

ALİ GENÇOĞLU



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**YÜKSEK FIRINLARDAKİ ISLAK TİP
TEPE BASINCI TÜRBİNLERİNDE
ELEKTRİK ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

ALİ GENÇOĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2020

ŞUBAT 2020



**YÜKSEK FIRINLARDAKİ ISLAK TİP TEPE BASINCI TÜRBİNLERİNDE
ELEKTRİK ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN
İNCELENMESİ**

ALİ GENÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2020

Ali GENÇOĞLU tarafından hazırlanan “YÜKSEK FIRINLARDAKİ ISLAK TİP TEPE BASINCI TÜRBİNLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

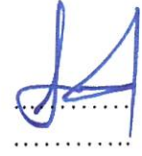
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Ali KOÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. M. Atakan AKAR

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi


Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin YAĞLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma

Tarihi: 07.02.2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.



Prof. Dr. Tolga DEPCİ
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.


İmza
Ali GENÇOĞLU

07/02/2020

YÜKSEK FIRINLARDAKİ ISLAK TİP TEPE BASINCI TÜRBİN SİSTEMLERİNDE
ELEKTRİK ÜRETİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Ali GENÇOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2020

ÖZET

Enerji ihtiyacının gün geçtikçe artış gösterdiği günümüzde, yeni enerji kaynakları arayışı giderek daha fazla önem kazanmıştır. Buna göre, enerji ihtiyacını azaltma, enerjiyi daha verimli kullanma veya atık enerjiyi geri kazanma metotları üretilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalardan bir tanesi de EDÇF (Entegre Demir-Çelik Fabrikaları)'de uygulanan yüksek fırın gazı tepe basıncı geri kazanım türbin uygulamasıdır. Tepe basıncı türbini (TBT), yüksek fırın üretim sürecinin bir çıktısı olan, yüksek basınç ve sıcaklıktaki yüksek fırın gazının sahip olduğu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir türbin-jeneratör sistemidir.

Yapılan bu çalışma ile TBT'lerin çalışma mantığı anlatılmış; örnek bir TBT'nin süreç parametreleri incelenmiştir. Ortalama gözlem değerlerine göre yapılan hesaplama göre örnek TBT ile %26 civarında bir enerji geri kazanımı yapılabileceği görülmüştür. TBT sistemi üretimini etkileyen değişkenlerin sırayla TBT üretimiyle olan ilişkisi (korelasyon) araştırılmıştır. TBT giriş gaz debisinin ve giriş gaz basıncının TBT üretimi ile orta güçte pozitif bir ilişkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Gaz debisinin 100.000 m³/saat artışı 2,6 MW, giriş gaz basıncının 100 kPa artışı 3,6 MW daha fazla güç üretimi sağlamaktadır. Söz konusu TBT sistemine ait üretim değerleri ampirik olarak da hesaplanırken bir Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) modeli yine bu çalışmada kullanılan parametrelere dayalı bir model önerisi olarak sunulmuştur. Nihayetinde ise sistem gözlem değerleri, ampirik formüllere dayalı teorik üretim değerleri ve ÇLRM modelinin tahmin ettiği değerler, hata değerlendirme kriterleri ortalama karesel hata (Mean Squared Error-MSE), ortalama mutlak yüzdesel hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) ve varyans (R²) değerleri ekseninde kıyaslanmıştır. Buna göre ÇLR modelin 0,9205 R² değeri ile daha güçlü tahmin yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. TBT ile enerji geri kazanımı yapılması sayesinde karbon emisyonunun 53020 ton/yıl azaltılabileceği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Tepe Basıncı Türbini, Entegre Demir-Çelik Fabrikası, Enerji Geri Kazanımı, Çoklu Lineer Regresyon, Karbon Emisyonu

Sayfa Adedi : 68

Danışman : Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ

INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING ELECTRICITY GENERATION IN WET
TYPE TOP PRESSURE RECOVERY TURBINE SYSTEMS IN BLAST FURNACE

(M. Sc. Thesis)

Ali GENÇOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

February 2020

ABSTRACT

In these times when the need for energy is increasing, the search for new energy sources has become more and more important. Accordingly, studies are carried out to reduce the need for energy, to use energy more efficiently or to produce waste energy recovery methods. One of these studies is the application of blast furnace top pressure recovery turbine applied in IISF (Integrated Iron and Steel Factories). Top pressure recovery turbine (TRT) is a turbine-generator system that is an output of the blast furnace production process, converting the energy of blast furnace gas at high pressure and temperature into electrical energy.

With this study, the working principle of TRT's was explained and the process parameters of a sample TRT were examined. According to the calculation made according to the average observation values, it was seen that an energy recovery of around 26% could be achieved with the sample TRT. The relationship (correlation) of variables affecting TRT system production with TRT production was investigated. It was understood that the inlet gas flow and inlet gas pressure of TRT had a positive correlation with the medium power of TRT production. An increase of 100.000 m³/h of gas flow is 2,6 MW, and an increase of inlet gas pressure of 100 kPa is 3,6 MW for more power generation. While the production values of the TRT system are calculated empirically, a Multiple Linear Regression (MLR) model is presented as a model proposal based on the parameters used in this study. System observation values, theoretical production values based on empirical formulas and predicted values of MLR model were compared on the axis error evaluation criteria mean squared error (MSE), mean absolute percentage error (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) and variance (R²) values. Accordingly, it was observed that the model of the MLR has a stronger predictive ability with a R² value of 0,9205. It is calculated that carbon emission can be reduced by 53.020 tons/year by energy recovery with TRT.

Key Words : Top Pressure Recovery Turbine, Integrated Iron and Steel Factory,
Energy recovery, Multiple Linear Regression, Carbon Emission
Page Number : 68
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cuma KARAKUŞ

TEŞEKKÜR

Beni yüksek lisans öğrencisi olarak kabul eden, bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde destek olan, bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Cuma KARAKUŞ' a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gerekli kolaylığı gösteren şirketim İSDEMİR A.Ş ve değerli görüş ve katkılarıyla hiçbir desteğini esirgemeyen Enerji Tesisleri Gaz İşletme Başmühendisi Sayın Mak. Yük. Müh. Ali Salim AKYOL'a ve bu yolda yardımlarını esirgememiş herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatıma başladığım ilk günden bugüne her aşamada maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme ve son olarak hayatımın her alanında olduğu gibi yüksek lisans öğrenimim boyunca bana destek olan sevgili eşime en içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	15
2.1. Materyal.....	15
2.1.1. Yüksek fırınlar.....	16
2.1.2. Yüksek fırın gazı	18
2.1.3. Yüksek fırın tepe-basıncı türbin sistemi (TBT).....	20
2.2. Metot.....	38
2.2.1. TBT üretimini etkileyen parametrelerin analizi	38
2.2.2. TBT performans hesaplamaları.....	39
2.2.3. Çoklu lineer regresyon (ÇLR)	42
2.2.4. Hata değerlendirme kriterleri	42
2.2.5. Karbon salınımının hesaplanması	43
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	44
3.1. Gaz Debisi – TBT Üretim İlişkisi.....	45
3.2. Giriş Gaz Basıncı – TBT Üretim İlişkisi.....	46
3.3. Giriş Gaz Sıcaklığı – TBT Üretim İlişkisi.....	47
3.4. Çıkış Gaz Sıcaklığı – TBT Üretim İlişkisi	48
3.5. Çıkış Gaz Basıncı – TBT Üretimi İlişkisi	49
3.6. Farklı Gaz Debilerine Göre TBT Güç Üretimi.....	49
3.7. Farklı Çıkış Gaz Basıncına Göre TBT Güç Üretimi	51
3.8. Farklı Gaz Sıcaklığına Göre TBT Güç Üretimi.....	53
3.9. Farklı Giriş Basıncına Göre TBT Güç Üretimi	56

	Sayfa
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	69



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Ülkelerin 2017 yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi (GW).....	2
Çizelge 2.1. Yüksek Fırın gazı içerisindeki çeşitli bileşiklerin konsantrasyonları	20
Çizelge 2.2. Yüksek Fırın kapasitelerine göre TBT kurulum maliyetleri.....	25
Çizelge 2.3. TBT sisteminde takip edilen parametreler.....	28
Çizelge 2.4. Pearson korelasyon katsayısına göre ilişki gücünün tespiti.....	39
Çizelge 2.5. Karbon emisyon faktörleri.....	43
Çizelge 3.1. Yüksek Fırın-TBT sistemi verileri ortalama değerler tablosu.....	44
Çizelge 3.2. TBT çıkış gücü için ampirik ve ÇLR modellerinin performans değerleri....	59
Çizelge 3.3. TBT ile elektrik üretimine bağlı karbon emisyonu azaltımı.....	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dünyada birincil enerji talebi artış grafiği 2010-2018	1
Şekil 1.2. Dünyada birincil enerji tüketimi (MTEP) 2010-2018	3
Şekil 1.3. Dünyada bölgesel bazda enerji verimliliği yatırımları 2014-2018	4
Şekil 1.4. Dünyada sektörel bazda enerji verimliliği yatırımları 2014-2018.....	4
Şekil 1.5. EDÇF’lerde demir çelik üretim akış şeması	6
Şekil 1.6. Kok kuru söndürme sistemi	8
Şekil 1.7. Sinter fabrikasında atık ısıdan enerji geri kazanım metodu.....	8
Şekil 1.8. Örnek tepe basıncı türbini.....	9
Şekil 1.9. Sera gazı oluşumuna gazların etki oranları.....	10
Şekil 2.1. Tepe basıncı türbini örneği	15
Şekil 2.2. Tepe basıncı türbininin akış şeması üzerinde gösterimi	16
Şekil 2.3. Yüksek fırınlar sistemi.....	17
Şekil 2.4. Yüksek fırın prosesi ekserji balansı	18
Şekil 2.5. Örnek bir yüksek fırın gazı analizi	19
Şekil 2.6. Tepe basıncı geri kazanım türbini.....	21
Şekil 2.7. Gaz temizleme metoduna göre TBT sistemleri	22
Şekil 2.8. Kuru tip gaz temizleme tesisi elektrofiltreleri	22
Şekil 2.9. Islak tip TBT sistemi akış şeması	23
Şekil 2.10. Gaz debisi ve tepe basıncına göre TBT kapasitesinin belirlenmesi	24
Şekil 2.11. Tek akışlı tepe basıncı türbini örneği.....	25
Şekil 2.12. Çift akışlı tepe basıncı türbini örneği.....	26
Şekil 2.13. Çift görevli tepe basıncı türbini örneği.....	27

Şekil	Sayfa
Şekil 2.14. Yüksek fırın gazının gaz temizleme işlemi sırasında uğradığı basınç kaybı..	29
Şekil 2.15. Giriş gaz sıcaklığı – TBT elektrik üretimi grafiği	29
Şekil 2.16. Çıkış gaz sıcaklığı – TBT elektrik üretimi grafiği.....	30
Şekil 2.17. Gaz temizleme öncesi ve sonrası sıcaklık, nem ve toz değerleri.....	31
Şekil 2.18. Tepe basıncı türbini stator kanatları	32
Şekil 2.19. Stator kanatlar ile tepe basıncının ayarlanması	32
Şekil 2.20. Vibrasyon, aksel kayma ve yatak sıcaklıkları takip ekranı.....	34
Şekil 2.21. Yağlama yağı sistemi takip ekranı.....	35
Şekil 2.22. Hidrolik güç sistemi takip ekranı.....	36
Şekil 2.23. Azot sızdırmazlık sistemi takip ekranı	37
Şekil 2.24. Soğutma suyu ve drenaj sistemi takip ekranı	38
Şekil 2.25. Türbindeki adyabatik genişleme.....	40
Şekil 3.1. Gaz debisi verisi histogramı	45
Şekil 3.2. Gaz debisi – TBT üretimi arasındaki korelasyon	45
Şekil 3.3. Giriş gaz basıncı verisi histogramı	46
Şekil 3.4. Gaz debisi – TBT üretimi arasındaki korelasyon	46
Şekil 3.5. Giriş gaz sıcaklığı verisi histogramı	47
Şekil 3.6. Giriş sıcaklığı – TBT üretimi arasındaki korelasyon.....	47
Şekil 3.7. Çıkış gaz sıcaklığı verisi histogramı.....	48
Şekil 3.8. Çıkış gaz sıcaklığı – TBT üretimi arasındaki korelasyon.....	48
Şekil 3.9. Farklı gaz debilerine göre giriş basıncı - TBT çıkış gücü grafiği.....	50
Şekil 3.10. Farklı gaz debilerine göre giriş gaz sıcaklığı - TBT çıkış gücü grafiği	50
Şekil 3.11. Farklı gaz debilerine göre çıkış gaz basıncı - TBT çıkış gücü grafiği.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 3.12. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz basıncı - TBT çıkış gücü grafiği	52
Şekil 3.13. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz sıcaklığı - TBT çıkış gücü grafiği....	52
Şekil 3.14. Farklı çıkış basınçlarına göre gaz debisi - TBT çıkış gücü grafiği.....	53
Şekil 3.15. Farklı gaz sıcaklıklarına göre giriş gaz basıncı - TBT çıkış gücü grafiği.....	54
Şekil 3.16. Farklı gaz sıcaklıklarına göre çıkış gaz basıncı - TBT çıkış gücü grafiği	55
Şekil 3.17. Farklı gaz sıcaklıklarına göre gaz debisi - TBT çıkış gücü grafiği.....	55
Şekil 3.18. Farklı giriş basınçlarına göre çıkış basıncı - TBT çıkış gücü grafiği.....	57
Şekil 3.19. Farklı giriş basınçlarına göre gaz sıcaklığı - TBT çıkış gücü grafiği	57
Şekil 3.20. Farklı giriş basınçlarına göre gaz debisi - TBT çıkış gücü grafiği	58
Şekil 3.21. TBT çıkış gücü: Gözlem, ampirik ve ÇLR modellerinin karşılaştırılması....	59
Şekil 3.22. TBT çıkış gücü: Tüm veri için gözlem, ampirik ve ÇLR modellerinin saçılım grafikleri.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

