çalışmaları ile ilgili teknik ve finansal analizler yapmış, yatırımın yaklaşık kurulum ve işletme maliyetleri, toplam maliyet ve geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Sonuç olarak; toplam yatırım maliyetinin 15 500 000 TL olan sistemin yıllık ortalama tepe basıncı 155 kPa olup bu basınca bağlı jeneratör çıkış gücü 5071 kWh olarak hesaplanmıştır. Yıllık çalışma süresi 8000 saat olarak alındığında yıllık üretim miktarı 40 568 MWh ve toplam tasarruf miktarı 3490 TEP/yıl olup bu üretim miktarına bağlı Karbon salınımı azalımı miktarı 35 118 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Sistem ile ilgili maliyet ve enerji hesaplamalarına bakıldığında projenin geri ödeme süresinin 1.6 yıl olduğu görülmüştür [16].

Yapılan literatür araştırmasında, TRT sistemi ile ilgili uluslar arası birçok çalışma olmasına rağmen, ülkemizde iki farklı çalışmaya rastlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, TRT sisteminin dünya üzerindeki yeri, faaliyet gösterdiği işletmelere olan getirileri ve teknolojik avantajları incelenmiştir. Entegre demir-çelik fabrikasında TRT sisteminin uygulanması ve finansal analizleri, üretilen ton ham çelik başına düşen spesifik enerji tüketimine etkisi, enerji maliyetlerine olan etkisi ve elde edilen enerji miktarının, kömür vb. yakıtlı proseslere kıyasla karbon dioksit üretimine olan olumlu etkisi incelenmiştir. Yüksek fırınlarda, yüksek fırın tepe basıncının düzenlenmesi

amacıyla, aynı zamanda yanma işlemi gerçekleşmeden enerji kazanımı sağlayan tepe basıncı düzenleyici türbin ve jeneratör grubunun kurulması, revizyonu, devreye alınması sonrasında gerçekleşecek olan enerji, ekserji, çevresel ekonomi ve geri ödeme süreci hesaplamaları ele alınmıştır.



BÖLÜM 3

SİSTEMİN TANIMI

3.1. YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI DÜZENLEYİCİ TÜRBİN

3.1.1. Sistemin Tanımı

TRT (Top Pressure Recovery Turbine) veya YFTBDT (Yüksek Fırın Tepe Basıncı Düzenleyici Türbin); entegre demir-çelik fabrikalarında faaliyet gösteren yüksek fırınların tepe basınçlarının faydalı enerjiye dönüştürülmesi amacıyla, fırın gazı basınç düşürücü valflerin yerine kullanılabilen bir sistem şeklinde tanımlanabilir.

Entegre demir-çelik fabrikalarında faaliyet gösteren ve sıvı ham demir prosesinin başında yer alan yüksek fırınlarda, proses gereği yan ürün olarak elde edilen yüksek fırın gazı, yüksek fırının işletme şartlarının sağlanması amacıyla, septum (düşürücü) valfler aracılığıyla genişletilerek belirli tepe basıncı değerlerine düşürülmelidir. YFTBDT sistemi, yüksek fırın gazının barındırdığı basınç enerjisinden yararlanılarak, herhangi bir ek yakıt tüketmeden ve yakılmaksızın elektrik enerjisi üretilmesi esasına dayanan türbin-jeneratör sistemidir.

Entegre demir-çelik fabrikalarında sıvı ham demir prosesinin başında yer alan yüksek fırınlara sinter, pelet, parça cevher ve metalürjik kok şarj edilerek sıvı ham demir elde edilir. Sıvı ham demir üretimi sırasında kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkmakta olan yüksek fırın gazı bünyesinde CO ve H₂ ihtiva etmesi sebebiyle yanıcı bir gazdır. Düşük kalorifik değere sahip olan yüksek fırın gazı, yüksek fırın prosesinde bulunan gaz temizleme ünitelerinde soğutma ve bünyesinde ihtiva ettiği tozu temizleme işlemi sonrası yüksek fırın gazı şebekesine taşınarak, kok fırınları, buhar kazanları, fırın sobaları ve bazı tav fırınları gibi tüketici ünitelerde yakıt olarak kullanılabilir.

Yüksek fırınların sıvı ham demir üretimi aşamasında oluşturması gereken tepe basıncı, fırın kontrolünde olan tepe basıncı düşürücü valfleri (septum valfler) ile sağlanmakta olup, fırın içi ile gaz kollektörü şebeke basıncı arasında yaklaşık 25-30 kat fark bulunmaktadır. Genel olarak, 200 kPa tepe basıncına sahip bir yüksek fırın ile, yaklaşık 6-8 kPa yüksek fırın gazı şebeke basıncını kıyaslanacak olursa bu oran yaklaşık 30 kattır.

YFTBDT sistemi dünya üzerinde Brezilya, İtalya, Çin, Japonya, Güney Kore, Almanya, Türkiye gibi ülkelerdeki demir-çelik sektöründe kullanılmaktadır. Bu tesisler, 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizinden sonra Avrupa ve özellikle enerji açısından dışa bağımlı olan Japonya'da entegre demir-çelik sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Japonya ve Kore'deki entegre tesislerin tamamında, Çin'deki çalışmakta olan entegre demir çelik tesislerin ise genelinde YFTBDT sistemi bulunmaktadır. Ülkemizde ise üç ayrı entegre demir-çelik tesisinde de YFTBDT sistemi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, mevcut YFTBDT sistemin revizyonu, YFTBDT sisteminin devreye alınması için gerekli olan yüksek fırın işletme şartları, mevcut yüksek fırın kapasitesi, türbin sisteminin çalıştırılması için gerekli olan yüksek fırın gazının teknik özelliklerine (içerisindeki toz miktarı, nem miktarı, gazın kolektördeki hızı, temiz gaz sıcaklığı, kollektör basıncı, gaz debisi) bağlı olarak devreye alınacak YFTBDT sisteminin kapasitesi, tipi, genel ekipmanları incelenmiştir.

Türkiye'deki demir-çelik sektöründe; aktif halde toplamda dört adet yüksek fırına sahip olan ve 3 000 000 ton/yıl sıvı ham demir üretim kapasiteli demir-çelik fabrikasında 2015 yılında yüksek fırına bağlı olarak bir adet YFTBDT sistemi kurulmuş ancak devreye alınmamıştır. Çalışmaya konu olan tesisin 2018 yılı başında revizyonu ile birlikte, yeni yüksek fırın gazı basınç düzenleyici gaz deposu ve şebekesinin devreye alınmasının akabinde, YFTBDT sisteminin de devreye alınması planlanmıştır. 2020 yılı içerisinde devreye alınacak olan YFTBDT sistemi için elektrik üretim kapasitesi yaklaşık 8.48 MW'tır.

YFTBDT sisteminin devreye alınması için, mevcut iki gaz temizleme sisteminin bu sisteme uygun olan kuru tip gaz temizleme olarak hizmet vermesi gerekmektedir. Bununla birlikte, yüksek fırının çalışma parametreleri incelendiğinde, devreye alınacak olan YFTBDT sisteminin yaklaşık olarak 4–4.5 MW ortalama ile çalışabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda; sistem, bakım gerektiren zamanlar dışında yılda 8000 saat çalışması halinde yıllık ortalama 36 000 000 kWh üretim yapabilecek kapasitededir.

3.1.2. Entegre Demir-Çelik Fabrikasında YFTBDT Kurulması

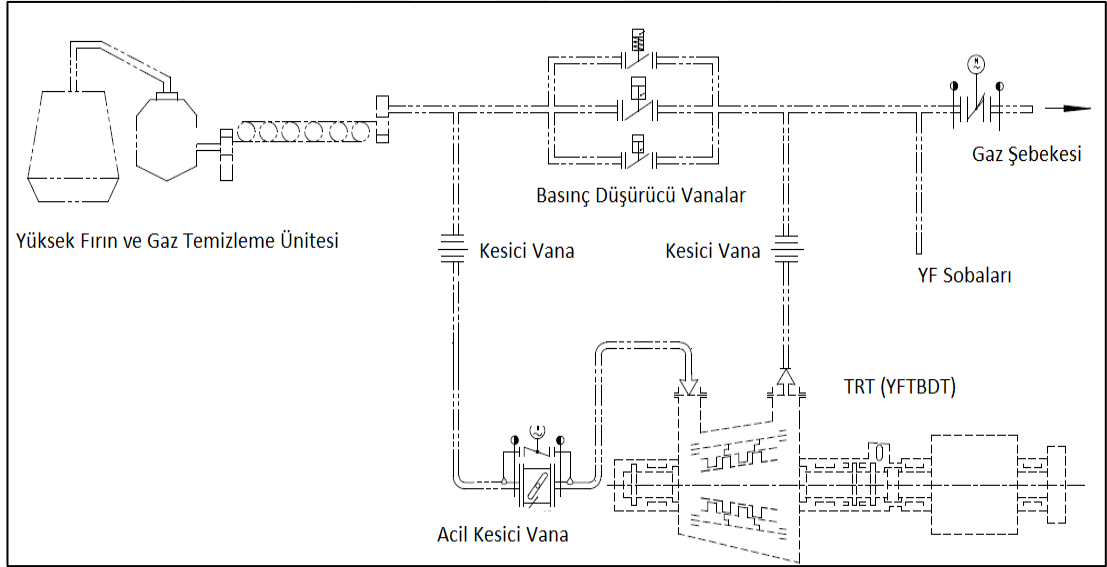
Planlama aşamasında ilk adım fizibilite raporu hazırlanmalıdır. Bu aşamada, YFTBDT sisteminin kurulabilmesi için gerekli olan yüksek fırın proses şartları, bağlı çalışacağı yüksek fırının kapasitesi, türbin sisteminin çalıştırılması için gerekli olan yüksek fırın gazının teknik özelliklerine (içerisindeki toz miktarı, nem miktarı, gazın kollektördeki hızı, temiz gaz sıcaklığı, kollektör basıncı, gaz debisi) bağlı olarak kurulabilecek sistemin kapasitesi, tipi, genel ekipmanları belirlenmekte ve sistem için gerekli olan en uygun YFTBDT sistemi seçimi yapılır.