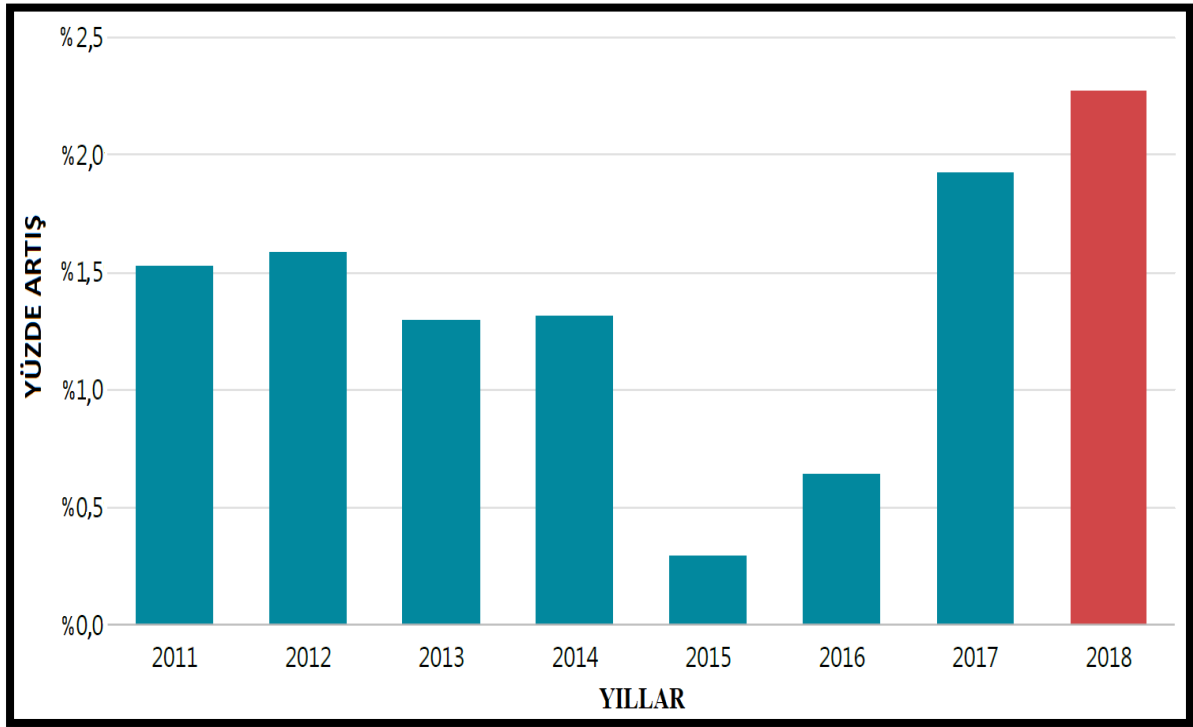
Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
GW	Gigawatt
MW	Megawatt
r	Pearson Korelasyon Katsayısı
K	Kelvin
kPa	Kilopaskal
W	Termodinamik İş
T	Sıcaklık
P	Basınç
ΔP	Basınç Farkı
η_T	Türbin Verimi
η_G	Jeneratör Verimi
R	Evrensel Gaz Sabiti
k	Isı Kapasite Katsayısı
R^2	Varyans

Kısaltmalar	Açıklamalar
CDQ	Kok Kuru Söndürme Sistemi
ÇLR	Çoklu Lineer Regresyon
EDÇF	Entegre Demir Çelik Fabrikası
GRUC	Sinter Atık Isı Geri Kazanım Sistemi
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata
MSE	Ortalama Karesel Hata
MTEP	Milyon Ton Eşdeğeri Petrol
PCI	Pulverize Kömür Enjeksiyonu
TBT	Tepe Basıncı Türbini
USD	Amerikan Doları
YFG	Yüksek Fırın Gazı

1. GİRİŞ

Enerji, tüm dünyada Endüstri 4.0 yaklaşımı ekseninde önemli bir dönüşüm geçirmekte olup artan tüketim talebi nedeniyle her geçen yıl daha da önemli bir konu haline gelmektedir. Toplumların gelişmesini ve kalkınmasını sağlayan her yeni sanayi tesisi ile enerji ihtiyacı hızla artmaktadır. Dünyada birincil enerji talebindeki artış grafiği Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, dünyada birincil enerji tüketimi 2018 yılında önceki yıla göre %2,9 oranında artarak 2010 yılından sonraki en yüksek artış oranını yakalamıştır (BP Statistical Review of World Energy, 2019).



Şekil 1.1. Dünyada birincil enerji talebi artış grafiği 2010-2018 (International Energy Agency [IEA], 2019a)

Enerji, yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji şeklinde iki ana kategoride değerlendirilebilir. Dünyada enerji tüketiminin büyük bir kısmı yenilenemeyen enerji olan fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. 2018 yılında dünyada tüketilen enerjinin %70'i fosil yakıtlardan üretilmiştir (IEA, 2019b). Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenme tehdidiyle karşı karşıya olması ve fosil yakıt fiyatlarındaki artış, enerji talebinin karşılanmasında farklı yollar arayışını beraberinde getirmiştir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji ve jeotermal enerjinin başı çektiği yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim son yıllarda fazlasıyla önem kazanmıştır. Türkiye'de ve dünyada birçok ülkede yenilenebilir enerji politikaları geliştirilmiş, alternatif enerji yenilenebilir enerji kaynakları araştırılmış ve

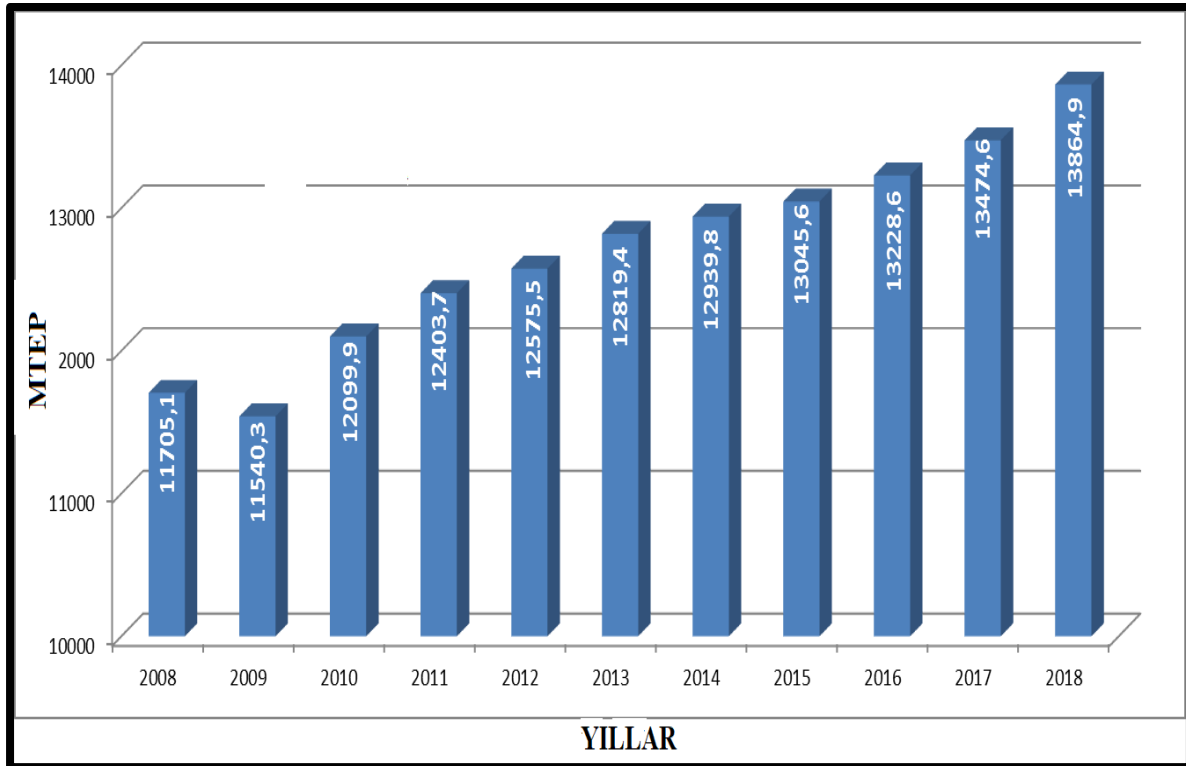
ekonomik büyüme üzerindeki etkileri incelenmiştir (Bayraç ve Çildir, 2017; Konyalı, 2019; Koç, Yağlı, Koç ve Uğurlu, 2018). 2017 yılı itibarıyla bazı ülkelerin yenilenebilir enerji kurulu güç kapasiteleri Çizelge 1.1’de verilmiştir. Dünyada hidrolik enerjinin kurulu güç kapasitesi yenilenebilir enerji toplam kurulu güç değerinin yaklaşık %50’sini oluşturmakta olup, Türkiye’de de en yüksek kurulu güç kapasitesine sahip yenilenebilir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisinden enerji elde etmenin Türkiye’de ve dünyada ciddi bir paya sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1.1. Ülkelerin 2017 yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi (GW) (Koç, Yağlı, Koç ve Uğurlu, 2018)

Ülkeler	Çin	ABD	Hindistan	Almanya	Türkiye	Avrupa Birliği	Dünya
Hidrolik	313	80	47	5,6	27,2	127	1114
Rüzgâr	188	89	33	56	6,8	169	539
Biyoenjerji	15	16,7	9,5	8	0,63	40	122
Güneş PV	131	51	18,3	42	3,42	108	442
Jeotermal	0	3,6	0	0	1,06	0,9	13,5

Yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının yönetiminin yanı sıra, en çok enerji ihtiyacı olan sanayi, inşaat ve lojistik işlerinde enerji verimliliği imkânlarının araştırılması ve israfın en aza indirilmesi konuları ülkeler için önceliği yüksek bir politika alanı haline gelmiştir. Öncelikle Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avrupa Birliği ülkeleri enerji verimliliği konusunda yasal düzenlemeler yapılması için adımlar atmakta, ulusal ve sektörel hedefler belirlemektedir. Birincil enerji kaynaklarına artan talebin yıllara göre değişimi Şekil 1.2’de incelendiğinde verimlilik çalışmalarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

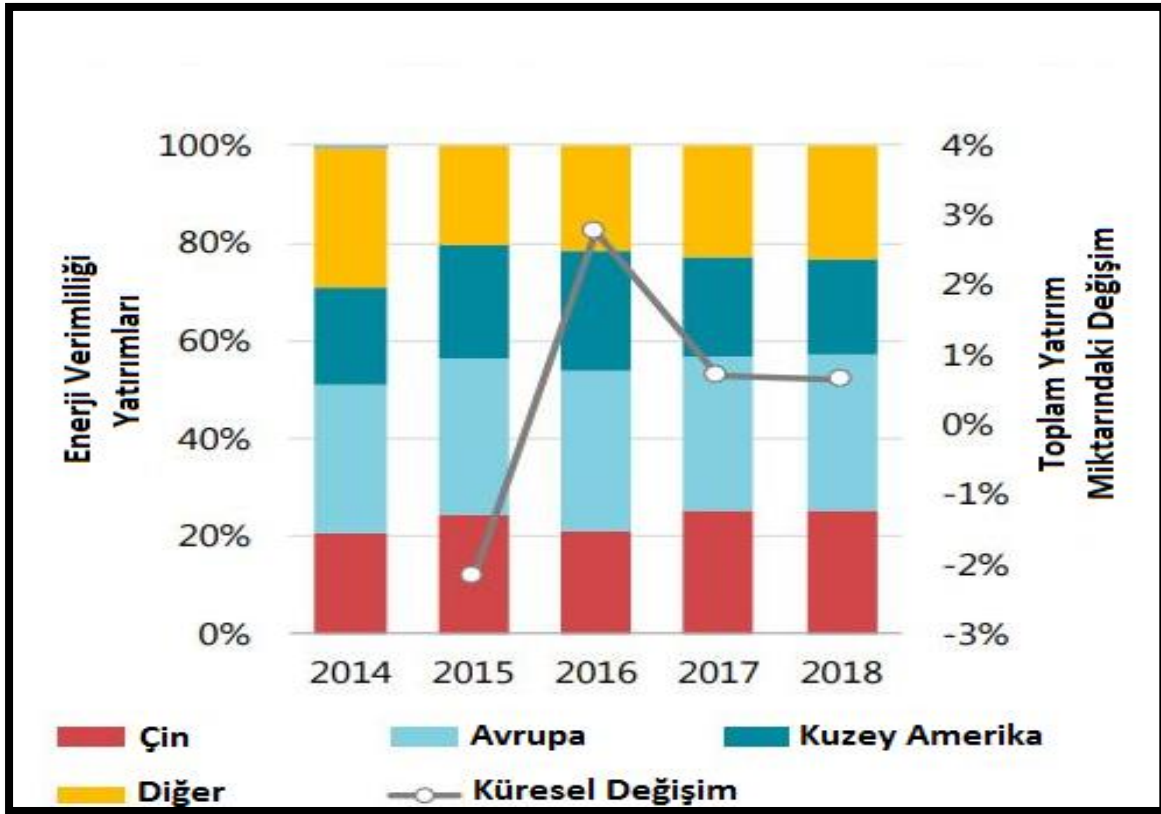
Enerji tasarrufu yapmak, kullanılan enerji miktarını azaltmak anlamına geldiği gibi bir başka bakış açısıyla da enerjiyi verimli kullanmak anlamına gelmektedir. Küresel rekabet koşulları, mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle de sanayide enerji verimliliğini dikkate alan çalışmalar ön plandadır. Enerji verimliliğinde çalışmaların merkez noktası enerjinin yönetimi olgusudur. Bu manada enerji yönetimi, entegre bir yaklaşım ile birbirini etkileyen ve tetikleyen unsurlar araştırılmalı ve sistem sürekliliği ön planda olmalıdır (Türkiye Çelik Üreticileri Derneği [TÇÜD], 2019).



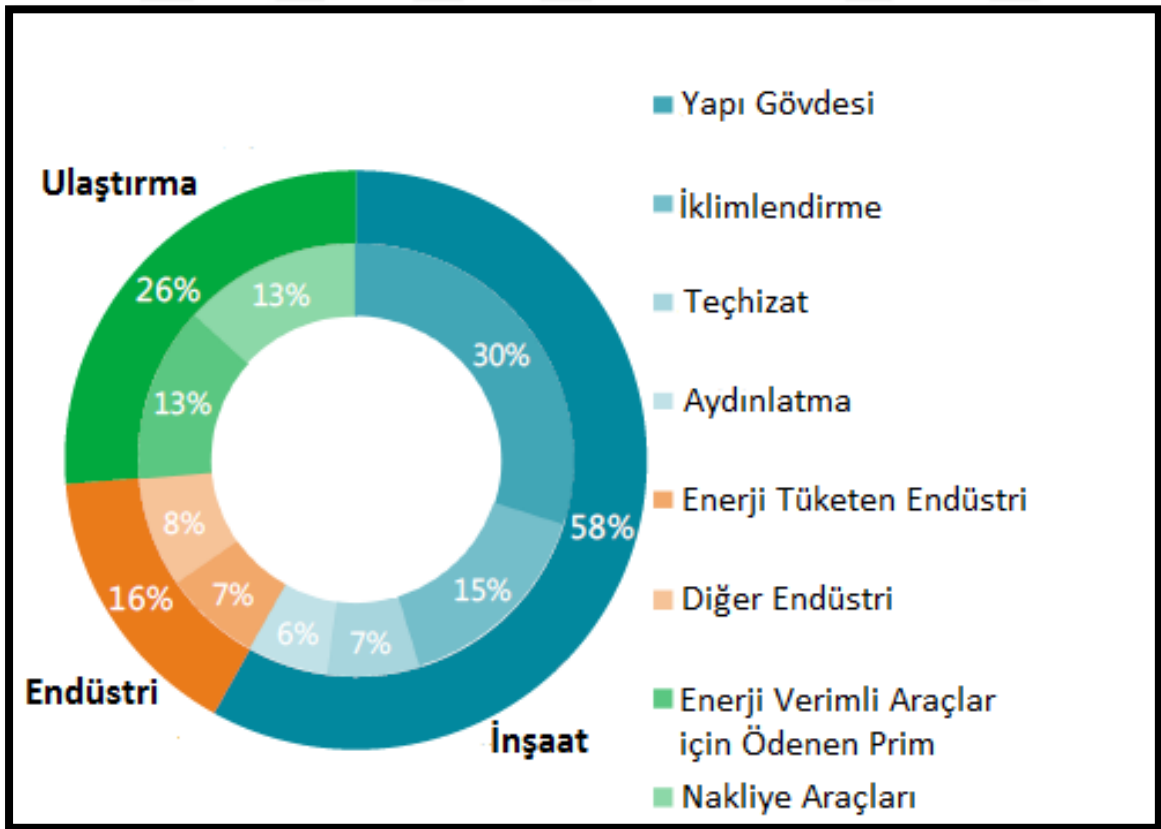
Şekil 1.2. Dünyada birincil enerji tüketimi (MTEP) 2010-2018 (BP Statistical Review of World Energy, 2019)

IEA'nın Verimli Dünya Stratejisi, verimliliğin tüm potansiyelini ortaya çıkarmak için, küresel yatırımların 2025 yılına kadar ikiye katlanması, 2025 ve 2040 arasında da tekrar ikiye katlanması gerektiğini ileri sürmektedir. Bazı alanlarda kaydedilen ilerlemeye rağmen, Şekil 1.3'te görüldüğü üzere 2018'de verimlilik yatırımları stratejinin öngördüğü seviyelerin altında kalmıştır (IEA, 2019b).

İhtiyaç duyulan elektriğin sürekli ve kaliteli olarak sağlanması için yeni ve verimli elektrik üretim sistemlerinin kurulması ve de geliştirilmesi gerekmektedir. Büyüyen ve gelişmekte olan ülke ekonomilerinde binalarda, endüstride, hizmet sektöründe ve ulaştırma-lojistik alanlarında enerji verimliliğinin artırılması çalışmaları yapılmaktadır. 2014-2018 yılları arasında dünyada sektörel bazda enerji verimliliği yatırımları Şekil 1.4'te gösterilmektedir. Endüstride enerji verimliliği yatırımları toplam yatırımların %16'sına denk gelmektedir. Diğer enerji verimliliği yatırımları inşaat ve ulaştırma sektörlerinde olup toplamda %84'lük bir paya sahiptir.

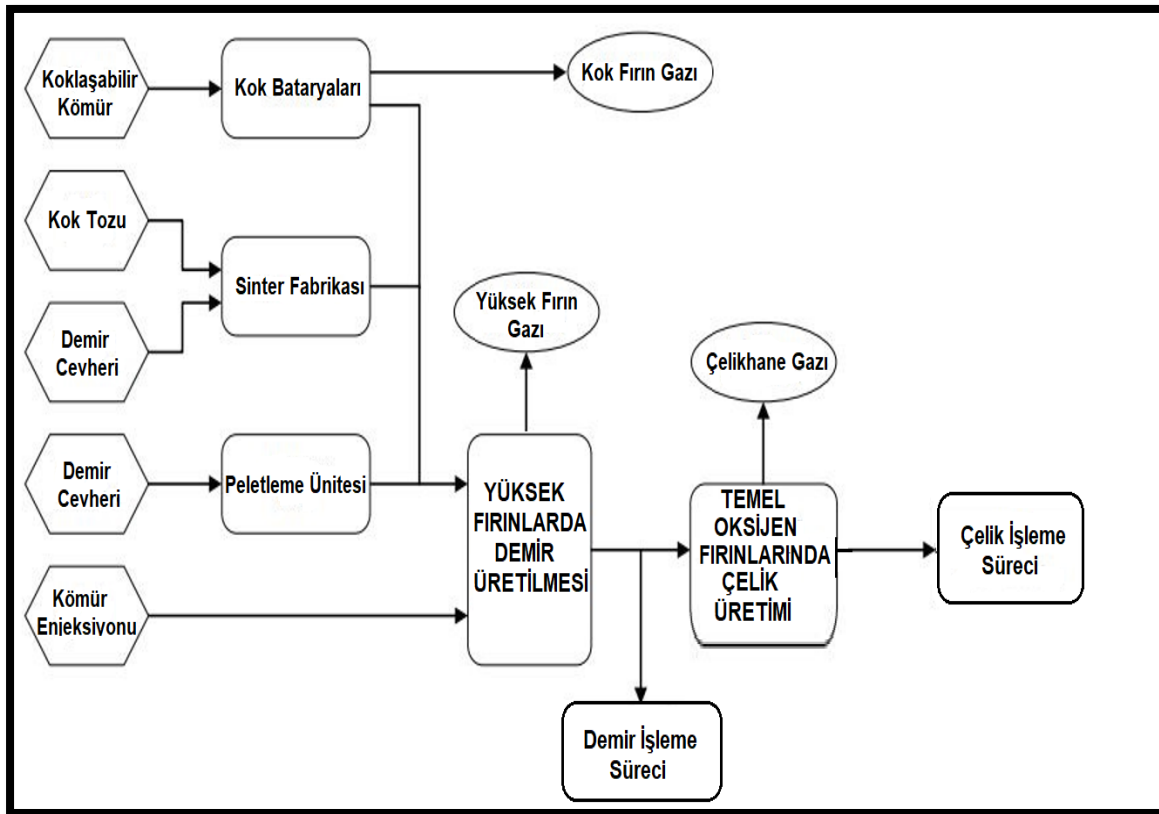


Şekil 1.3. Dünyada bölgesel bazda enerji verimliliği yatırımları 2014-2018 (IEA, 2019b)



Şekil 1.4. Dünyada sektörel bazda enerji verimliliği yatırımları 2014-2018 (IEA, 2019b)

Demir-Çelik endüstrisi ülke ekonomilerine katkı sağlamak konusunda ciddi bir paya sahip olmakla birlikte, aynı zamanda en fazla enerji tüketim ihtiyacı duyan sektörlerden birisidir. Ülke ekonomisine ciddi bir katkısı olan sektörün üretimdeki ivmelenmesine bağlı olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bununla birlikte enerji tüketiminin de yüksek seviyelerde olması rekabet edebilmek adına Demir-Çelik endüstrisinin enerji geri kazanım çözümlerine yönelmesini zorunlu kılmaktadır. Yarattığı ekonomik değer açısından Entegre Demir Çelik Fabrikalarında (EDÇF) tasarruf potansiyelinin belirlenmesi için enerji tasarrufunun hangi yollarla ve ne kadar verim alınabileceğinin incelenmesi son derece önemlidir. Son yıllarda, yapılan araştırmalar neticesinde fabrikalarda uygulanan enerji tasarrufu çalışmalarının sonucunda ciddi bir tasarruf potansiyeli fırsatının bulunduğu değerlendirilmektedir (Odabaş, 2014; Silva, 2018; Zhang, 2014; He, Wang, 2017). EDÇF temelde iki ana üretim sürecine sahiptir. Bunlardan ilki demir cevherini yüksek fırınlarda kok ile pik demire indirgemek ve daha sonra temel oksijen fırınlarında ham çeliğe dönüştürmektir. Demir-çelik üretim süreci enerji maliyeti, toplam işletme maliyetinin yaklaşık % 20'sini oluşturmaktadır (Zhang ve ark, 2019; Worrell ve Carreon, 2017). Burada elde edilecek enerji tasarrufu maliyetleri düşürecek, doğal olarak bütün işletme maliyetine olumlu yönde etki edecektir. EDÇF'lerde demir çelik üretiminin akış diyagramı Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Şekilde yüksek fırınlarda demir üretilmesi öncesinde harmanın hazırlandığı birimler olan kok bataryaları, sinter fabrikaları ve peletleme ünitesi görülmektedir. Harman hazırlandıktan sonra yüksek fırınlara gönderilir ve demir üretim süreci işletilir. Üretilen demir, çelik üretim sürecine girer. Temel oksijen fırınlarında sıvı demir içerisindeki karbonun oksijen yardımıyla uzaklaştırılması suretiyle çelik üretimi gerçekleşir. Harmandan çelik üretilmesine kadar geçen zamanda kok bataryalarında yan ürün gaz olarak kok gazı, yüksek fırınlarda yüksek fırın gazı ve temel oksijen fırınlarında çelikhane gazı açığa çıkar. Her biri yanma ısıl değerlerinden ötürü değerli gazlar olup, sıcak haddehane tav fırınları, buhar üretim kazanları gibi üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılabilir. Herhangi bir ek çaba sarf etmeden açığa çıkan ve yakıt olarak kullanılabilen bu gazların verimli bir şekilde tüketiminin sağlanması, atık ısı enerji geri kazanım sistemleriyle duyulur ısılarından faydalanılması gibi konular enerjiyi daha verimli kullanmak anlamında ciddi bir çalışma alanı oluşturmaktadır.