YFTBDT sistemleri projelendirilirken izlenmesi gerekli yol aşağıdaki gibidir;

1. Fırın üretim kapasitesi,
2. Turbo körük hava debi ve basıncı,
3. Türbinin kapasitesinin belirlenmesi,
4. Ön projenin hazırlanması,
5. Tekliflerin alınması ve tedarikçi seçimi,
6. Ayrıntılı projelerin (inşaat, mekanik, elektrik) yapılması, gerçek yatırım maliyeti ve geri ödeme süresinin hesaplanması,
 - 6.1. Ekonomik fizibilite
 - 6.2. Teknik fizibilite
 - 6.3. Organizasyonel fizibilite ve iş-zaman çizelgesi
7. Yatırım için finansman seçeneklerinin araştırılması,
8. Uygulama

Kurulacak bir YFTBDT sistemi için ihtiyaçlar tespit edilirken;

1. Yıllık, aylık, günlük ve saatlik elektrik enerji tüketimleri,
2. Yüksek fırın üretim kapasitesi,
3. Yüksek fırında üretim için kullanılan turbo körükten temin edilen hava debisi ve teknik özellikleri,
4. Yüksek fırın arkasında çalışan gaz temizleme ünitesinin teknik özellikleri ve kapasitesi,
5. Hat içerisindeki temiz ve yüksek fırın gazı içerisindeki toz miktarı,
6. Kirli ve temiz gaz sıcaklıkları,
7. Gaz temizleme ünitesi giriş ve çıkış hat basınçları,
8. Gaz içerisindeki nem miktarı gibi teknik özellikler dikkate alınır.



Şekil 3.1. Kuru tip YFTBDT sistemi.

YFTBDT sistemlerinin kuru tip ve yaş tip olmak üzere iki ayrı alternatifi bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise kuru tip YFTBDT sistemi kurulması tercih edilmiştir.

Kuru tip YFTBDT sistemleri, genellikle turbo körükler için harcanan enerji ihtiyacının yaklaşık %45 - 50'sinin geri kazanımını sağlayabilmektedir. Bu türbin

sistemi, kuru tip yüksek fırın gazı temizleme sistemine sahip yüksek fırınlar için kurulmaktadır. Kuru tip YFTBDT sistemi, yaş tip YFTBDT sistemine göre daha verimli sistemlerdir. Yapılan bu çalışmada ele alınan YFTBDT sisteminin türbin giriş gaz sıcaklığı maksimum 250°C ve çalışma dizayn sıcaklığı ortalama 150°C'dir. Ayrıca yaş tip YFTBDT sistemlerine göre daha az su ve elektrik ihtiyacı vardır. Yaş tip YFTBDT sistemi, yaş tip gaz temizleme sistemine sahip yüksek fırın sistemlerine kurulmaktadır. Turbo körüklerin enerji ihtiyacının yaklaşık %30'unun geri kazanımını sağlamaktadır. Gaz temizleme ünitesinde gazın temizlenmesi ve soğutulması işlemi sonrası türbin girişindeki yüksek fırın gaz sıcaklığı yaklaşık 55°C'dir. Yüksek fırınlara ait tepe basıncı, YFTBDT sistemin devrede olmadığı zamanlarda ise YFTBDT sistemine paralel kurulmuş septum (düşürücü) valf sistemi ile sağlanmaktadır.

3.1.3. YFTBDT Sistemi ve Ekipmanları

YFTBDT sistemi, yüksek fırın tepe basıncı ayar valf sistemine seri veya paralel bağlanabilen, yüksek fırın gazının septum (düşürücü) valfler aracılığıyla genişletilerek, düşük basınçta gaz dağıtım şebekesine verilmesi yerine, genişleme türbini aracılığı ile genişletildikten sonra gaz dağıtım şebekesine verilmesi ve sonuç olarak gazın basınç enerjisinden yararlanılarak elektrik enerji üretilmesi esasına dayanan bir tesistir. Gaz temizleme ünitesinden çıkıp YFTBDT sistemine giren yüksek fırın gazı, türbin kanatçıklarına çarpıp türbinin hareketlenmesini sağlamak ve tepe basıncı kontrolünü servo kontrollü stator kanatlar yardımıyla yapılır.

YFTBDT sisteminin genel olarak ekipmanları;

1. Türbin rotor ve statoru
2. Jeneratör iletim hatları
3. Yağlama yağ sistemi
4. Hidrolik kontrol sistemi
5. Azot sızdırmazlık sistemi
6. Tahliye ve temizleme sistemi
7. Gaz hatları

8. Kesici vana ve septum (düşürücü) vanalardır.

3.1.4. YFTBDT Revizyonu

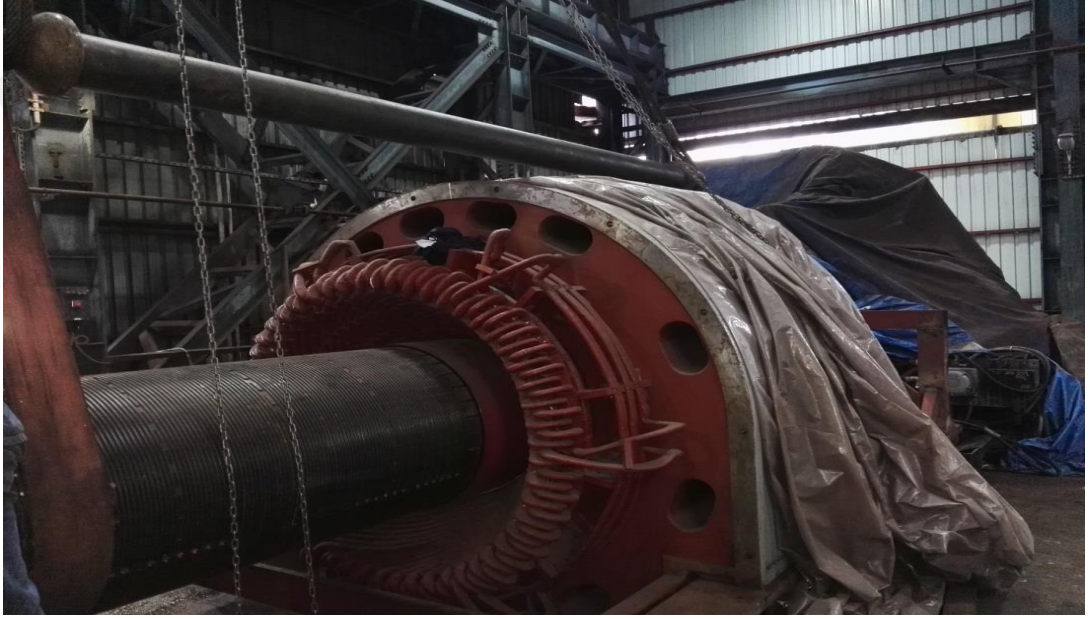
Entegre demir-çelik tesislerinde faaliyet göstermekte olan türbin-jeneratör veya türbin-körük sistemlerinin ortalama 6-8 yıl çalıştırılması sonrasında revizyon ihtiyacı doğmaktadır. Bu çalışmaya konu olan YFTBDT'in ise, toz ve nem miktarı yüksek olan yüksek fırın gazının oluşturmuş olduğu olumsuz etki sebebiyle buhar türbinlerine kıyasla daha kısa sürelerde periyodik temizlik ve revizyon çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Çalışmaya konu olan YFTBDT'in 2015 yılında montajı tamamlanarak devreye alınmamış ve sistemin revizyon ihtiyacı doğmuştur.



Şekil 3.2. YFTBDT revizyon çalışmaları.

Revizyon çalışmalarında, sistemin tedarik edildiği firma yetkilisi eşliğinde türbin rotor-stator kontrolü ve temizliği yapılmıştır. Türbinin belirli ölçü sistemlerinin ve mekanik durdurma sisteminin konumlandırıldığı ön boğaz, türbin rotoru ve gövde, gaz akışının kontrolünün sağlandığı stator blade, aksel gezinmelerin kontrolünün sağlandığı thrust yatak, ön ve arka taşıyıcı yataklar, duruşlarda döner hareketin sağlandığı çevirici motoru ve dişlisinin kontrolü ve temizlikleri yapılmıştır.

Bu çalışmaya konu alınarak, revizyon çalışmaları yapılan bu sistemde en kritik ekipman olan ve acil duruş gerçekleşmesi sırasında gaz girişini engelleyerek sistemin güvenliğini sağlayacak olan Quick Shut-Off (acil kesici) valf, türbin ile arasındaki boru hattının uzun olması sebebiyle gaz hatlarında revizyon ihtiyacı gerektirmiş ve türbin sistemine yakın bir bölgede konumlandırılmıştır. Quick Shut-Off (acil kesici) valfin yerinin değiştirilmesiyle kontrol yağ hattı da revizyona uğramış ve yağ hatlarının temizlenmesi amacıyla flushing (filtreleme) işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Jeneratör revizyon çalışmaları.

Türbin-jeneratör sistemlerinde taşıyıcı yatakların yağlanması ve yağlamanın sürekliliği önem taşımaktadır. Aynı zamanda yağlama ünitesinin temizliği ve ısınan yağın işletme şartlarına uygun sıcaklıklara düşürülmesi amacıyla yağlama yağ hatları ve yağ tankının temizliği yapılmıştır.

TEİAŞ yönetmeliğince zorunlu kılınan ve sistemin güvenliği amacıyla önem taşıyan nötr direnç eklenerek, röle-koordinasyon bağlantı kontrolleri yapılmıştır. Sistemin işletilmesini sağlayan PLC sisteminin bağlantıları, kontrolleri ve onarımları ile prob, switch ve sensör kontrolleri yapılmıştır.

Türbin tarafından aktarılan mekanik enerjinin, elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan jeneratörün ve gerekli uyarımı gerçekleştiren ikaz sisteminin, sargı kontrolleri, izolasyonlarının yenilenmesi ve temizlikleri revizyon çalışmasında yapılmıştır.

3.1.5. YFTBDT Sisteminin Faydaları

Kullanımında herhangi bir yakıt ihtiyacı bulunmayan ve yüksek fırınlardan gelen yüksek fırın gazının kalitesini düşürmeden tüketici ünitelere kullanılmak üzere aktarılmasını sağlayan YFTBDT sistemi faydaları ile ilgili detaylar aşağıda belirtilmiştir;

1. YFTBDT Sisteminin kullanılması ile atıl halde olan yüksek fırın gazı basıncının enerjisinden faydalanılır ve gazın yakılması gibi bir durum olmadığı için gaz tüketici ünitelerde yakıt olarak kullanılabilir.
2. Yüksek fırınlar tepe basıncının ayarlanması amacıyla da kullanılacağı için fırın tepe basıncı teknolojik bir sistemle güvenle çalıştırılır.
3. YFTBDT sistemi kullanılması sonucunda basınçlı baca gazının oluşturduğu gürültü azalır (40 dB altına inebilen sistemler mevcut).
4. Baca gazının basınç dalgalanmasını kontrol altında tutar.
5. Fosil yakıt kullanmadan sağlanan bir enerji olması sebebi ile enerji verimliliği ve karbon salınımının azaltılması ile alakalı teşviklerden yararlanma imkânı sağlamaktadır.
6. YFTBDT sistemi kurulan Yüksek Fırın sisteminde istikrarlı çalışma şartları sağlanmakta ve üretim sırasında açığa çıkan yüksek fırın gazının tüketici ünitelerde kullanımının devamlılığını sağlamaktadır.
7. İşletimi ve bakımı için karmaşık bir teknolojiye ihtiyaç duyulmamakta olup işletme veya bakım birimleri tarafından kolayca sağlanabilir.
8. İşletimi için kullanılan su, azot vs. gibi parametrelere ihtiyacı çok düşük miktarlardadır.