Şekil 1.5. EDÇF’lerde demir çelik üretim akış şeması (Schoenberger, 2000)

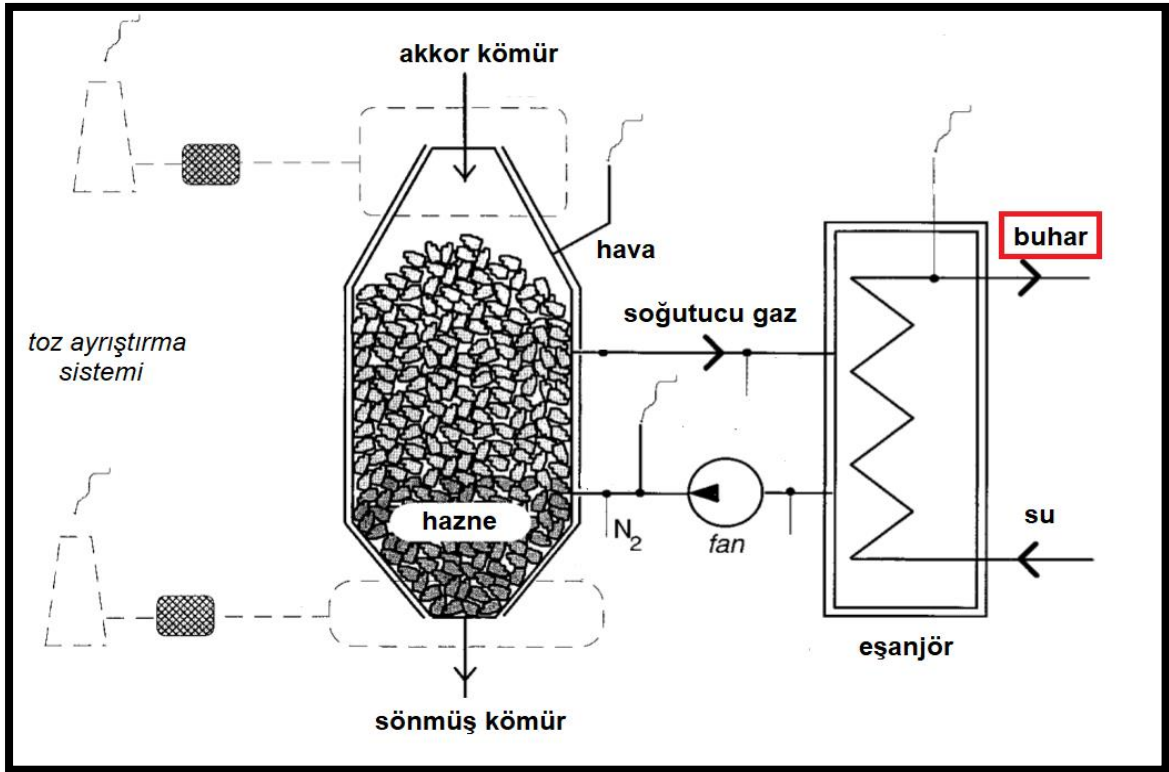
Gelişen teknoloji ile enerji tüketim seviyeleri olabildiğince aşağı çekilmeye çalışılmış, en verimli sistemler, motorlar kullanılmaya başlanmıştır. Enerji tüketim değerlerinin minimize edilmesi yönünde çalışmaların yanında, üretim süreçlerinin çıktılarında oluşan atık enerjinin geri kazanılması konusu irdelenmiştir. Atık enerji, karşımıza ısı, basınç, hareket enerjisi gibi çeşitli sistemler ile kontrol altına alınarak dönüştürülebilecek enerjiler şeklinde karşımıza çıkmaktadır. EDÇF’lerde enerji verimliliğini arttırmaya yönelik farklı teknolojiler geliştirilmiştir. Kok fabrikaları, sinter, yüksek fırınlar ve çelikhane üretim süreçlerinde yapılan birçok enerjii daha verimli kullanma ve atık enerjii geri kazanma metotları vardır. Kok üretiminde kuru söndürme teknolojisi (coke dry quenching – CDQ), sinter fabrikaları baca gazından atık ısı enerjisinin geri kazanımı (grade recovery and cascade utilization- GRUC), yüksek fırın tepe basıncı enerji geri kazanım türbini (top pressure recovery turbine – TRT), yan ürün gazlar olarak adlandırılan kok gazı, yüksek fırın gazı ve çelikhane gazının yakıt olarak kullanılması gibi çalışmalar ile dışardan temin edilen enerjinin azaltılması hedeflenmektedir (Kumar, 2015; Zhang, 2017; Oda, 2007).

Demir çelik üretim sürecinin yan ürünleri olarak adlandırılan yüksek fırın, kok fırın ve çelikhane gazları birer enerji kalemi olarak değerlendirilebilir. Her biri kendi başına ısı

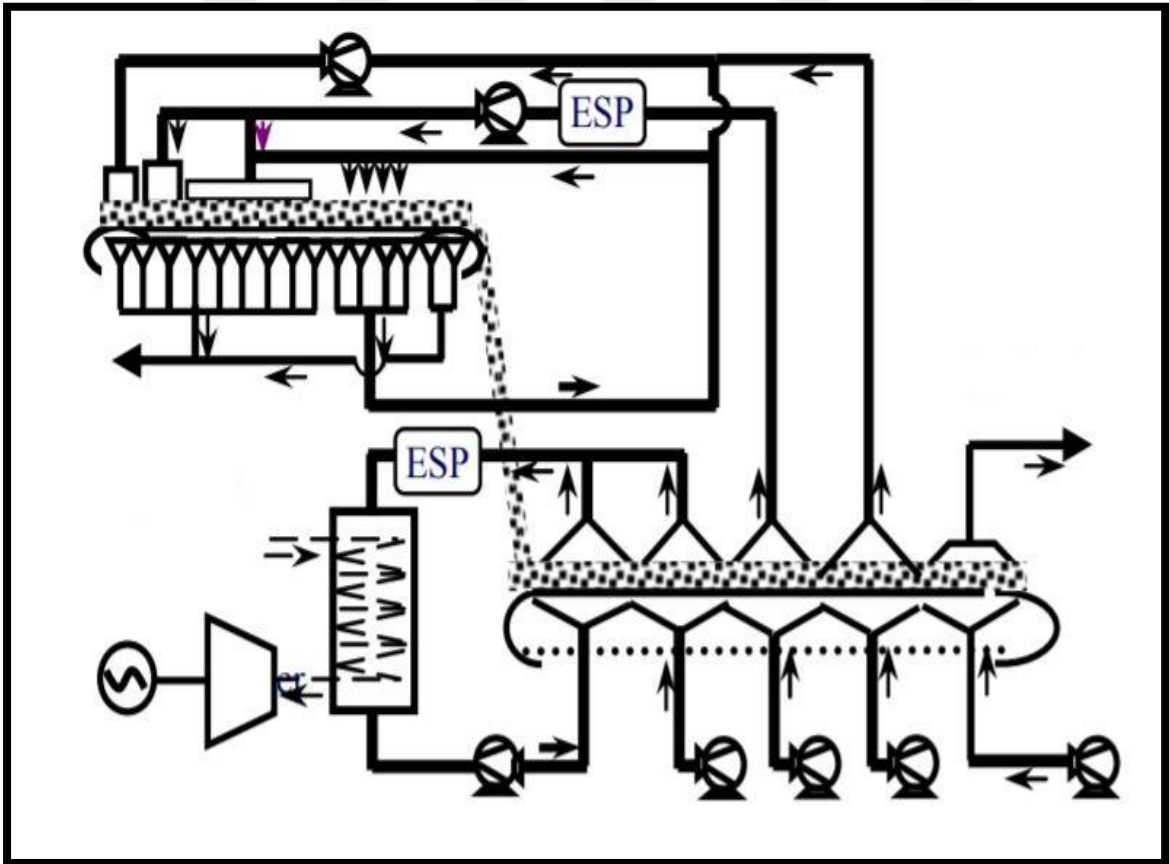
değeri olan ve gaz yakıt olarak değerlendirilebilen gazlardır. Hali hazırda çoğu EDÇF'de yüksek fırınlar, kok bataryaları, sıcak haddehane ve buhar üretim proseslerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Yan ürün gazların gerekli temizleme ve basınç regülasyon işlemlerinin yapılmasıyla birlikte tam kapasite ile kullanılması enerjiji verimli kullanabilmenin en değerli yollarından birisidir. Yan ürün gazların doğru bir sistematik ile değerlendirilememesi durumunda verimli gazların depolanması mümkün olmadığından bacalardan yakılarak atılması söz konusu olacaktır. Bu gazların kimyasal enerjisinin yanı sıra basınç enerjisi ve ısı enerjisini geri kazanabilme potansiyeli mevcuttur (Zhang, Zhao, Lu, Ni ve Li, 2017).

Yan ürün gazlardan ısı enerjisi geri kazanımına en güzel örneklerden birisi CDQ (Coke Dry Quenching) adıyla bilinen kok kuru söndürme sistemidir. CDQ çalışma prensibi Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Kok fabrikalarında, yüksek fırınlarda yakıt olarak kullanılmak üzere kok kömürü elde edilmektedir. Kok bataryalarında yüksek sıcaklıklarda işleme tabi tutulan kömür, koklaşma sürecinin tamamlanması sonrasında transfer işlemi yapılmak üzere arabalara aktarılır. Kok bataryalarında üretilen kok kömürünün söndürülmesi ve soğutulması gerekmektedir. Bu işlem sulu söndürme veya kuru söndürme metotları ile yapılabilmektedir. Sulu söndürmede söndürme arabasıyla taşınan kok, atmosfere açık bir kulede yüksek miktarda su püskürtülmesiyle soğutulur. Kok kuru söndürme sisteminde ise soğutma işlemi atmosferden izole edilmiş bir ortamda inert bir gaz ile yapılmaktadır. Bu sistemde sulu söndürme sistemde kaybedilen termal enerjinin geri kazanımı yapılabilmektedir. Atık enerjinin geri kazanımı ile bir ton kok başına yaklaşık 220-330 kWh eşdeğeri buhar üretimi yapılabilmektedir (Xu ve Cang, 2010; Rudramuni ve Nataraj, 2016).

Sinter fabrikasında GRUC (Grade Recovery and Cascade Utilization of Residual Heat in Sinter) adıyla bilinen atık ısıdan enerji geri kazanım metodu ile tasarruf yapılması mümkündür. Sinter fabrikalarında sinterleme işlemi sırasında açığa çıkan atık ısıdan geri kazanım metodu Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Sinterleme atık ısı kaynağı iki bölümden oluşur; bunlar sinter soğutucudan gelen sinter soğutucu atık gazın duyulur ısı ve sinterleme şeritlerinden gelen ana egzoz gazının duyulur ısıdır. Bu atık ısı kaynaklarının yüksek verimli geri kazanımı ve kullanımı, sinter enerji tüketimini daha da azaltmanın etkili bir yoludur (Dong, Li, Guo, Zhang, Mao, Liu ve Cai, 2010).

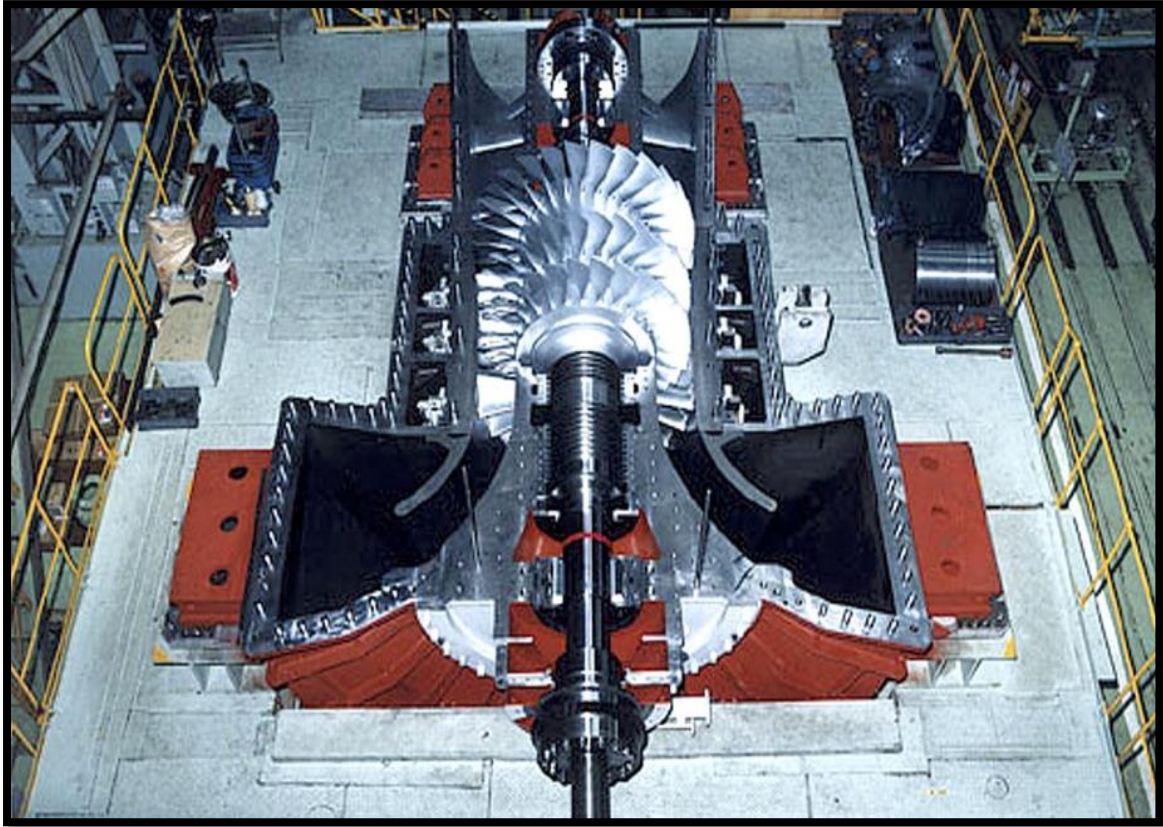


Şekil 1.6. Kok kuru söndürme sistemi (Errera ve Milanese, 2000)



Şekil 1.7. Sinter fabrikasında atık ısıdan enerji geri kazanım metodu (Dong, Li, Guo, Zhang, Mao, Liu ve Cai, 2010)

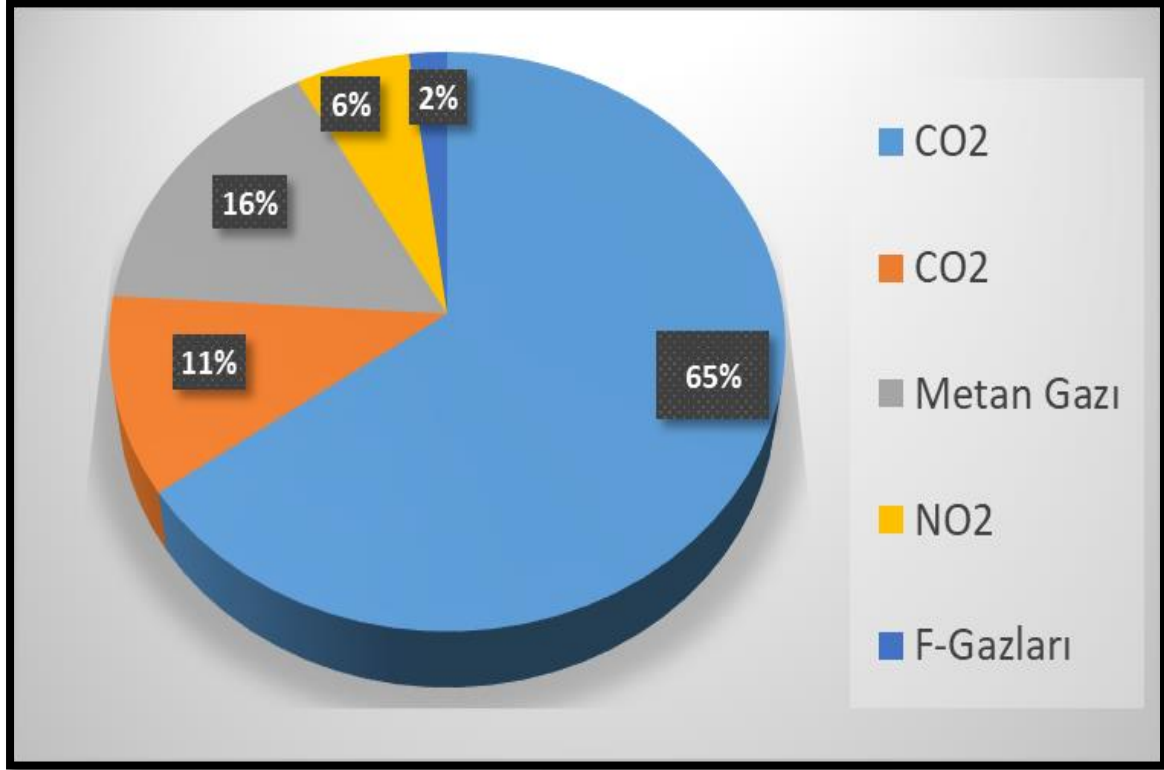
Entegre Demir Çelik Fabrikalarında (EDÇF) enerjiyi en yoğun kullanan ünite yüksek fırınlardır. Bu sebeple fabrikalarda bulunan yüksek fırınlarda tüketilen enerjinin geri kazanımına yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalardan biri de Yüksek Fırın Tepe Basıncı Türbini olup, bu sistem Yüksek Fırınlarda tepe basıncı enerjisinin geri kazanımı sağlayan bir türbin sistemidir. Yüksek fırın gazının basıncı ile türbin giriş ve çıkışı arasında oluşturulan basınç farkı (ΔP) sayesinde gaz, yüksek basınçlı ortamdaki düşük basınçlı ortama geçerken türbin rotorunu döndürmekte ve türbin-jeneratör sistemi elektrik enerjisi üretmektedir. Uygulanan yeni türbin projeleri ile dışarıdan satın alınan elektriğin satın alma maliyetinden önemli oranda tasarruf mümkün olmaktadır (Priya ve Patil, 2014; Gao ve diğerleri, 2019; Wang, 2019; Wu, Xu, Zhang ve Li, 2020). Şekil 1.8’de örnek bir yüksek fırın tepe basıncı türbini gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Örnek tepe basıncı türbini (MITSUI E&S, 2019)

EDÇF’lerde üretim süreci karbon temelli metalürjik işlemler bütünüdür. Demirin elde edildiği yüksek fırınlarda, çelikleştirme işleminin yapıldığı çelikhane temel oksijen fırınlarında ve haddeleme prosesinde yüksek miktarda elektrik tüketimi ve elektrik tüketimine bağlı karbondioksit (CO_2) emisyonu oluşmaktadır. Literatürde karbon emisyonu adıyla da bilinen atmosfere CO_2 salınımı, küresel ısınma ve sera gazı etkisinin oluşmasına neden olmaktadır. CO_2 ve diğer gazların küresel ısınma ve sera gazı oluşumu

üzerindeki etkisi Şekil 1.9'da gösterilmiştir. Fosil yakıtlar ve endüstriyel üretim nedeniyle açığa çıkan CO₂ sera gazı oluşumuna etki eden gazlar içerisinde %65'lik bir paya sahiptir. Doğal yollarla açığa çıkan CO₂ gazı %11, metan gazı %16 ve NO₂ %6'lık bir paya sahiptir.



Şekil 1.9. Sera gazı oluşumuna gazların etki oranları (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014)

Dünyada hala birincil enerji arzının büyük oranda fosil yakıtlardan karşılandığı bilindiğinden, karbon emisyonunun düşürülmesi adına çözümler üretilmesi gerekmektedir. Demir çelik üretim sürecinde yapılacak enerji tasarrufu ve enerji geri kazanımı çalışmaları karbon emisyonunun azaltılması anlamında önemlidir. Bu bağlamda en büyük tasarruf potansiyeli taşıyan ünite, yüksek enerji kullanımı nedeniyle yüksek fırınlardır. TBT sisteminin kurulması ile yüksek fırınlarda tüketilen enerjinin %20-%30'u kadarının geri kazanılması, CO₂ emisyonunun azaltılması yönünde ciddi bir katkı sağlayacaktır (Pinto, Szklo ve Rathmann, 2018; Qi, Gao, Na ve Ye, 2018).

Yüksek fırınlarda TBT sistemi ile enerji geri kazanımı ve karbon emisyonunun azaltılması hakkında literatüre bakıldığında sınırlı sayıda çalışma yapıldığı anlaşılmaktadır.

Wu ve Yang yapmış oldukları çalışmada, yüksek fırınlardaki basınç enerjisinin geri kazanılması için kullanılmakta olan Yüksek Fırın tepe basıncı türbin sistemi ile Yüksek Fırınlarda enerji tüketiminin %20'sinin geri kazanımını sağlanabildiği ve hacmi 1000 m³'ten büyük olan her Yüksek Fırında kurulabilen bir sistem olduğunu ifade etmişlerdir.

TBT'nin dinamik matematiksel modeli ilk olarak alt uzay tanımlama yöntemiyle tahmin edilmektedir. Tanımlanan durum-uzay modeli, TBT sürecinin dinamik davranışını doğru bir şekilde tahmin edebilir. Tanımlanan modele dayanarak bir model tahmin kontrolörü geliştirilmiştir. (Wu ve Yang, 2012).

Jian ve arkadaşları, sadece giriş-çıkış sinyallerine dayanan bir lineer olmayan yüksek fırın sistemini simüle eden çoklu çekirdek destek vektör makinesi (SVM) için çoğaltıcı çekirdek Hilbert uzayı çerçevesi oluşturmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar, çok çekirdekten tek çekirdekli öğrenmenin üstünlüğünü açıklamak için temel bir kılavuz görevi görebilir. Daha sonra, inşa edilen çoklu çekirdek öğrenme algoritmaları, sadece giriş-çıkış sinyallerine dayanarak doğrusal olmayan bir yüksek fırın sistemini modellemek için uygulanmıştır. Yüksek fırın sistemi oldukça rekabetçi veri güdümlü bir modelleme yöntemi olduğunu ve yüksek fırın operatörlerinin kontrol önlemleri alması için güvenilir bir gösterge sağlayabildiğini göstermektedir. (Jian, Gao ve Xia, 2012).

Priya ve Patil; bir TBT sistemi için türbin çıkış gücü, türbin giriş basıncı, türbin çıkış basıncı, sıcaklık ve Yüksek Fırın gazının akış hızı gibi çeşitli parametrelere dayanan bir simülasyon gerçekleştirerek türbinin çalıştırılması gereken en uygun değerleri belirlemişlerdir (Priya ve Patil, 2014).

An ve arkadaşlarının çalışmasında, yüksek fırın tepe basıncı ve TBT öncesi basıncın dinamik matematiksel modeli, yüksek fırın tepe basınç sistemi ve gaz akış denkleminin mekanizma analizine dayanarak oluşturulmuştur. Daha sonra, üst basınç modeli ve TBT'den önceki basınç, Özyinelemeli En Küçük Karelere (Recursive Least Squares-RLS) dayanan kapalı döngü tanımlama yöntemi ile simüle edilmiştir. Sonuçlar, modelin tepe basıncı ve TBT öncesi basınçtaki gerçek değişimi doğru bir şekilde tanımlayabildiğini göstermektedir. (An, Yang, Wu ve Wan, 2016).

Oda ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada dünya demir-çelik sektöründeki bölgelere bağlı CO₂ salınımı azaltma potansiyelleri ve teknolojik olanakların minimum maliyetlerini değerlendirmişlerdir. 2030 yılında enerji verimliliği tahmini olarak %15 oranında artacağını ve Yüksek Fırın tepe basıncı türbin sistemi (TBT), 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 (Oda, Akimoto, Sano ve Tomoda, 2007).

Kumar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada entegre demir çelik fabrikalarında yeşil teknoloji olarak adlandırdıkları TBT sisteminin diğer teknolojiler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Entegre demir ve çelik fabrikalarında yan ürün gazı kullanımının ve buna bağlı

TBT ile enerji geri kazanımı yapılmasının çevre etkilerinin hafifletilmesinde önemli olduğu belirtilmiştir (Kumar, N.M. ve Kumar G,H,K., 2015).

Liu ve Gao, 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 TBT sistemi yatırımı için 20 USD/t sıvı ham demir ve enerji üretimi ise yaklaşık 30 kWh/t olduğunu ifade etmişlerdir. TBT sistemi Çin demir çelik sanayisinde 1980 yıllarında kurulmaya başlamış olup kuru tip 420 m³ hacimli bir Yüksek fırın için kurulan TBT sisteminin maliyeti yaklaşık 3,3 milyon USD ve tesisin geri ödeme süresinin ise yaklaşık iki yıl olduğunu belirtmişlerdir. 2008 yılı sonlarında, hacmi 1000 m³'ten büyük olan 158 adet Yüksek Fırın tesisin 60 adedinde yaş tip TBT sistemi, 91 adedinde ise kuru tip TBT sistemi kurulduğunu, 2011 yılında orta ve büyük ölçekli 530 tane Yüksek Fırının %70'nde kuru tip kurulmuş olup bu oranın 2014 yılında %100 oranına ulaştığını ifade etmişlerdir (Liu ve Gao, 2016).

Johansson ve Söderström yapmış oldukları çalışmada artan enerji fiyatları tehdidi ve küresel ısınmanın çevresel problemlerinin endüstride büyük endişeleri de beraberinde getirdiğini belirtmiştir. Bu durum rekabet gücünü azaltmadan kaynak verimliliğinin artırılması ve gaz salınımlarının azaltılması mücadelesine sebep olmuştur. İsveç demir çelik endüstrisinin birincil enerji kaynağı metalürjik kömür, kok ve elektriktir. Elektrik, elektrik ark ocaklarında hurda eritme, haddehanelerde ısıtma ve ısıl işlem proseslerinde, haddehane merdanelerinin hareket vermek amacıyla kullanılmaktadır. Tüm AB üyesi ülkelerinin karbon salınımını 2030 yılına kadar %40 oranında azaltacağını belirtmişlerdir. Entegre tesislerde sıvı ham demir, çelik ve kok üretimi sırasında yanıcı proses gazları ile kombine çevrim santrallerinde elektrik üretimi sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek fırınlarda açığa çıkan gaza ait sıcaklık ve basıncın içerdiği enerjiyi TBT ile elektrik üretimi sağlanabileceğini belirtmişlerdir. TBT sisteminde yaklaşık olarak 40-60 kWh/ton sıvı ham demir enerji elde edilebilmekte olup bu enerji turbo körüklerin enerji ihtiyacının 30%'unun geri kazanımının yapılabileceğini ifade etmişlerdir (Johansson ve Söderström, 2011).

Zhou ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, TBT'lerde verim arttırıcı çalışmalar kapsamında otomatik kontrol sistemlerinden bahsedilmiştir. TBT devreye girdiğinde, yüksek basınçlı fırın basıncının hızla artmasını önlemek için gaz basıncını düşüren valf grubundan biri hızlı bir şekilde açılır. TBT çalışması sırasında yüksek fırının tepe basıncını stabilize etmek için, regülatör statik bıçak kontrolünde bir ilk geri besleme kontrol döngüsü kullanılır ve pratik uygulamada mükemmel bir kontrol sonucu elde edilir. Böylece bu

sistem tepe basıncının dengesini artırır ve TBT'nin enerji geri kazanım moduna sorunsuz ve istikrarlı bir şekilde geçebileceğini garanti etmektedir. (Zhou, Zeng ve Tang, 2017).

Cai ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada YF TBT sisteminin demir çelik sektöründe ikinci en değerli enerji geri kazanım sistemlerinden biri olduğunu belirtmiş olup türbin sistemine bağlı dönen jeneratörde enerji tüketiminin %30'unun geri kazanılabileceğini ifade etmişlerdir (Cai, Xiao, Wang, Gao, Duan ve Mao, 2017).