YFTBDT sistemi kurulumunda bağlı bulunduğu yüksek fırının mevcut saatlik, günlük, aylık elektrik enerji tüketimleri, yüksek fırın üretim kapasitesi, yüksek

fırında üretim için kullanılan turbo körükten temin edilen hava debisi ve teknik özellikleri dikkate alınmıştır. Ayrıca yüksek fırın gaz temizleme ünitesinin teknik özellikleri ve kapasitesi, hat içerisindeki temiz ve yüksek fırın gazı içerisindeki toz miktarı, kirli ve temiz gaz sıcaklıkları, gaz temizleme ünitesi giriş ve çıkış hat basınçları, gaz içerisindeki nem miktarı gibi teknik özelliklerin incelenmesi de önemlidir. Mevcut YFTBDT sisteminin dizayn parametreleri ve gerçekleşen çalışma parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. YFTBDT sisteminin özellikleri ve üretim kapasitesi.

Yüksek Fırın Hacmi	Diyazn : 1650 m ³
YFTBDT Giriş Gaz Debisi	Diyazn : 230 000 Nm ³ /h
	Gerçekleşen : 200 000 Nm ³ /h
YFTBDT Giriş Gaz Basıncı	Diyazn : 230 kPa (g)
	Gerçekleşen : 130-150 kPa (g)
YFTBDT Giriş Gaz Sıcaklığı	Diyazn : 150°C
	Gerçekleşen : 110-140°C
YFTBDT Çıkış Gaz Basıncı	Diyazn : 10 kPa (g)
YFTBDT Giriş Gaz Toz İçeriği	Diyazn : <5 mg/Nm ³
YFTBDT Elektrik Üretim Kapasitesi	Diyazn : 8.48 MW
	Tahmin : 4-5 MW
Yüksek Fırın Gazı İçeriği	CO : %22.98
	N ₂ : %56.35
	CO ₂ : %18.69
	O ₂ : %0
	H ₂ : %1.98
	Q : 680-700 (kcal/m ³)

3.1.6. YFTBDT Dizaynına Bağlı Performans Değerlendirmeleri

YFTBDT sisteminin tasarımına bağlı performans hesaplamaları, yüksek fırının işletme şartlarına bağlı minimum, ortalama ve maksimum üretim kapasiteleri göz önünde bulundurularak hesaplanmış ve YFTBDT sisteminin üretebileceği öngörülen güç miktarları Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. YFTBDT sistemi dizayn parametreleri.

Parametre	Birim	Minimum	Dizayn	Maksimum
Türbin Giriş Gaz Debisi	Nm ³ /h	130 000	230 000	330 000
Türbin Giriş Gaz Basıncı	kPa (g)	110	230	260
Türbin Giriş Gaz Sıcaklığı	°C	100	150	250
Türbin Çıkış Gaz Basıncı	kPa (g)	10	10	8
Türbin Giriş Bağlı Nem Oranı	%	56	--	74
Türbin Giriş Gaz Toz İçeriği	mg/Nm ³	5	5	5
Türbin Elektrik Üretim Gücü	MW	--	8.48	10.5
Türbin Dönme Hızı	rpm	3000	3000	3000

3.1.6.1. Türbin Giriş Gaz Debisi

Yüksek fırınların sıvı ham demir elde etmesi sırasında açığa çıkarak soğutma ve temizleme amacıyla gaz temizleme ünitesinden geçirilerek temizlenip soğutulmuş temiz yüksek fırın gazının türbinden saatlik geçiş debisidir.

3.1.6.2. Türbin Giriş Gaz Basıncı

Yüksek fırınların sıvı ham demir elde etmesi sırasında, sıvı ham demirin redüklenmesi amacıyla fırının belirli bir tepe basıncına ihtiyacı bulunmaktadır. Fırından çıkan yüksek fırın gazı yüksek basınçta YFTBDT sistemine giriş yaparak sistemin giriş basıncını oluşturmaktadır.

3.1.6.3. Türbin Giriş Gaz Sıcaklığı

Yüksek fırınların sıvı ham demir elde etmesi sırasında açığa çıkan yüksek fırın gazının, gaz temizleme ünitesinden geçirilerek temizlenip soğutulduktan sonra türbine giriş yaptığı noktadaki gaz sıcaklığıdır.

3.1.6.4. Türbin Çıkış Gaz Basıncı

Yüksek fırınların sıvı ham demir elde etmesi sırasında açığa çıkan yüksek basınçlı yüksek fırın gazının YFTBDT sisteminden geçirildikten sonra türbinden çıkış yaptığı noktadaki basınçtır.

3.1.6.5. Türbin Giriş Bağlı Nem Oranı

YFTBDT sistemi girişindeki yüksek fırın gazının bünyesinde su buharı halinde ihtiva ettiği mevcut basınç ve sıcaklık şartlarında tutabildiği azami su miktarına oranıdır.

3.1.6.6. Türbin Giriş Gaz Toz İçeriği

Yüksek fırınların sıvı ham demir elde etmesi sırasında açığa çıkan kirli yüksek fırın gazının gaz temizleme ünitesinden geçirilip temizlenip soğutulduktan sonra türbine giriş yaptığı noktadaki temiz yüksek fırın gazının ihtiva ettiği yüksek fırın gazı tozu miktarıdır.

3.1.6.7. Türbin Elektrik Üretim Gücü

YFTBDT sisteminin içerisinden geçen yüksek fırının gazının içerdiği kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sırada elde edilen net güç miktarıdır.

3.1.6.8. Türbin Dönme Hızı

Türbinin içerisinden geçen yüksek fırın gazının türbin kanatlarına çarparak türbinin dönmesi sonrası türbinin sisteminin tasarlanmış radyal dönme hızıdır.

3.1.7. Yüksek Fırın Performansına Bağlı Değerlendirmeler

Yüksek fırına ait sıvı ham demir elde edilme işlemi sırasında işletme şartlarına bağlı tepe basıncı, ana kollektör basıncı, kirli gaz sıcaklığı, temiz gaz sıcaklığı ve bu veriler sonucunda YFTBDT sistemi jeneratör çıkış gücü değerlendirilebilir.

Yüksek fırın işletme şartlarına bağlı olarak yıl içerisinde planlı ve plansız duruşlar olabilmekte ve duruş süreçlerinde YFTBDT sisteminde de bakım çalışmaları yapılacak olması sebebiyle elektrik enerjisi üretimi yapılamayacaktır. Ayrıca YFTBDT sisteminin çalıştırılması ve sistemden elektrik enerjisi elde edebilmek için türbin çalışma kriterleri sebebiyle düşük tepe basıncında üretim yapılamayacak olup, yüksek fırın tepe basıncı by-pass hattı üzerinden sağlanacaktır. 2018 yılında yüksek fırının aylık ortalama işletme verileri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. 2018 Yılı yüksek fırın çalışma parametreleri.

2018	Yüksek Fırın		
	Tepe Basıncı (kPa)	Düşürücü V. Sonrası Basıncı (kPa)	Gaz Sıcaklığı (°C)
Ocak	117	4-5	108
Şubat	117	4-5	120
Mart	117	4-5	125
Nisan	114	4-5	125
Mayıs	115	4-5	128
Haziran	117	4-5	131
Temmuz	121	4-5	125
Ağustos	127	4-5	140
Eylül	121	4-5	144
Ekim	116	4-5	137
Kasım	125	4-5	130
Aralık	122	4-5	130

BÖLÜM 4

SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

4.1. TERMODİNAMİK ANALİZ

Bu çalışmada, yüksek fırının elektrik enerji tüketimleri, turbo körük hava debileri, gaz sıcaklıkları, gaz temizleme ünitesi giriş ve çıkış hat basınçları ve gaz içerisinde ihtiva ettiği toz miktarı gibi işletme parametreleri incelenmiştir. Bu verilere bağlı adyabatik işin hesaplamaları, YFTBDT sistemin türbin çıkış yüksek fırın gazı sıcaklığı hesaplanmaları ve adyabatik genleşmelere bağlı denklemler oluşturulacaktır.

4.1.1. Güç Hesaplamaları

Yüksek fırın gazının ihtiva ettiği enerjinin, YFTBDT sisteminde basıncının düşürülmesi ile birlikte faydalı güce dönüştürülmesi işlemi gerçekleştirilirken, bu enerjinin dönüştürülmesi ile ilgili olarak giriş ve çıkış gaz sıcaklığı farkının değişiminin elde edilen faydalı enerjiye doğrudan etkisi bulunmaktadır.

YFTBDT sisteminin gücünü tayin etmek için güce etki eden debi, yoğunluk, ısı depolama kapasitesi, basınç ve sıcaklık parametrelerin kullanılması sonucunda, Eşitlik 4.1'de faydalı elektrik enerjisine çevrilen güç;

$$W = \dot{V} \rho x c_p x \Delta T x \eta_T x \eta_G \quad (4.1)$$

olarak elde edilmektedir [17].

Yüksek fırından YFTBDT sistemine gelen gazın sıcaklık ve basıncına bağlı olarak, YFTBDT sisteminde iş yapması ve ulaştığı çıkış sıcaklığı neticesinde oluşan sıcaklık farkının fonksiyonel değişimi Eşitlik 4.2'den elde edilmektedir.

$$\Delta T = T_g x \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (4.2)$$

4.1.2. Enerji ve Entropi Analizi

Bir sistemin iş yapabilme kapasitesi enerji olarak adlandırılmaktadır. Enerji; ısı, mekanik, kinetik, potansiyel, elektrik, manyetik, kimyasal, nükleer gibi değişik biçimler alabilir ve bunların tümünün toplamı, sistemin toplam enerjisini oluşturur. Manyetik, elektrik, yüzey etkileri ve diğer etkiler göz ardı edildiğinde, bir sistemin toplam enerjisi kinetik, potansiyel ve iç enerji toplamından oluşur ve Eşitlik 4.3'teki gibi ifade edilmektedir.

$$E_{sistem} = U + KE + PE \quad (4.3)$$

Burada U iç enerjiyi, KE kinetik enerjiyi, PE ise potansiyel enerjiyi ifade etmektedir. Sistemin enerji değişimi ise Eşitlik 4.4 şeklinde ifade edilir,

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) \quad (4.4)$$

Birim kütle için yazıldığında ise Eşitlik 4.5'te görünen şekli alır:

$$\Delta e_{sistem} = e_2 - e_1 = (u_2 - u_1) + (ke_2 - ke_1) + (pe_2 - pe_1) \quad (4.5)$$

Sistemin bir referans noktasına göre hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji (KE) denir ve Eşitlik 4.6'da görünen,

$$KE = m \frac{v^2}{2} \quad (4.6)$$

ifadesi ile elde edilir. Birim kütle için yazıldığında ise Eşitlik 4.7;

$$ke = \frac{v^2}{2} \quad (4.7)$$

bağıntısı bulunur. Bir sistemin konumundan dolayı sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji (PE) denir ve ağırlık merkezi herhangi bir referans noktasından z yüksekliği kadar çıkarılan, yer çekimi ivmesinin g olduğu bir yerdeki sistemin potansiyel enerjisi (PE) Eşitlik 4.8’de görünen;

$$PE = mgz \quad (4.8)$$

ifadesi ile elde edilir. Birim kütle için yazıldığında Eşitlik 4.9’deki gibi ifade edilir.

$$pe = gz \quad (4.9)$$

4.1.3. Enerji Analizi

Termodinamik yoldan incelenmek istenen sınırları belli bölgeye sistem denir. Sistem çevresinden sistem sınırı adı verilen hayali bir yüzey ile kesin olarak ayrılır. Termodinamik analizde sistemler, belirli bir kütle için veya belirli bir bölgenin analize esas alınmasına göre kapalı veya açık olarak nitelendirilir.