Odabaş ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada Kardemir A.Ş. örneği üzerinden yüksek fırınlarda verimlilik analizi ile tasarruf potansiyelini hesaplamış ve önerilerde bulunmuşlardır. Enerji tasarrufu projelerini ve finansman ihtiyaçlarını ortaya koyarak geri ödeme sürelerini de göstermişlerdir. Yüksek fırın tepe gazı basıncı enerjisinin geri kazanılması için önerilen TBT için tahmini 10 000 000 Amerikan Doları yatırım maliyeti belirlenmiş olup, geri ödeme süresinin 1 yıl olduğunu ifade etmişlerdir (Odabaş, 2014).

Guo ve Fu'un yapmış olduğu çalışmada süreç içinde spesifik enerji tüketimini düşürmek amacıyla kok kuru söndürme teknolojisi, pulverize kömür enjeksiyon teknolojisi ve TBT sistemi teknolojisinin kullanıldığını belirtmiştir. TBT sisteminin kullanılmasıyla Yüksek Fırınlardaki enerji tüketiminin 30% kadar kısmının geri kazanılabildiği ve enerji tüketim değerinin 11kg/t kadar azaldığı belirtilmektedir. 2007 yılının sonlarına Çin'de 2000 m³ hacmin üzerindeki 49 adet Yüksek Fırına TBT sistemi kurulmuş olup 2030 yılına kadarki süreçte tesis edilen ve edilecek büyük hacimli tüm Yüksek Fırınlara TBT sisteminin kurulmasına devam edileceğinin planlandığını belirtmişlerdir (Guo ve Fu, 2010).

Kuşoğlu, yapmış olduğu çalışmada TBT sisteminin enerji verimliliği anlamındaki önemini, TBT işleten fabrikalara sağladığı avantajları, Yüksek Fırın tepe basıncı türbin sistemine sahip olan ülkelerin sayısal istatistikleri ve teknolojik avantajları ile ilgili verileri incelemiştir. Örnek bir fabrikada Yüksek Fırın tepe basıncı türbin sistemi fizibilite çalışmaları ile ilgili teknik ve finansal analizler yapılmış, yatırımın yaklaşık kurulum ve işletme maliyetleri, toplam maliyet ve geri ödeme süresi hesaplanmıştır (Kuşoğlu, 2017).

Zheng ve arkadaşları, tepe basıncı türbin sistemlerinde Elman model tabanlı güç üretim tahminlemesi çalışması yapmıştır. TBT doğrusal sonuçlar vermeyen karmaşık bir sistem olduğundan güç üretim tahminlemesi için Elman yapay sinir ağları kullanılmıştır. Öncelikle analiz için değişkenler seçilmiştir. Bu değişkenlere göre üretim verileri oluşturulmuştur. Daha sonra Elman sinir ağları ile tahmin modeli oluşturulmuş ve süreç verileri işlenmiştir. Elman tahmin modeli diğer modellere göre TBT güç üretim tahmini konusunda çok daha iyi sonuçlar vermiştir. (Zheng, Yao, Zhou, Yang, Zhang, Li ve Fan, 2018)

Sun ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada endüstriyel metabolizma yaklaşımına dayanan kavramsal bir model geliştirmiştir. Üretim süreçlerinin oluşturulması ve her aktivite için enerji akışlarının çizilmesi ile her adımda enerji tasarrufu fırsatlarının araştırması yapılmıştır. Demir üretim sürecinin incelenmesi sırasında TBT sisteminden bahsedilmiştir. Entegre tesislerde 1000 m³'ten büyük hacimli yüksek fırınlarda tercih edilebilecek bir enerji geri kazanım türbini olduğundan söz edilmiştir (Sun, Li, Xu, Cheng ve Wennersten, 2016).

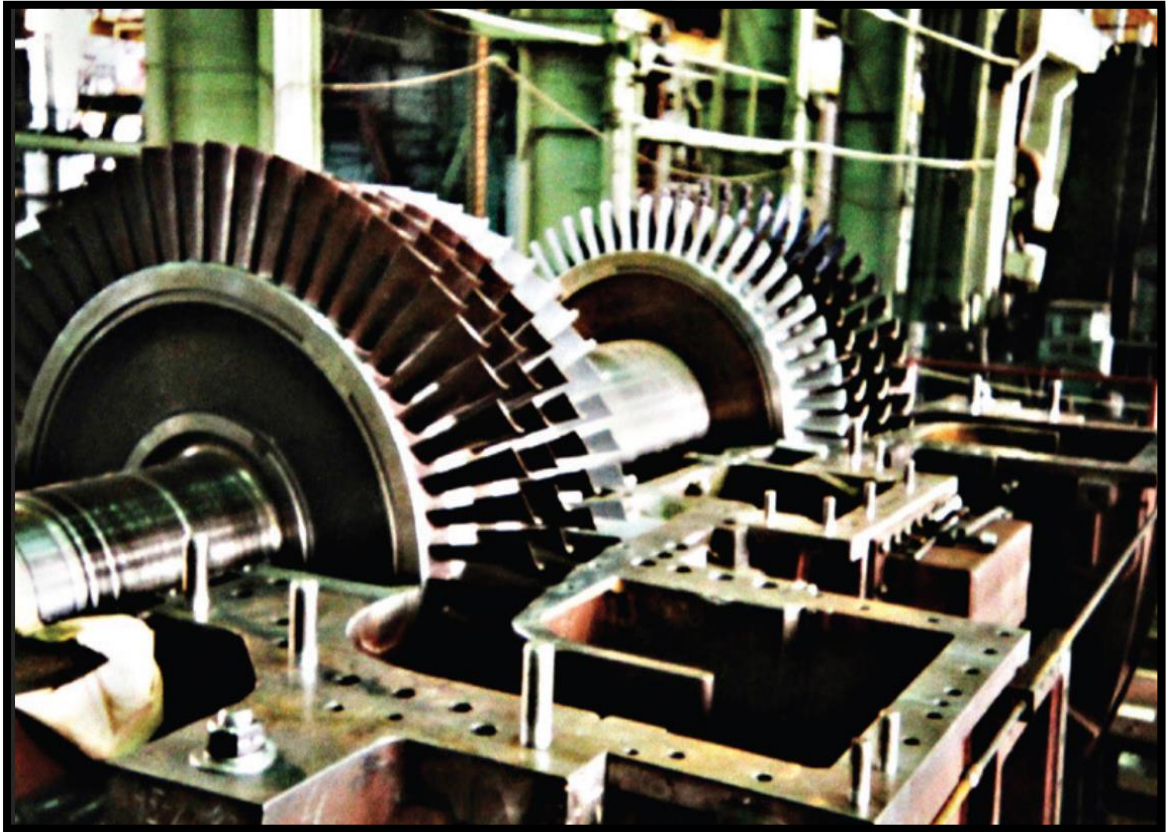
Quader ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada dünya çapında karbon azaltma programları, enerji tasarrufu ve demir ve çelik üretim süreçlerinde karbon ayrıştırma ve depolama için yeni CO₂ emisyonu azaltma teknolojilerine kapsamlı bir bakış sağlamayı amaçlanmıştır. Çalışmalar sonucunda CO₂ azaltımının rolünü sınırlayan birçok faktör olduğu, CCS (karbon tutma ve depolama) teknolojisinin entegre demir ve çelik tesisinde uygulanmasının sürdürülebilir çevreci demir ve çelik üretimi için etkili bir araç olacağını bulunmuştur (Quader, Ahmed, Ghazilla, Ahmed ve Dahari, 2015).

Bu çalışmada 2500 m³ hacimli örnek bir yüksek fırın prosesinde, teknik özellikleri bilinen bir yüksek fırın-gaz temizleme sistemi ile ona bağlı işletilen bir TBT sistemine ait Türbin Gaz Giriş Debisi, Türbin Gaz Giriş Basıncı, Türbin Gaz Giriş Sıcaklığı, Türbin Girişi Bağlı Nem Oranı, Türbin Gaz Çıkış Basıncı, Atmosfer Basıncı, Türbin Girişi YFG Toz İçeriği, Türbin Çıkış Gücü ve Türbin Dönme Hızı gibi veriler kullanılarak TBT sistemi araştırılmıştır. TBT sistemi üretimini etkileyen değişkenlerin sırayla TBT üretimiyle olan ilişkisi (korelasyon) araştırılmıştır. Pearson Korelasyon Katsayısı hesaplanmış; buna göre ilişkinin negatif veya pozitif olma durumu ile ilişkinin gücü tespit edilmiştir. Söz konusu TBT sistemine ait üretim değerleri ampirik olarak da hesaplanırken bir Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) modeli yine bu çalışmada kullanılan parametrelere dayalı bir model önerisi olarak sunulmuştur. Nihayetinde ise sistem gözlem değerleri, ampirik formüllere dayalı teorik üretim değerleri ve ÇLRM modelinin tahmin ettiği değerler, hata değerlendirme kriterleri ortalama karesel hata (Mean Squared Error-MSE), ortalama mutlak yüzdesel hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) ve varyans (R²) değerleri ekseninde kıyaslanmıştır. TBT ile geri kazanımı yapılan saatlik-yıllık enerji miktarına göre karbon emisyonu miktarındaki azalma hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

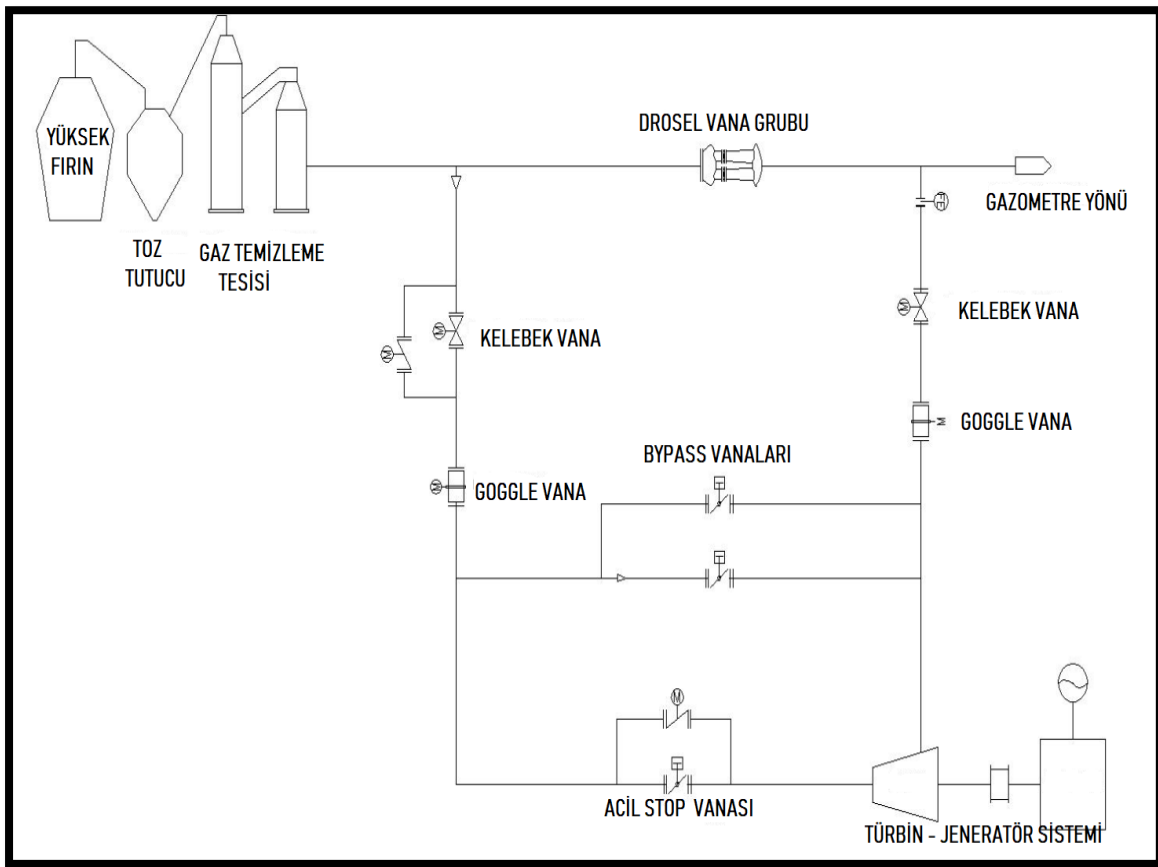
Endüstride enerji verimliliği küresel rekabet gücü için çok önemlidir. Bu nedenle enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik özellikli yöntemlerin geliştirilmesi kaçınılmazdır. Bu doğrultuda yüksek verim sağlayan aydınlatma sistemlerinin kullanılması, yüksek verimli motorların kullanılması, yüksek verimli soğutma sistemlerinin tasarlanması, hat yalıtımlarının yapılması, sistem yalıtımlarının yapılması, atık ısı sistemleri, sistem parametrelerinin bilgisayarlar tarafından sürekli izlenmesi gibi yöntemler artık fabrikalar tarafından standart prosedürler haline gelmiştir. Ancak Entegre Demir Çelik Fabrikalarında (EDÇF) daha yeni sistemler kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de yüksek fırın tepe basıncı enerjisinin geri kazanımını sağlayan Tepe Basıncı Türbin (TBT) sistemidir. Şekil 2.1'de TBT örneği görülmektedir.