Kapalı sistem diğer adıyla kontrol kütle sınırlarından kütle geçişi olmayan sistemlerdir. Kapalı sistemlere kütle girişi veya çıkışı olmaz ancak enerji, ısı ve/veya iş şeklinde sistem sınırlarından aktarılabilir. Açık sistem veya kontrol hacmi ise sınırlarından kütle geçişi ve, ısı ve/veya iş şeklinde enerji alışverişi olan sistemlerdir. Bu tezde sürekli akışlı açık sistemler incelenecektir. Sürekli akışlı açık sistemlerde sürekli bir akış söz konusudur, birikme olmaz ve kontrol hacminin herhangi bir noktasındaki akışın özellikleri zamana göre değişmez.

4.1.4. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerde Kütle Korunumu

Açık sistemlerde birim zamanda kütle denkliği aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \text{Birim Zamanda} \\ \text{Kontrol} \\ \text{Hacmindeki} \\ \text{Birikme Hızı} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Birim Zamanda} \\ \text{Kontrol Hacmine} \\ \text{Giren} \\ \text{Toplam Kütle} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Birim Zamanda} \\ \text{Kontrol Hacminden} \\ \text{Çıkan} \\ \text{Toplam Kütle} \end{bmatrix}$$

Bir başka deyişle, kontrol hacmindeki kütle birikiminin zamanla değişimi, kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan kütle akımları arasındaki farka eşittir ve Eşitlik 4.10'daki gibi ifade edilir.

$$\frac{dm_{KH}}{dt} = \sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta \quad (4.10)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde ise kontrol hacminde kütle birikimi olmayacağından sürekli akışlı açık sistemler için kütle korunumu Eşitlik 4.11 şeklinde yazılır:

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\zeta \quad (4.11)$$

4.1.5. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerde Enerjinin Korunumu

Kontrol hacmindeki enerji birikiminin zamanla değişim kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan enerji akımları arasındaki farka eşittir. Kontrol hacmine enerji, iş veya ısı transferiyle girebilir veya çıkabilir ve birim zaman için Eşitlik 4.12 olarak ifade edilir,

KH'deki enerjinin birikme hızı = KH'de ısı ve iş olarak aktarılan enerji + KH'ye kütle ile giren toplam enerji - KH'den kütle ile çıkan toplam enerji

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) \quad (4.12)$$

şeklinde yazılır. Sürekli akışlı açık sistemlerde kontrol hacminde birikim olmayacağından, sürekli akışlı açık sistemler için eşitlik Eşitlik 4.13'da görünen şekilde yazılır:

$$\dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{v_g^2}{2} + gz_g \right) - \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{v_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) \quad (4.13)$$

4.1.6. Ekserji Analizi

Ekserji terimi, Yunanca *ex* (dış) ve *ergon* (kuvvet ve iş) kelimelerinden türetilmiş ve ilk kez 1824 yılında Carnot tarafından kullanılmıştır. Ekserji analizi konusundaki çalışmalar ise Gouy ve Stodola ile başlamıştır. Bu yüzyılın başlarında, Jouguet, Lewiss ve Randall, DeBaufre, Darrieus, Keenan, Lerberghe ve Glansdorf gibi bilim adamları termodinamiğin ve ekserji kavramının gelişimine büyük katkılar sağlamış; 1935'de Bosnjakovic ekserji kavramını sistemlerin termodinamik analizlerinde uygulama çalışmalarını başlatmıştır [18,19].

Ekserji, sistem halinin çevre haline uzaklığının bir ölçüsüdür. Dolayısıyla, sistemin ve çevrenin birlikte bir özelliğidir. Ancak, çevre belirtildiğinde, ekserjiye sadece sistem özelliklerinin değerleri cinsinden bir değer verilebilir; böylece, ekserji, sistemin ekstensif bir özelliği sayılabilir. Ekserji diğer ekstensif özellikler (kütle, enerji ve entropi) gibi sistemler arasında aktarılabilir [20].

Ekserji, yok edilebilir ve genelde korunmaz. Bir sistemin çevre ile aniden dengeye geldiği ve işin hiç elde edilemediği durum, ekserjinin tamamen yok edildiği, sınır durumudur. Başlangıçta var olan iş yapabilme kapasitesi, ani proseste tamamen harcanır. Ayrıca, böyle ani bir değişikliği sağlamak için iş gerekmediği için, ekserjinin değeri negatif olamaz ve en azından sıfırdır [20].

Enerjinin faydalı kısmını ekserji oluştururken, enerjinin kullanılmayan yani bir başka enerji türüne dönüştürülemeyen kısmı “anergi” olarak adlandırılır. Dolayısıyla, bütün enerji türleri için en genel ifade Eşitlik 4.14 şeklinde yazılabilir [21].

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (4.14)$$

Elektrik enerjisi ve mekanik enerji gibi enerji türlerinin anergi bölümü sıfıra eşit iken, çevrenin iç enerjisinin tamamı anergi olduğu için ekserjisi sıfıra eşit olur [22]. Enerji ve ekserji arasındaki karşılaştırma Çizelge 3.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Enerji ile ekserjinin karşılaştırılması [23].

ENERJİ	EKSERJİ
<ul style="list-style-type: none"> • Sadece enerji akımına ve maddenin parametrelerine bağlıdır ancak çevresel parametrelere bağlı değildir. • Hareket üretme yeteneğidir. • Sıfırdan farklı değerlere sahiptir. • Tüm proseslerde her zaman korunur ve yoktan var, vardan yok edilemez. • Tüm prosesler için termodinamiğin birinci yasası ile analiz edilir. • Sadece miktarın bir ölçüsüdür. • Tüm prosesler için termodinamiğin ikinci yasası ile sınırlıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maddenin parametrelerine, enerji akımına ve çevresel parametrelere bağlıdır. • İş üretme yeteneğidir. • Çevre şartlarında sıfıra eşittir. • Tersinir prosesler için her zaman korunur, tersinmez proseslerde kayıplara uğrar. • Tersinir prosesler için termodinamiğin birinci yasası ile analiz edilir. • Entropi oluşumundan dolayı oluşan kayıpları göz önüne aldığından hem miktarın hem de kalitenin bir ölçüsüdür.

Ekserji analizi için çevrenin tanımı yapılırken temel ilke, çevrenin tam bir denge durumunda olmasıdır. Bir madde akımının ekserjisi değerlendirilirken, çevrenin ısı ekserjisinin sıfır olduğu ve serbestçe tanımlanan yaygın çevresel maddelerden oluştuğu kabul edilir. Bu yaygın çevresel maddeler, birbirleriyle denge halindedir ve bunların “ölü hal” durumunda oldukları söylenir [24].

Bir sistem ölü halde iken çevresi ile eşit sıcaklık ve basınçtır. Yani çevre ile ısı ve mekanik ya da termodinamik dengededir. Ayrıca, sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Sistem ölü halde iken çevresiyle kimyasal reaksiyona giremez. Sistemin ölü hal özellikleri P_0 , T_0 , h_0 , U_0 ve S_0 'dır. Ölü hal durumunda $P_0 = 1 \text{ atm}$ (101.325 kPa) ve $T_0 = 25 \text{ °C}$ (298.15 K)'dir [25].

“Kısıtlı hal” ya da “yarı ölü” durumu, sadece mekanik ve ısı denginin sağlanması gereken kısıtlı bir denge şeklidir. Bu durumda, çevre koordinatlarına göre sıfır hız ve yükseklikte, T_0 ve P_0 'da, kütleli akış olmaksızın dolayısıyla sabit miktarda madde incelenir [20].

4.1.6.1 Ekserji Bileşenleri

Nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilim etkileri göz ardı edildiğinde, bir sistemin toplam ekserjisi dört bileşenden oluşurak Eşitlik 4.15 şeklinde sağlanır [21].

$$\begin{aligned} \text{Kinetik ekserji,} & \quad \dot{e}x_{kinetik} \\ \text{Potansiyel ekserji,} & \quad \dot{e}x_{potansiyel} \\ \text{Fiziksel ekserji,} & \quad \dot{e}x_{fiziksel} \\ \text{Kimyasal ekserji,} & \quad \dot{e}x_{kimyasal} \end{aligned}$$
$$\dot{e}x = \dot{e}x_{kinetik} + \dot{e}x_{potansiyel} + \dot{e}x_{fiziksel} + \dot{e}x_{kimyasal} \quad (4.15)$$

4.1.6.2. Kinetik Ekserji

Kinetik enerji, mekanik enerjinin bir şeklidir ve tamamen işe dönüşebilir. Bu nedenle bir sistemin kinetik enerjisinin ekserjisi veya is potansiyeli çevrenin sıcaklık ve basıncına bağımsız olarak Eşitlik 4.16'teki gibi kendi kinetik enerjisine eşittir.

$$\dot{e}x_{kinetik} = \frac{v^2}{2} \quad (4.16)$$

Burada, v , çevre koordinatlarına göre hızı belirtmektedir.

4.1.6.3. Potansiyel Ekserji

Potansiyel enerji mekanik enerjinin bir şeklidir ve dolayısıyla işe tamamen dönüşebilir. Böylece bir sistemin potansiyel enerjisinin ekserjisi, çevrenin sıcaklık ve basıncına bağlı olmaksızın kendi potansiyel enerjisine eşittir [25].

$$\dot{e}x_{potansiyel} = gz \quad (4.17)$$

Burada, z, çevre koordinatlarına yüksekliği belirtmektedir.

4.1.6.4. Fiziksel Ekserji

Çevreye göre hareketsiz olan bir sistemin ($\dot{e}x_{kinetik} = \dot{e}x_{potansiyel} = 0$) fiziksel ekserjisi ($\dot{e}x_{fiziksel}$), sistem T sıcaklığı ve P basıncındaki ilk halinden, T_0 sıcaklığı ve P_0 basıncındaki kısıtlı ölü hale geçerken elde edilebilen maksimum teorik yararlı iştir.

4.1.6.5. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji ($\dot{e}x_{kimyasal}$), sistem kısıtlı ölü halden, çevre ile tam dengede olduğunda ölü hale geçerken elde edilebilen maksimum teorik yararlı iştir. Uygun bazı çevre malzemelerinin özellikleri referans alınarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserjiler standart çevre sıcaklığına ($T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) ve basıncına ($P_0 = 1 \text{ atm}$) bağlıdır [22].

4.1.6.6. Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Ekserji Denkliği

Tersinmez süreçlerde ekserji korunmaz ve daima yok edilir. Buna göre açık sistemler için ekserji denkliği Eşitlik 4.18'de görüldüğü gibi ;

$$\frac{dE_{KH}}{dt} = \sum_k 1 - \left(\frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W}_{KH} - p_0 \frac{dV_{KH}}{dt}\right) + \sum \dot{m}_g e_g - \sum \dot{m}_\zeta e_\zeta - T_0 S_{\text{üretilen}} \quad (4.18)$$

ile ifade edilir. Bu denklemdaki dE_{KH} / dt ve dV_{KH} / dt sırasıyla kontrol hacminin ekserji ve hacim değişimi şeklinde tanımlanır. Sürekli akışlı açık sistemlerde $dE_{KH} / dt = 0$ ve $dV_{KH} / dt = 0$ olacağından Eşitlik 4.19 aşağıdaki gibi yazılır:

$$\sum \dot{m}_g e_g - \sum \dot{m}_\zeta e_\zeta - T_0 S_{\text{üretilen}} = \dot{W}_{KH} - \sum_k 1 - \left(\frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k \quad (4.19)$$

4.1.6.7. İş Ekserjisi

İş kolayca diğer bir enerji dönüştürülebildiğine göre, Eşitlik 4.20’de işin tamamı ekserjisine eşittir.

$$\dot{E}_{i\dot{s}} = \dot{W} \quad (4.20)$$

4.1.6.8. Tersinir İş

Tersinir iş, bir sistemin belirli bir başlangıç hali ve son hal arasında bir hal değişimi geçirdiğinde, üretilebilen yararlı işin en fazla miktarı olarak tanımlanır.

Tersinir iş ve yararlı iş arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki mevcut tersinmezliklerden kaynaklanır ve bu fark tersinmezlik olarak adlandırılır ve Eşitlik 4.21’deki gibi ifade edilir:

$$I = W_{tr,\dot{\varsigma}} - W_{y,\dot{\varsigma}} \quad (4.21)$$

Tersinmezlik, ekserji yok oluşuna eşittir. Tersinmezlik, harcanmış iş potansiyeli veya iş yapmak için kaybedilen fırsat olarak görülebilir [26].

4.1.7. Ekonomik Analiz

1. Yatırım maliyetlerinin kestirilmesi
2. Ürün maliyetinin, enflasyon, fiyat artışı, fiyat dengelenmesi, aşınma, vergiler ve tesis ekonomisine dayalı gerçekçi kabuller temelinde hesaplanması
3. Çeşitli yatırımların kar analizinin yapılması ve geri ödeme sürelerinin belirlenmesi amacıyla uygulanır.

İlgili sistemin ekonomik açıdan incelenmesi esnasında, batan fon faktörü (SFF), yıllık kurtarma değeri (ASV), yıllık bakım maliyeti (AMC) ve yıllık faiz oranı (i), parametreleri dikkate alınmalıdır. Sermaye (yatırım) maliyeti (B), sermaye kurtarma

faktörü (CRF) Eşitlik 4.21 olarak hesaplanır ve sistemin ömrü (n) olarak hesaplanır [27,28].

$$CRF = \frac{ix(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.22’de sabit yıllık maliyet;

$$FAC = B(CRF) \quad (4.22)$$

Tesisin yatırım maliyeti (B) olarak hesaplanır ve Eşitlik 4.23’de kurtarma değeri (S), P’nin beşte biri olarak hesaplanır.

$$S = 0.2(B) \quad (4.23)$$

Eşitlik 4.24 ve Eşitlik 4.25’de görünen SFF ve ASV aşağıdaki gibi idare edilir [29].

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (4.24)$$

$$ASV = S(SFF) \quad (4.25)$$

Sistemin yıllık bakım maliyeti Eşitlik 4.26 (AMC); temizlik, periyodik ve acil bakımlardan kaynaklanan maliyettir. Burada, sabit yıllık maliyetin (FAC) %15’i sabit yıllık bakım maliyeti olarak kabul edilir;

$$AMC = 0.15(FAC) \quad (4.26)$$

Sonuç olarak yıllık maliyet Eşitlik 4.27 şeklinde ifade edilir.

$$AC = FAC + AMC + ASV \quad (4.27)$$

4.1.8. Çevresel Ekonomik Analiz

Dünyadaki enerji ihtiyacının % 80'i fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Bu, atmosfere salınan CO₂ miktarının hızla artmasına neden olur. Fosil yakıtların enerji talebini karşılama rolü devam ederse, endüstriyel CO₂ emisyonlarının 2035 yılına kadar 35 GT seviyesine ulaşacağı ve atmosfer sıcaklığının 3.6 °C artacağı öngörülmektedir. Bu olumsuz sonuçlar çevresel raporlarda belirtilmiştir ve insanlar çevre sorunları üzerinde daha hassas hale gelmiştir. Bu nedenle, çevre kirliliği, küresel ısınma gibi bazı temel sorunların siyasi görüşleri değiştireceği ve fosil yakıt kullanımının 2040 yılına kadar azalacağı beklenmektedir. Bu beklenti, çevre dostu, temiz, ucuz ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynaklarının gereksiniminin önünü açmaktadır [30].

Enviroekonomik (çevresel maliyet) analiz, karbon fiyatı (veya CO₂ emisyon fiyatı) veya açığa çıkan karbon miktarı kullanılarak yapılır. Bir karbon fiyatı belirlenmesi ulusal sera gazı emisyonlarını azaltmak için önemli bir yöntemdir. Karbon fiyatı, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarının emisyonunun maliyetini hesaplayan bir yaklaşımdır. Atmosfere salınan karbon (CO₂) bedelini ödemek, insanların ve ülkelerin karbon emisyonlarını azaltma yönünde teşvik edecektir. Aynı zamanda bu durum atmosfere karbon yaymayan yenilenebilir enerji teknolojilerinin önemini ortaya koyacaktır. Sovacool'un 2008 yılında yayınladığı makalesinde kömürden elektrik üretimi için ortalama CO₂ eşdeğer yoğunluğu yaklaşık 960 g CO₂/kWh olarak verilmiştir. Aslında bu değer %40'lık iletim ve dağıtım kayıpları ve %20'lik kullanılan verimsiz elektrik aletlerinden kaynaklı kayıpları düşünüldüğünde bu değer 2.08 kg CO₂/kWh olacaktır [31,32,33]. Bu nedenle, gerçekleşen CO₂ azaltımı Eşitlik 4.28 şeklinde verilir:

$$\phi_{CO_2} = \Psi_{CO_2} x W \quad (4.28)$$

burada ϕ_{CO_2} saatte azaltımı sağlanan CO₂ miktarını (kg CO₂/h) ve Ψ_{CO_2} kömürden enerji üretimi esnasında açığa çıkan ortalama CO₂ emisyonu miktarını (2.08 kg CO₂/kW h) gösterir. Elzen ve ark. 2011 yılında CO₂ fiyatının 13 \$/t CO₂ ile 16 \$/t

CO₂ arasında olduğunu bildirmiştir. Hesaplamalarda bu değerlerin ortalaması olan 1.45 ¢/kg CO₂ değeri kullanılmıştır [34].

$$Z_{CO_2} = P_{CO_2} x \phi_{CO_2} \quad (4.29)$$

Eşitlik 4.29'da ifade edilen Z_{CO_2} çevresel maliyet (saatlik CO₂ azaltımı fiyatı, ¢/h), P_{CO_2} kg CO₂ başına karbon fiyatıdır ve 1.45 ¢/kg CO₂ olarak alınmıştır.

4.1.9. Çevresel Analiz

Demir-çelik fabrikalarında enerji üretimi termik santraller ile gerçekleştirilmektedir. YFTBDT sistemi ile elde edilecek olan enerji miktarı karşılığınca termik santrallerin çevreye olan etkisi azaltılacaktır.

4.1.9.1. Termik Santrallerde Kullanılan Birincil Enerji Kaynaklarının Yarattığı Çevresel Etkiler

Termik santrallerin işletilmesi sonucunda çeşitli çevre sorunları da meydana gelmektedir. Bunun yanında termik santralleri, hidroelektrik santraller kadar geniş bir alanda olmasa da arazi kullanımı açısından bazı değişiklikler yol açabilmektedir.

4.1.9.2. Termik Santrallerin Neden Olduğu Hava Kirliliği

Termik santrallerin çevre üzerindeki etkilerden bir kısmı baca gazları ile oluşmaktadır. Türkiye madenleri genel olarak kükürt ve radyoaktif madde bakımından zengindir. Bu çeşitli baca gazları ile partiküllerin doğal ortama istenmeyen maddeler olarak karışması sorunu meydana getirmektedir. Hava kirliliğinin önüne geçebilmek için hava kalitesi sınır değerleri ile atmosfere bırakılan atıkların emisyon sınır değerleri belirlenmiştir. 1896 yılında yayınlanan “Hava Kalitesinin Koruma Yönetmeliği”, eskiden yapılmış veya yapımı devam eden termik santraller ile yeni yapılacak olan termik santralleri, büyüklüklerine göre ayrı ayrı değerlendiren hükümlere sahiptir. Bu değerlerin aşılması, çevremiz için son

derece önemlidir. Bunun için termik santrallerde bir dizi önlemler alınması gerekmektedir.

Termik santrallerden çıkan ve çevreye zarar veren baca gazlarından birisi de kükürttür. Termik santrallerin bacalarında bulunan “Baca Gazı Desülfürizasyon” tesisleri bacalardan çıkan kükürt ve küçük kül parçalarını %99’a kadar tutabilmektedir. Farklı bir enerji üretim teknolojisiyle çıkacak olan entegre tesis, YFTBDT sistemi ile üretim kapasitesi karşılığında bu çevresel etkileri azaltacaktır [35].

4.1.9.3. Termik Santrallerin Yarattığı Su Kirliliği

Sanayi-çevre ilişkisi açısından su kaynaklarının temizliği veya sanayi faaliyetleriyle kirlenmemesi oldukça önemlidir. Termik santraller buhar üretme, soğutma ve temizleme işlemleri için önemli miktarlarda su kullanılmamaktadır. Termik santrallerde tüketilen soğutma suları kullanılmadan önce çeşitli kimyasal işlemlerden geçmektedir. Fakat bu işlemler suların $FeSO_4$ bakımından zenginleşmesine sebep olmakta ve işlem görmüş suyu kaynağına geri dönmesi sonrasında ise su kaynaklarının kirliliği ortaya çıkmaktadır [36].