Şekil 2.1. Tepe basıncı türbini örneği (REP Holding, 2020)

TBT türbin sistemi, yüksek fırınlarda proses gereği açığa çıkan yüksek fırın gazının genişleme türbini ile enerjisinin geri kazanılması prensibiyle çalışır. TBT'nin anlaşılabilirliği ve değerlendirilebilirliği için yüksek fırınların çalışma prensibi ve yüksek

fırın gazının özellikleri iyi bilinmelidir. TBT sistemi akış şeması Şekil 2.2’de görülmektedir. Yüksek fırınlarda demir üretim sürecinin bir yan ürünü olarak açığa çıkan YFG, toz tutucu ve gaz temizleme tesisinde kirleticilerinden arındırılır. Daha sonra drosel grubu adı verilen kısılma vanalarında basıncı düşürülerek, tüketim noktalarına uygun bir basınç ile iletilmesi sağlanır. TBT ile enerji geri kazanımının yapılabilmesi için YFG’nin TBT üzerinden geçmesi gerekir. TBT sistemi ise drosel vana grubunun paralelinde bulunur. Drosel vanaları tamamen kapatılır ve YFG TBT sistemi üzerine yönlendirilir. Sahip olduğu enerjiyi TBT miline aktaran YFG genişleyerek yoluna devam eder.

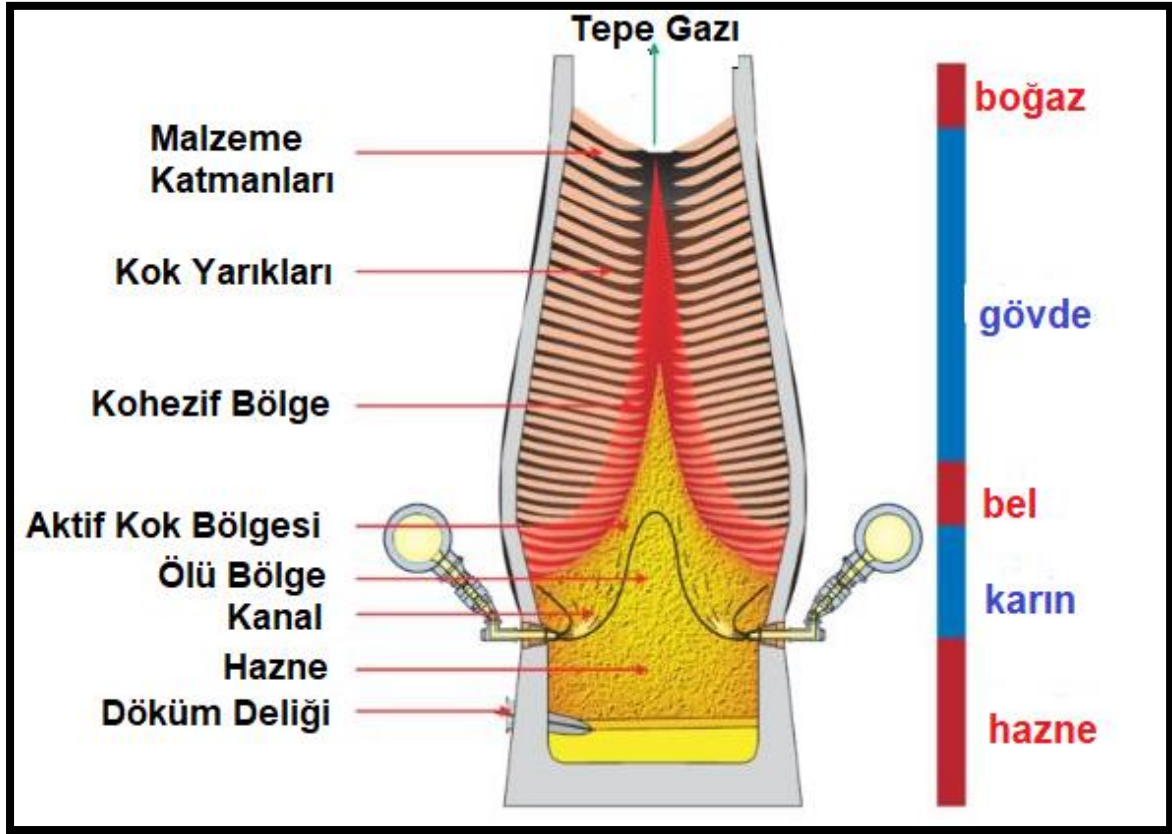


Şekil 2.2. Tepe basıncı türbininin akış şeması üzerinde gösterimi

2.1.1. Yüksek fırınlar

Demir cevherinden pik demir üretilen, kireç taşı ve kok kömürü ile demir içerikli hammaddelerin birlikte ergitilmesi için kurulan tesislere, yüksek fırınlar adı verilir. Yüksek fırınlar genelde iç hazne hacminin büyüklüğü ile ifade edilir. Demir içeren hammaddeler, cüruf elde edimi ve sonrasında elde edilen maddenin özelliklerinin ayarlanabilmesi için oksit temelli hammaddeler, ısı elde edimi için karbon temelli hammaddeler, ters ve sürekli akım prensibiyle çalışan yüksek fırınlar içerisinde işleme tabi tutulmaktadır. Tüyer adı

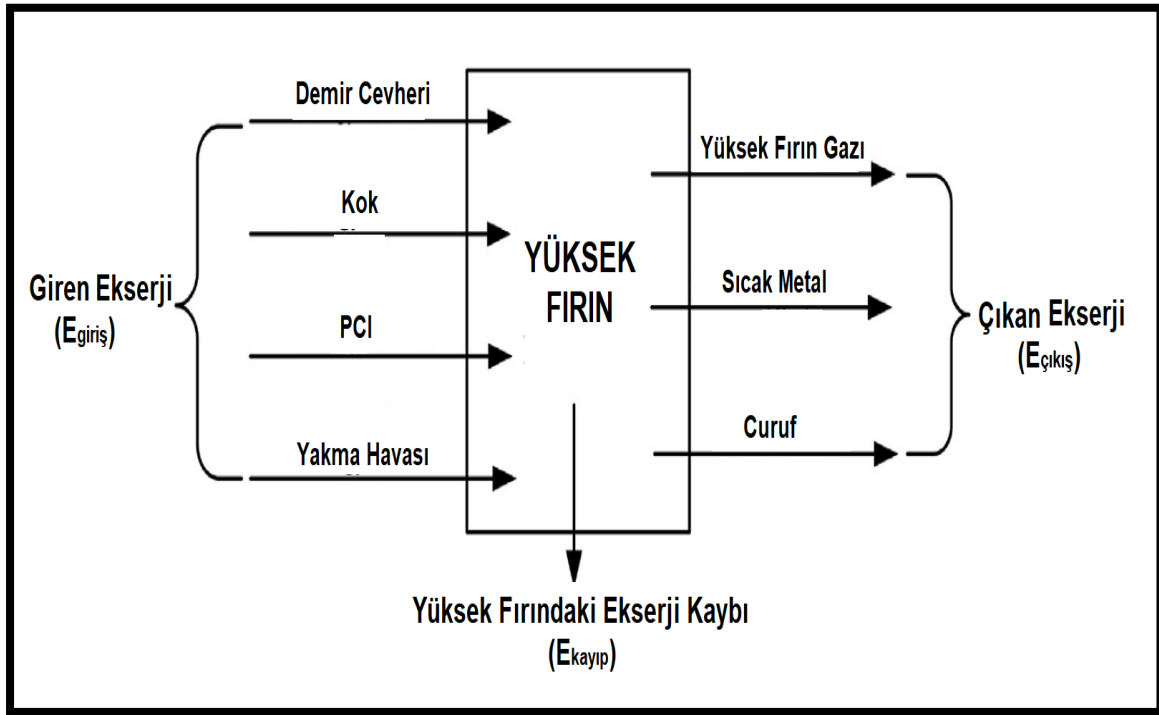
verilen bölgeden üflenen hava sayesinde yakılan kok ile meydana gelen ve bu aşamada redükleyici olarak da isimlendirilen gaz aşağıdan yukarı doğru çıkarken, şarj edilen kok, cevher ve katkı maddeleri hazneye doğru iner. Yüksek fırının ana ürünleri yüksek oranda demir elementi içeren ham demir, cüruf ve baca gazlarıdır. Yüksek Fırınlar Sistemi Şekil 2.3'de görülmektedir. (Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction, 2015)



Şekil 2.3. Yüksek fırınlar sistemi (Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction, 2015)

Yüksek fırın sistemi, birçok faktöre ve parametreye bağlıdır. Bu parametreler temelde üç sınıfa ayrılabilir. Hammadde parametreleri, yakıt parametreleri ve çalışma parametreleri olarak sınıflandırılabilen bu faktörlerin tasarım değerleri aynı zamanda yüksek fırının karakteristiğini ifade eder. Birim üretim başına oluşan maliyet bu parametrelerin analizi ile yapılır ve yüksek fırınların enerji kullanımını hesaplanabilir. Yüksek fırınlarda enerji denge diyagramı oluşturularak enerji kayıp noktaları belirlenebilir, aynı zamanda enerji geri kazanım fırsatları da araştırılabilir. Yüksek fırın prosesi ekserji balansı Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Yüksek fırının ekserji akış girdileri, cevher, kok, toz haline getirilmiş kömür (PCI) ve yüksek fırın yakma havası ekstrüzyonlarını içerir. Yüksek fırının ekserji akış çıktıları, yüksek fırın gazı ve sıcak metalin ekstrüzyonlarını içerir. Cevher, kok, PCI ve sıcak metalin ekserjileri mekanik ekserji, sıcaklık ekserjisi ve kimyasal ekserjiden oluşur.

Yakma havasının ekserjisi basınç ekserjisi, sıcaklık ekserjisi ve mekanik ekserjiyi, yüksek fırın gazının ekserjisi basınç ekserjisi, sıcaklık ekserjisi, mekanik ekserji ve kimyasal ekserjiden oluşur (Liu, 2015; Ziebig ve Stanek, 2006). TBT'lerde esas olarak yüksek fırın gazının sahip olduğu bu ekserjinin geri kazanımının yapılması amaçlanmaktadır.

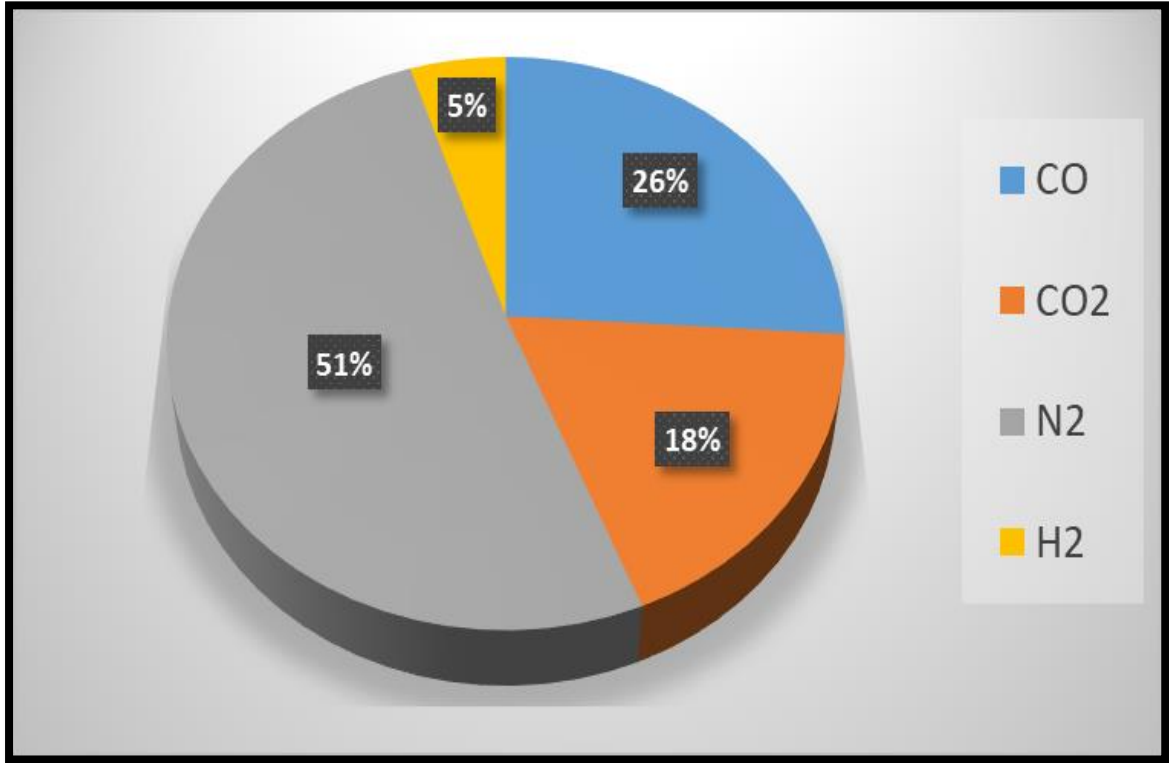


Şekil 2.4. Yüksek fırın prosesi ekserji balansı (Liu, 2015)

2.1.2. Yüksek fırın gazı

Yüksek fırınlarda hammaddenin ergimesi ve demirin redüklenmesi işlemleri karbonmonoksit (CO) gazı ile gerçekleştirilir. Redüklenme ve parçalanma reaksiyonları sonrası açığa çıkan gazlar yüksek fırın içerisinde belirli mertebelerde etkileşime girerler ve sonrasında ortamda kalan gazlar beraberinde küçük boyutlu malzemelerle birlikte yüksek fırından uzaklaştırılır. Tepe gazı olarak da isimlendirilen bu gaz, yüksek fırın gazı olarak adlandırılır. Tipik bir yüksek fırında bir ton sıvı ham demir başına 1320-2210 m³ yüksek fırın gazı üretilebilir (Caillat, 2017; Rosado ve ark, 2020). Yan ürün gazı olarak bilinen yüksek fırın gazı (YFG), yakıt olarak kullanılabilir. Yüksek fırın gazının ısı değeri 2700-3780 kJ/m³ arasında değişkenlik gösterebilir. Yüksek fırın gazı içeriğindeki yüksek karbonmonoksit (CO) nedeniyle oldukça toksik bir gazdır. Kokusuzdur ve havadan ağırdır. Havadan ağır bir gaz olduğundan gaz yayıldığı ortamda zemine çöker. YFG gazının

bulunduğu bölgelerde sabit CO algılama cihazları bulunmalıdır. Bu cihazlar 50 ppm ve üzeri CO algılamaları halinde ışıklı ve sesli uyarı verir.