Bu etkilerden bir diğeri ise, atık suyun sıcaklığı ile ilgilidir. Termik santrallerde yakma işlemi sonucunda önemli oranda yüksek basınç ve sıcaklığa sahip buhar üretilmekte ve elektrik üretiminde elde edilen buhar kullanılmaktadır. Termik santrallerde atık olarak çıkan ısının küçük bir bölümü baca gazı içinde ve kalan büyük bölümü ise su ile dış ortama atılmaktadır [37].

4.1.9.4. Termik Santrallerin Yarattığı Toprak Kirliliği

Türkiye’deki madenlerde önemli miktarda radyoaktif madde bulunmaktadır. Bu maddeler yanma sonucu baca gazları veya kazandan çıkan küllerle birlikte atılmaktadır. Söz konusu radyoaktif maddeler hem yüzey ve yeraltı sularını kirliletmekte hem de toprak kirliliği meydana getirmektedir.

4.1.9.5. Termik Santrallerin Canlılar Üzerinde Yarattığı Etkiler

Termik santrallerden çevreye yayılan gazların canlılar üzerinde birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bunlardan biri de bitkiler üzerine olan etkileridir. Söz konusu etki sonucunda bitki örtüsünün gelişmesi yavaşlayarak kesintiye uğramaktadır.

Atmosfere bırakılan veya termik santrallerden meydana gelen atıkların çevre üzerinde etkileri olduğu gibi insanlar üzerinde de ciddi etkileri bulunmaktadır. Hava kirliliğine bağlı olarak bronşit, amfizem ve astım gibi hastalıklar ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak, üretim yapacak olan 8.48 MW gücündeki YFTBDT sistemi ile hem çevreye olumsuz etki oluşturulmadan enerji üretilebilecek hem de üretim kapasitesince termik santrallerden meydana gelebilecek olan etkiler azaltılacaktır.

BÖLÜM 5

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

YFTBDT'nin beslendiği yüksek fırının yıl içerisinde gerçekleşebilecek olan planlı ve plansız duruşlar dışında yıl içerisinde ortalama 8000 saat çalışacağı öngörülmüştür. 2018 yılının verileri ile YFTBDT'nin giriş basıncı, sıcaklığı ve debisi kullanılarak elde edilebilecek faydalı enerji hesaplanmıştır. Ayrıca 2018 yılında gerçekleşen veriler dışında olabilecek farklı basınç, sıcaklık ve debilerde de elde edilebilecek güç değerlendirilmiştir. Bütün hesaplamalarda YFTBDT'nin çıkış basıncı 10 kPa olarak alınmıştır. 2018 yılında, yüksek fırının çalışma performansına göre, türbin giriş basıncı 114 kPa ile 127 kPa arasında, türbin giriş sıcaklığı 108 °C ile 144 °C arasında, yüksek fırın gazı üretimi yaklaşık olarak 165 000 Nm³/h ile 200 000 Nm³/h arasında gerçekleşmiş ve türbin çıkış basıncı 10 kPa, yüksek fırın gazı yoğunluğu 1.25 kg/Nm³, k değeri 1.41 ve c_p değeri 1.03 kJ/kgK alınarak yüksek fırına ait adyabatik iş, termodinamik güç, entropi üretimi, ekserji üretimi ve kaybı, YFTBDT gücü ve verimi hesaplanmıştır.

P _g	: 230 kPa
P _ç	: 10 kPa
T _g	: 150 °C
Gaz Yoğunluğu	: 1.25 kg/Nm ³
c _p	: 1.03 kJ/kgK
k	: 1.41
η _s	: %40.72
Debi	: 230 000 Nm ³ /h
Güç	: 8480 kW

Eşitlik 5.1’de YFTBDT’nin tasarım verilerine göre gaz debisi, gaz sıcaklığı, özgül ısı katsayısı, gaz yoğunluğu, izantropik verim çarpanları ile giriş-çıkış basıncı ve gaz sabitinin kullanılması sonucunda üretilen enerjinin denkliği elde edilerek örnek performans hesaplamaları yapılmış ve bu eşitlik sonucunda tasarım gücü olan 8480 kW elde edilmiştir.

$$W = 230\,000 \frac{Nm^3}{h} \times 1.25 \frac{kg}{m^3} \times \frac{1h}{3600s} \times 1.03 \frac{kJ}{kgK} \times 423.15K \times \left[1 - \left(\frac{10}{230} \right)^{\frac{1.41-1}{1.41}} \right] \times \%40.72 \quad (5.1)$$

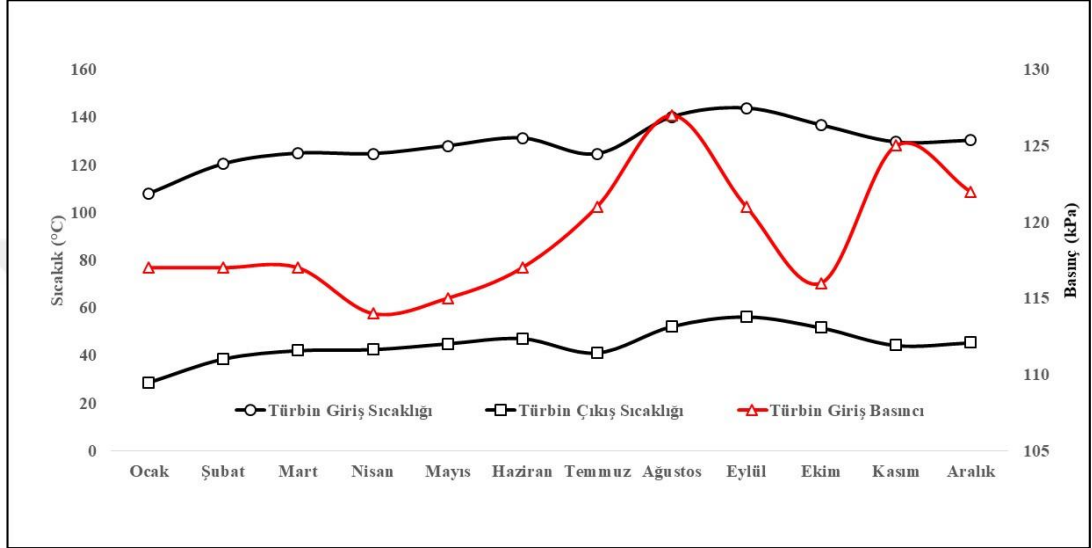
Elde edilen denklik ile; 2018 yılındaki, fabrikanın sıvı ham demir üretim ihtiyacına göre değişiklikler gösteren yüksek fırın gazı üretim değerleri kullanılarak, YFTBDT’in aylık ortalama performans verileri hesaplamaları Çizelge 5.1’deki yapılmıştır.

Çizelge 5.1. 2018 Yılı verilerine göre YFTBDT performans hesaplamaları.

Ay	Giriş Basıncı (kPa)	Ort.Debi (Nm ³ /h)	Giriş Sıcaklığı (K)	Giren Enerji (kW)	Güç (kW)	η_{termal}	Çıkış Sıcaklığı (K)
Ocak	117	186 000	381.0	5511	5270	95.6	301.8
Şubat	117	160 000	393.5	5459	4683	85.8	311.7
Mart	117	177 000	398.0	6322	5239	82.9	315.3
Nisan	114	163 000	397.8	5808	4787	82.4	315.7
Mayıs	115	172 000	401.1	6334	5106	80.6	318.1
Haziran	117	174 000	404.4	6611	5233	79.2	320.3
Temmuz	121	185 000	397.8	6591	5523	83.8	314.3
Ağustos	127	195 000	413.2	8025	6127	76.4	325.4
Eylül	121	177 000	416.9	7518	5539	73.7	329.4
Ekim	116	167 000	409.8	6670	5078	76.1	324.8
Kasım	125	181 000	402.7	6767	5519	81.6	317.4
Aralık	122	179 000	403.4	6737	5432	80.6	318.5
Tasarım	230	230 000	423.2	10 282	8474	82.4	320.1
Ay	Entropi Değişimi (kJ/kgK)	Ekserji (kW)	η_{ekserji}	İzantropik Çıkış Sıcaklığı (K)	Kayıp Ekserji (kW)	CO ₂ (kgCO ₂ /h)	Z (\$/h)
Ocak	0.498	14 881	35.4	186.3	9612	10 961.5	15 894
Şubat	0.498	12 951	36.2	192.5	8268	9739.9	14 123
Mart	0.498	14 386	36.4	194.7	9146	10 897.4	15 801
Nisan	0.492	13 111	36.5	196.0	8325	9956.7	14 437
Mayıs	0.494	13 925	36.7	197.2	8819	10 620.6	15 400
Haziran	0.498	14 224	36.8	197.8	8991	10 883.9	15 782
Temmuz	0.505	15 228	36.3	192.7	9705	11 488.5	16 658
Ağustos	0.516	16 577	37.0	197.3	10 450	12 745.1	18 480
Eylül	0.505	14 824	37.4	201.9	9285	11 520.9	16 705
Ekim	0.496	13 674	37.1	200.9	8596	10 561.4	15 314
Kasım	0.513	15 152	36.4	193.2	9632	11 480	16 646
Aralık	0.507	14 856	36.6	194.9	9424	11 298.6	16 383
Tasarım	0.653	24 062	35.2	170	15 588	17 626	25 558

Tesisin 2015 yılındaki yatırım maliyeti ve nisan ayındaki dolar kuru dikkat alınarak santralin geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Santralin yıllık ortamala çalışma süresi 8000 saat kabul edilmiştir. 2018 yılı verilerine göre, YFTBDT'ye en fazla saatte ortalama 195 000 Nm³ yüksek fırın gazı girmektedir. Yıllık faiz oranı %10, yıllık düzenli artış oranı %4, geri ödeme oranı %8 ve YFTBDT'nin işletme ömrü 20 olarak kabul edilmiştir. Tesisin ilk yatırım maliyeti 400 000 \$, yıllık yedek parça maliyeti

15 000 \$, seviyelendirilmiş işletme ve bakım maliyeti saatlik 5.8 \$ ve elektrik temin fiyatı 0.054 \$/kWh olarak belirlenmiştir. Tesisin bakım duruşları haricinde 8000 saat çalışacağı varsayılarak toplam gelir ve toplam giderleri belirlenmiş, elde edilen yıllık kazanç ise 2015 yılındaki yatırım bedeli ile oranlanarak geri ödeme süresi 0.15 yıl olarak hesaplanmıştır.



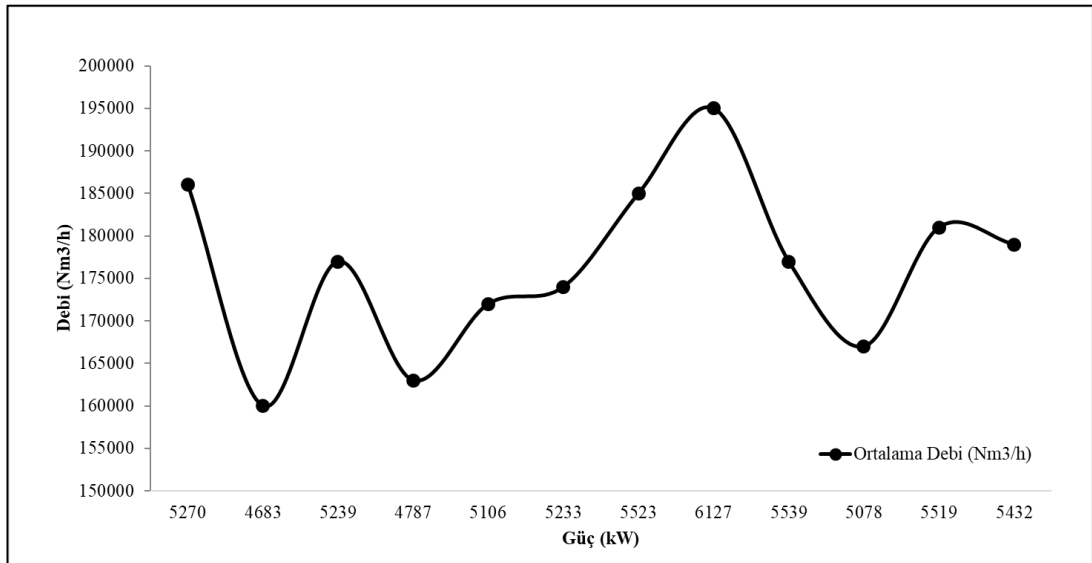
Şekil 5.1. Türbin çalışma parametrelerinin aylara göre değişimi.

Şekil 5.1'de Türbine ait giriş sıcaklığı, giriş basıncı ve çıkış sıcaklığı parametrelerin aylara göre değişimi görülmektedir. Türbin giriş sıcaklığı 108°C ile 144°C, çıkış sıcaklığı 28 °C ile 56 °C arasında değişirken giriş basıncı ise 117 kPa ile 127 kPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



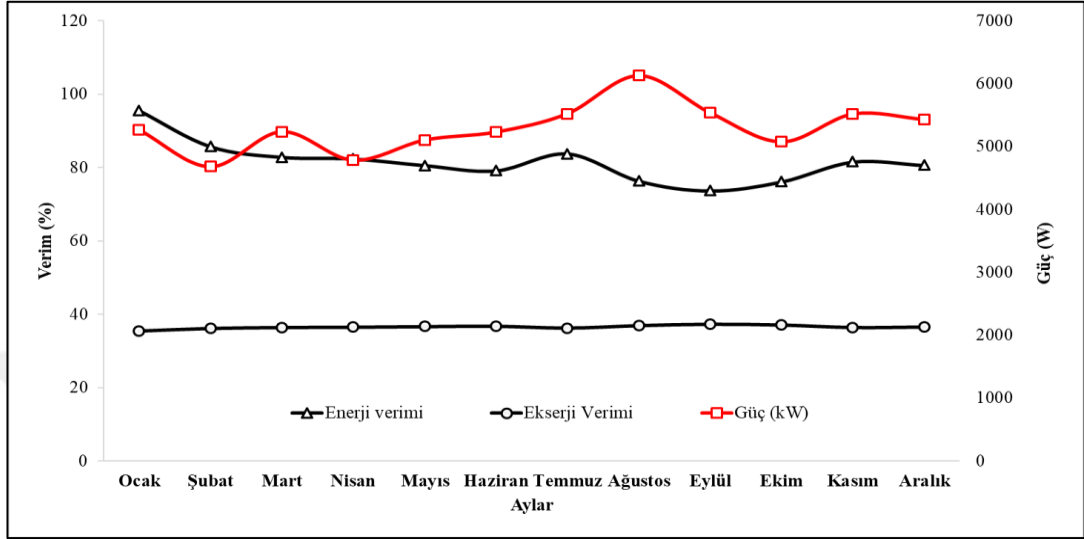
Şekil 5.2. Giriş basıncı ve sıcaklığa göre türbin gücündeki değişim.

Şekil 5.2’de ise giriş sıcaklığı ve basıncına göre türbin gücündeki değişim görülmektedir. Türbinde üretilen güç değeri 4683 kW ile 6127 kW arasında değişiklik göstermektedir. Sıcaklık ve basınç eğrileri birbirine paralel olarak artış gösterirken sıcaklık ve basınç arttığında türbinde üretilen gücünde arttığı görülmektedir.



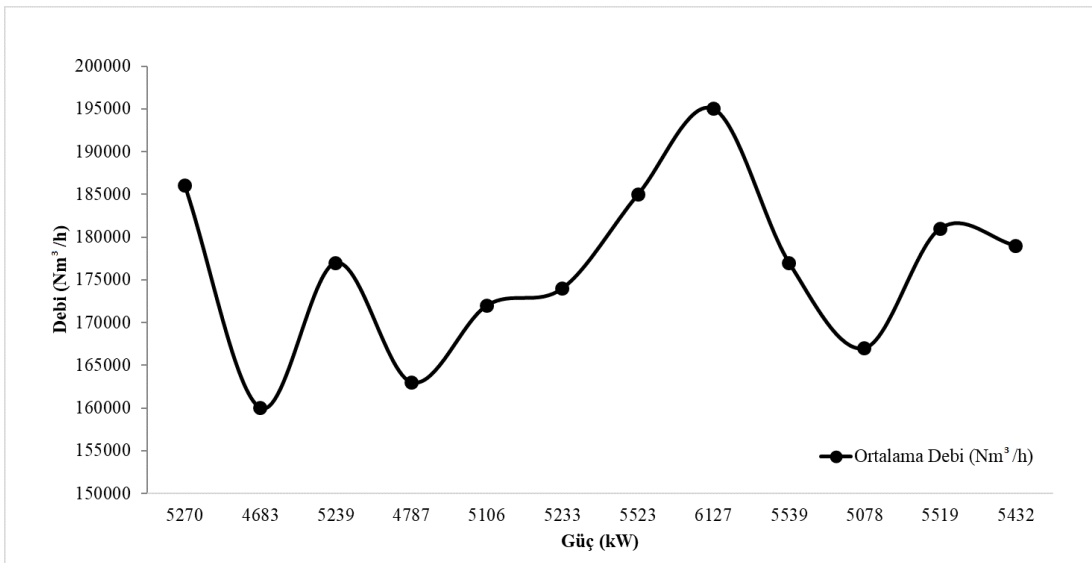
Şekil 5.3. Debiye bağlı güç değişimi.

Şekil 5.3'te ise debiye bağlı olarak türbin gücündeki değişim görülmektedir. Debi değeri 163 000-195 000 Nm³/h değerleri arasında değişmektedir ve debi değerinin artışına bağlı olarak üretilen güçte artmıştır.



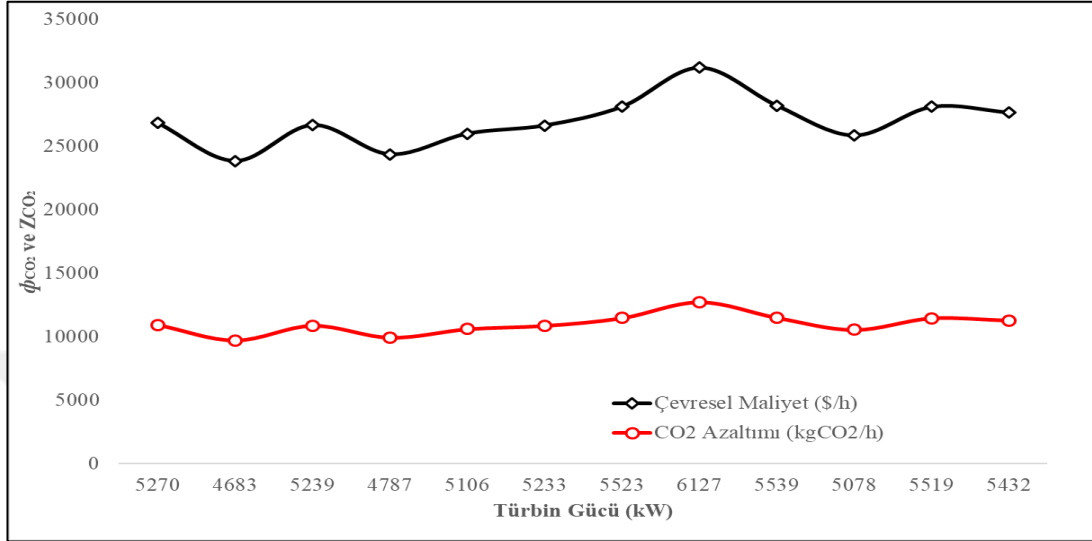
Şekil 5.4. Aylara göre performans değerleri.

Şekil 5.4'te ise aylara göre enerji verimi, ekserji verimi ve üretilen güç değerlerinin değişimi görülmektedir. Enerji verimi, %73 ile %95 arasında değişirken ekserji verimi %35 ile %38 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında türbin performans değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5. Ekserji sıcaklık ve debiye bağlı kayıpları.

Şekil 5.5'te Türbin giriş sıcaklığı ve debiye bağlı olarak ekserji kayıpları görülmektedir. Ekserji kayıpları değeri 8300 kW ile 10 450 kW değerleri arasında değişiklik göstermektedir.



Şekil 5.6. Çevresel maliyet analizi sonuçları.

Çevresel maliyet analizi sonuçları ise Şekil 5.6'da görülmektedir. Yapılan analizle sonucunda YFTBDT kullanımı ile yıllık yaklaşık olarak 132 ton CO₂ salınımı azaltılacaktır. Bununla beraber çevresel maliyet parametresi aylık ortalama 16 000\$ civarında hesaplanmıştır.

Tesisin 2015 yılındaki yatırım maliyeti ve Nisan 2019 ayındaki dolar kuru dikkat alınarak santralin geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Santralin yıllık ortalama çalışma süresi 8000 saat kabul edilmiştir. Yıllık faiz oranı yüzde üç ($i=0.03$), Kurtarma değeri yatırım maliyetinin yüzde yirmisi ($S=0.2$), yıllık bakım maliyeti yatırım maliyetinin yüzde onbeşi ($AMC=0.15$) olarak kabul edilmiştir. Ayrıca sistemin işletme ömrü yirmi ($n=20$) yıl olarak kabul edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonrasında, 2 755 900 \$ yıllık kazanç ve bu kazançla bağlı olarak geri ödeme süresi 0.15 yıl olarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

YFTBDT sistemi, yüksek fırına sahip işletmeler açısından çok büyük rol oynamakta olduğu görülmekte olup Brezilya, İtalya, Çin, Japonya, Güney Kore, Almanya gibi dünya ülkelerinde yoğun bir şekilde kullanılmakta olması bu sistemin enerji tasarrufu açısından önemini ortaya koymaktadır. Dünya ülkelerinde YFTBDT sisteminin kullanımının bu kadar yaygın olmasına karşın ülkemizde bulunan üç entegre tesiste 2015 yılı itibariyle kurulmaya başlanmış olup bu tesislerden toplamda 5 adet olan YFTBDT sisteminin biri teze konu olmuştur.

Bu çalışmada, demir-çelik fabrikasına bağlı yüksek fırın tarafından beslenecek olan YFTBDT sistemi konu edilmiştir. Yüksek fırın tesisinin 2018 yılının aylık ve yıllık tepe basıncı, yüksek fırından çıkan yüksek fırın gazının gaz temizleme tesisinde temizleme işlemi sonrası YFTBDT sistemine giren gazın giriş sıcaklığı, yüksek fırın gazı yoğunluğu, yüksek fırın gazı debisi incelenmiş ve veriler kayıt altına alınmıştır. Yüksek fırının çalışma şartlarına bakıldığında, fabrikanın değişken demir-çelik üretimiyle birlikte yıl içerisinde planlı ve plansız duruşların yaşandığı gözlenmiş, ayrıca YFTBDT sisteminin de üretim kesintileri ve bakım gereksinimi dikkate alınmış ve bu süreçlerde YFTBDT sisteminden enerji üretimi yapılamadığı ayrıca yüksek fırının tepe basıncına bağlı olarak yaşanan düşüş ve artışlarda sistemin öngörülen enerji üretimi hesaplamaları yapılmıştır. İncelenen verilere göre, YFTBDT sistemi üretilen güç miktarı ortalama yüksek fırın gazı debisi yıl içerisinde sürekli farklılıklar göstererek yaklaşık 160 000-195 000 Nm³ arasında, yüksek fırın gazı sıcaklığı ise yaklaşık 108-144 °C arasında gerçekleşmiş olup bu şartlardaki gaz basıncı ise yaklaşık olarak 114-127 kPa arasında gerçekleşmiştir.

Gerçekleşen çalışma verileri dikkate alındığında, YFTBDT sisteminin 2018 yılı ay ortalaması bazında, yüksek fırının sıvı ham demir üretimine bağlı olarak, en yüksek

elektrik üretimi ağustos ayında ve en düşük elektrik üretimi şubat ayında gerçekleşerek, yıl ortalaması yaklaşık 5300 kWh olarak gerçekleşmiş olacaktır. Yıllık çalışma süresi 8000 saat olarak alındığında yıllık üretim miktarı 42 400 000 kWh, ton eş değer petrol cinsinden değeri 3640 TEP olup, tesisin 2018 yılındaki yatırım maliyeti 400 000 \$ ve yıllık tasarruf miktarı ise 2 755 900 \$ olduğu görülmüştür. Bu üretim miktarına bağlı karbon salınımı azalımı miktarı ortalama 10 888 kgCO₂/h olarak hesaplanmış ve tesisin devreye girmesiyle her yıl bu miktar kadar karbon salınımının önüne geçilmiştir. Sistem ile ilgili maliyet ve enerji hesaplamalarına bakıldığında projenin geri ödeme süresi yaklaşık 0.15 yıl olarak hesaplanmıştır.



KAYNAKLAR

1. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Enerji Verimliliği”, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Enerji-Verimliliği> (2019).
2. İnternet: Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) “World Energy Outlook 2012”, <https://tusiad.org/tr/tum/item/4851-tusiad-ve-uluslararasi-enerji-ajansi-iea-iea-tarafindan-hazirlanan-world-energy-outlook-2012-raporunun-turkiye-tanitimini-yapacak> (2012).
3. İnternet: Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) “World Energy Outlook 2011”, <https://tusiad.org/tr/tum/item/4851-tusiad-ve-uluslararasi-enerji-ajansi-iea-iea-tarafindan-hazirlanan-world-energy-outlook-2011-raporunun-turkiye-tanitimini-yapacak> (2011).
4. İnternet: BP Energy Outlook “2018 global GDP and energy”, <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (2018).
5. İnternet: Türkiye Çelik Üreticileri Derneği Çelik Sektörü Değerlendirmesi, <http://celik.org.tr/celik-sektoru-2016-degerlendirmesi> (2016).
6. KARAASLAN, A., Hayri, A. B. A. R., ve ÇAMKAYA, S., “CO2 Salınımı Üzerinde Etkili Olan Faktörlerin Araştırılması: OECD Ülkeleri Üzerine Ekonometrik Bir Araştırma”, *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(4): 1297-1310 (2017).
7. İnternet: ASME (American Society of Mechanical Engineers)., “Asme General Position Statement On Technology and Policy Recommendations and Goals for Reducing Carbon Dioxide Emissions”, <https://www.asme.org/publications-submissions/journals/find-journal> (2009).
8. Oda, J., Akimoto, K., Sano, F. and Tomoda, T., “Diffusion of energy efficient technologies and CO2 emission reductions in iron and steel sector”, *Energy Economics*, 29(4): 868-888 (2007).
9. Guo, Z. C. and Fu, Z. X., “Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China”, *Energy*, 35(11): 4356-4360 (2010).
10. Wu, P. and Yang, C. J., “Identification and control of blast furnace gas top pressure recovery turbine unit”, *ISIJ international*, 52(1): 96-100 (2011).

11. Tanaka, M., Fernández-del Castillo, C., Adsay, V., Chari, S., Falconi, M., Jang, J. Y., and Shimizu, M., “International consensus guidelines 2012 for the management of IPMN and MCN of the pancreas”, *Pancreatology*, 12(3): 183-197 (2012).
12. Arens, M., Worrell, E., and Schleich, J., “Energy intensity development of the German iron and steel industry between 1991 and 2007”, *Energy*, 45(1): 786-797 (2012).
13. Kuşoğlu S., Karakuş C. and Mumcu G., “Energy recovery from blast furnace waste gases top pressure recovery turbine (TBT) System Applications”, *7. International Ege Energy Symposium & Exhibition*, Hatay, 2-4 (2014)
14. Cai, L., Xiao, J., Wang, S., Gao, S., Duan, J., and Mao, J., “Gas-particle flows and erosion characteristic of large capacity dry top gas pressure recovery turbine”, *Energy*, 120(1): 498-506 (2016).
15. Liu, X., and Gao, X. “A survey analysis of low carbon technology diffusion in China's iron & steel industry”, *Journal of cleaner production*, 129(1): 88-101(2016).
16. Kuşoğlu 2017. “Yüksek Fırın Tepe Basıncı Türbini (TBT) Kullanılarak Enerji Geri Kazanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 10-33 (2017).
17. Priyai, S., and Patil, R. “BF gas utilization and power generation in steel plant using TRT”, *10th IRF International Conference*, Pune, 79-91 (2014).
18. Wall, G., “Exergetics, Exergy Ecology Democracy”, *International Conference on Energy Systems*, Bucaramang, 32-42 (1998).
19. Rivero, R., and Anaya, A., “Exergy analysis of industrial processes: energy-economy-ecology”, *Latin Am Appl Res*, 27(4): 191-205 (1997).
20. Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. J., “Thermal design and optimization 1nd ed”, *John Wiley and Sons*, New York, 78-84 (1996).
21. Szargut, J., Morris, D. R., and Steward, F. R., “Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes 1nd ed”, *Hemisphere*, New York, 245-261 (1987).
22. Kotas, T.J., “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis 1nd ed”, *Krieger Publishing Comp*, London, 124-126 (1995).
23. Dincer, I., and Cengel, Y., “Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering”, *Entropy*, 3(3): 116-149 (2001).
24. Arıkol, M., “Enerji Analizine Giriş Ders Notları”, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, Mae, Gebze (1985).

25. Çengel, A.Y. ve Boles, M.A., “Thermodynamics, An Engineering Approach 3rd ed”, **Mc. Graw Hill**, North Carolina, 457-689 (1998).
26. Çengel, A.Y. ve Boles, M.A., “Thermodynamics, An Engineering Approach 7nd ed”, **Mc. Graw Hill**, North Carolina, 675-699 (2013).
27. Kianifar, A., Heris, S. Z., and Mahian, O., “Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: active and passive cases”, **Energy**, 38(1): 31-36 (2012).
28. Ranjan, K. R., and Kaushik, S. C., “Energy, exergy and thermo-economic analysis of solar distillation systems: A review”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 27: 709-723 (2013).
29. Esfahani, J. A., Rahbar, N., and Lavvaf, M., “Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still—an experimental study on winter days”, **Desalination**, 269(1-3): 198-205 (2011),
30. Elibol, E., Özmen, Ö. T., Tutkun, N., and Köysal, O., “Outdoor performance analysis of different PV panel types”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 67: 651-661 (2017).
31. Caliskan, H., Dincer, I., and Hepbasli, A., “Energy and exergy analyses of combined thermochemical and sensible thermal energy storage systems for building heating applications”, **Energy and Buildings**, 48: 103-111 (2012).
32. Sovacool, B. K., “Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey”, **Energy Policy**, 36(8): 2950-2963 (2008).
33. Tripathi, R., Tiwari, G. N., Bhatti, T. S., and Dwivedi, V. K., “2-E (Energy-Exergy) for partially covered concentrated photovoltaic thermal (PVT) collector”, **Energy Procedia**, 142: 616-623 (2016)
34. Den Elzen, M. G., Hof, A. F., Beltran, A. M., Grassi, G., Roelfsema, M., van Ruijven, B., and van Vuuren, D. P., “The Copenhagen Accord: abatement costs and carbon prices resulting from the submissions”, **Environmental science & policy**, 14(1): 28-39 (2011).
35. KURAL, O., “Kömürün yanması, Kömür-Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri”, **Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.**, İstanbul, 499-510 (1998).
36. İnternet: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, “Türkiye’de enerji ve çevre konusunda yapılan en büyük hataların bir laboratuvarı: http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2002/haziran/makale_enerji_cevre_yatagan.html (2002).
37. AVCI, S., “Türkiye’de Termik Santraller Ve Çevresel Etkileri”, **Coğrafya Dergisi**, İstanbul, 23-24 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Furkan İrşat ALBAYRAK 1993 yılında Ankara’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Çubuk Endüstri Meslek Lisesi Bilişim Sistemleri Bölümü’nden mezun oldu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2017 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2017 yılında Kardemir A.Ş.’de Enerji Tesisleri İşletme Mühendisi olarak göreve başladı. 2017 yılında KBÜ Lisantüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda eğitime başladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kardemir A.Ş. Fabrika Sahası
Enerji Tesisleri Müdürlüğü
Merkez / KARABÜK

Tel : (554) 493 0844

E-posta : f.i.albayrak@hotmail.com