Şekil 2.5. Örnek bir yüksek fırın gazı analizi

Yüksek fırın gazı, kalorifik değerinden ötürü elektrik ve buhar üretimi yapılan entegre tesislerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte sahip olduğu basınç, sıcaklık ve mekanik enerji nedeniyle ciddi bir enerji tasarruf potansiyeline sahiptir. Yüksek fırın gazının yakıt olarak kullanılabilmesi ve brülörlerde sorunsuz bir şekilde yakılabilmesi için düşük toz konsantrasyonuna sahip olması gerekir. YFG'nin TBT sistemi ile basıncının düşürüldüğü ve genişletildiği proseslerde TBT'nin sağlıklı çalışabilmesi için toz oranının 5 mg'dan düşük olması gerekir (Stalinskii, Kanenko, Alkhasova, Bol'shakov, Golubykh, 2008). YFG içerisindeki tozu ayrıştırabilmek için yüksek fırını terk eden gaz, gaz temizleme sistemlerinde temizlenerek yoluna devam eder. Bu nedenle YFG'nin yakıt olarak kullanıldığı tesislerde ve TBT'lerde, gaz temizleme ünitelerinin performansı büyük önem taşır.

YFG, içeriğindeki toz haricindeki bir takım kirleticiler nedeniyle aşındırıcı etki gösterir. Gaz içeriğinde bulunan özellikle amonyak ve hidrojen klorür içeriğinin etkin bir şekilde ayrılması gerekir. Kuru tip gaz temizleme sistemlerinde amonyak ve hidrojen klorür ayrıştırma verimi düşüktür (Luzin, Kazyuta, Mozharenko, Zen'kovich, 2012). Islak tip gaz

temizleme sistemi diye tabir edilen sulu yıkayıcı sistemlerde bu korozif gazların ayrıştırılması daha etkin bir şekilde yapılmaktadır. Gaz halde bulunan bu kirleticilerin gazın çiğ noktasına ulaşması ile yoğunlaşarak boru içerisinde bulunması ciddi korozyon riski oluşturur. Özellikle hidrojen klorür, YFG iletim borularında ve TBT’de korozyon problemi yaratır. Lanzerstorfer ve ark (2019) yapmış oldukları çalışmada YFG içeriğindeki kirleticilerin ayrıştırılmasında ıslak tip gaz temizlemenin etkinliğini araştırmışlardır. Çizelge 2.1’de YFG içerisindeki çeşitli bileşiklerin ıslak tip gaz temizleme sisteminde yıkayıcı öncesi ve sonrası konsantrasyonları gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre amonyak (NH₃) ve hidrojen klorür (HCl) sulu yıkayıcılarda yüksek verimle ayrıştırılmaktadır.

Çizelge 2.1. Yüksek fırın gazı içerisindeki çeşitli bileşiklerin konsantrasyonları (Lanzerstorfer ve ark, 2019)

	Yıkayıcı öncesi ortalama konsantrasyon*	Yıkayıcı sonrası ortalama konsantrasyon*	Ortalama ayrıştırma verimi
	mg/m ³ (STP)	mg/m ³ (STP)	%
HCl	5,3 ± 3,3	0,26 ± 0,10	96
SO ₂	11,9 ± 3,3	2,2 ± 0,6	81
H ₂ S	7,6 ± 8,6	28,0 ± 15,7	-270
COS	264 ± 9	279 ± 5	-6
HCN	0,07 ± 0,06	0,12 ± 0,06	-66
NH ₃	0,28 ± 0,14	0,15 ± 0,04	46

Ortalama konsantrasyon ± standart sapma

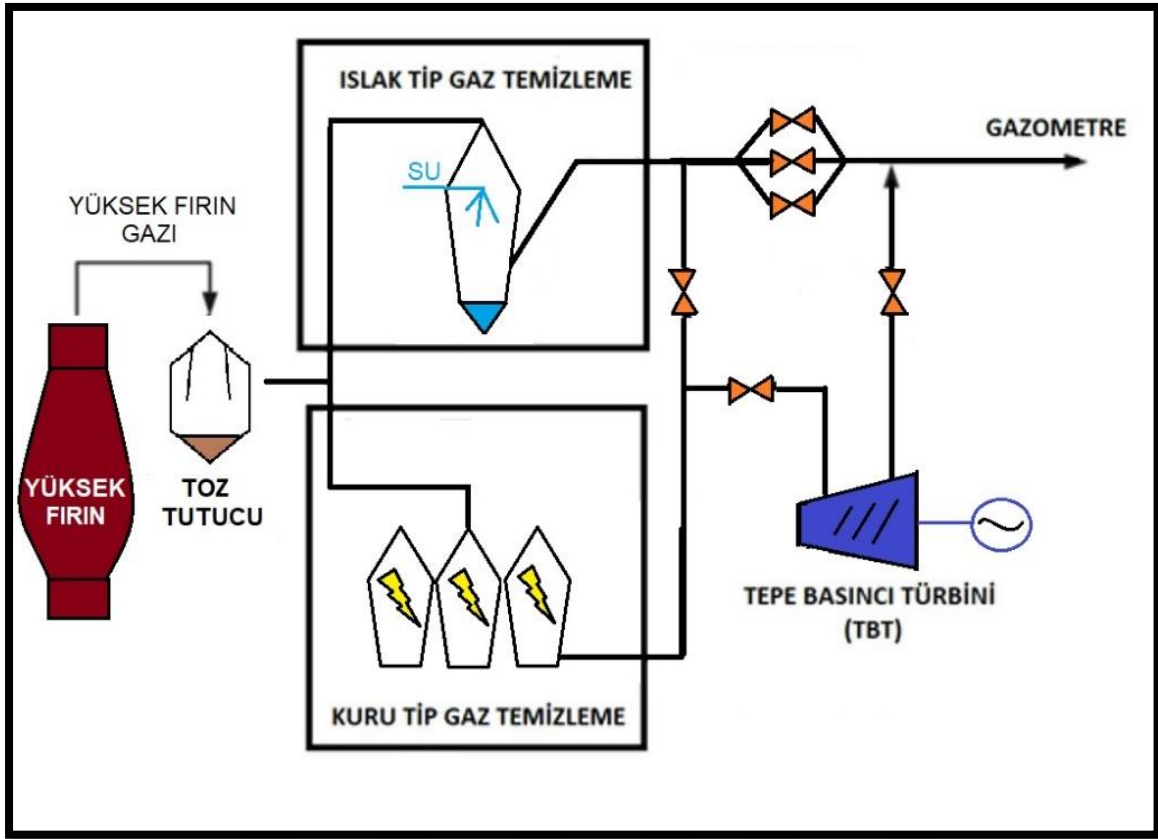
2.1.3. Yüksek fırın tepe-basıncı türbin sistemi (TBT)

TBT sistemi, yüksek fırınlar tepe basıncını kontrol ederken yüksek fırın tepe mekanizmasından gaz temizleme tesisine aktarılan yüksek fırın gazının içerdiği enerjiden faydalanılarak (yakılmaksızın) bir türbinin çalıştırılması ve türbin miline bağlı bir jeneratör sistemi ile elektrik üretilmesini sağlamaktadır. Yüksek Fırın Tepe-Basıncı türbin sistemi dünya üzerinde Brezilya, İtalya, Çin, Japonya, Güney Kore, Almanya 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 kurulmaya başlanmıştır. Temsili TBT Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Tepe basıncı geri kazanım türbini (SINOSTEEL, 2019)

TBT sistemleri, kuruldukları sistemlerde bulunan gaz temizleme ünitelerinin tipine göre isimlendirilir. Buna göre su ile yıkama yapılan gaz temizleme ünitelerinin devamına kurulan TBT, Islak Tip Tepe Basıncı Türbini; elektro filtreler vasıtasıyla susuz temizlik yapılan gaz temizleme ünitelerinin devamına kurulan TBT ise Kuru Tip Tepe Basıncı Türbini olarak isimlendirilir. Gaz temizleme metoduna göre TBT Sistemi şematik olarak Şekil 2.7’de görülmektedir. Kuru tip tepe basıncı türbinleri ile yaş tip tepe basıncı türbinleri arasında temel prensipler açısından fark yoktur. Fakat kuru tip TBT, yaş tip TBT’ye oranla daha yüksek verimlidir. Kuru tip gaz temizleme sisteminde su kullanılmadığından TBT giriş sıcaklığı ıslak tipe kıyasla daha yüksektir. Ayrıca kuru tip gaz temizleme sisteminden geçen gaz daha az basınç kaybına uğrar. Bu sebeplerle TBT’ye daha yüksek sıcaklıkta ve daha yüksek basınçta gelen YFG ile daha fazla enerji elde edilebilir (Lanzerstorfer, Preitschopf, Neuhold ve Feilmayr, 2019). Kuru tip TBT’lerde yüksek fırınlardan gelen gaz toz tutucuda kaba tozunu bıraktıktan sonra elektrofiltrelere giriş yapar. Elektrofiltrelerde yüksek voltajla gazın içeriğindeki tozların ayrıştırılması işlemi yapılmaktadır. Örnek bir tesiste bulunan elektrofiltreler Şekil 2.8’de gösterilmektedir.

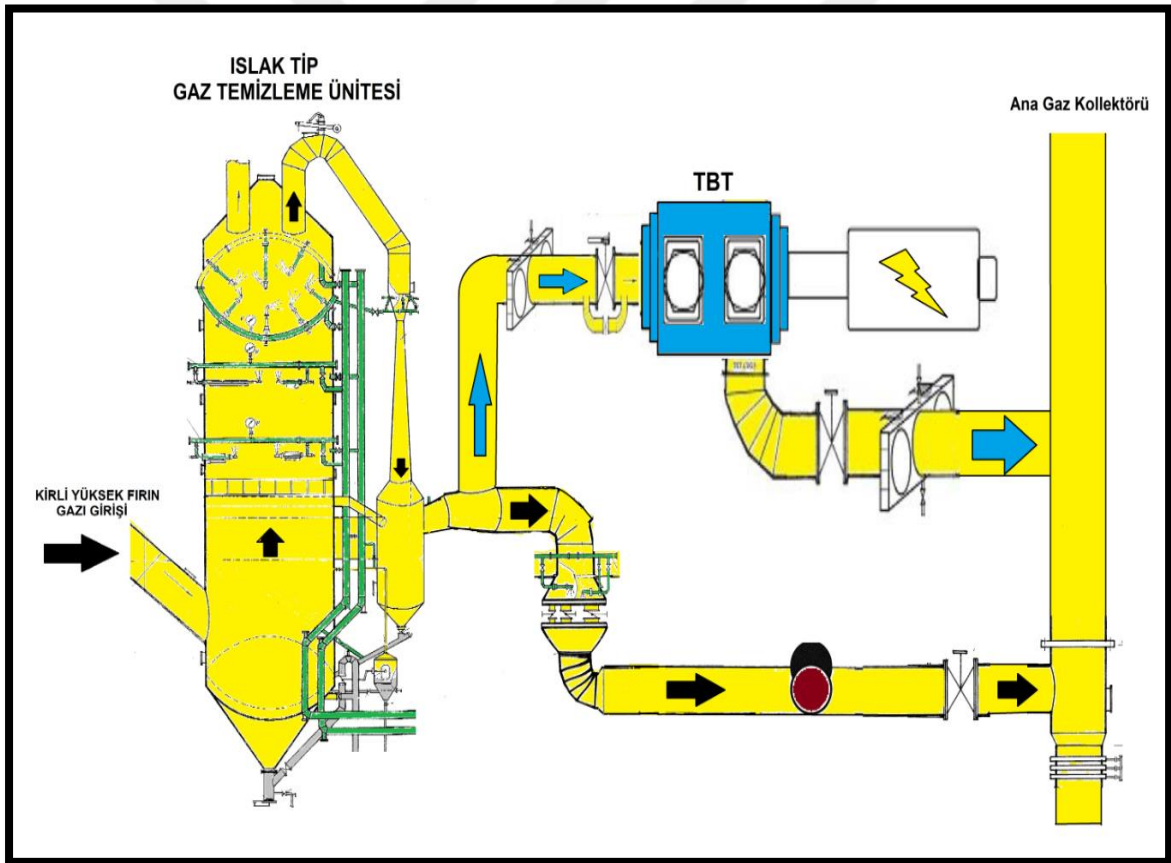


Şekil 2.7. Gaz temizleme metoduna göre TBT sistemleri



Şekil 2.8. Kuru tip gaz temizleme tesisi elektrofiltreleri (TAPC,2020)

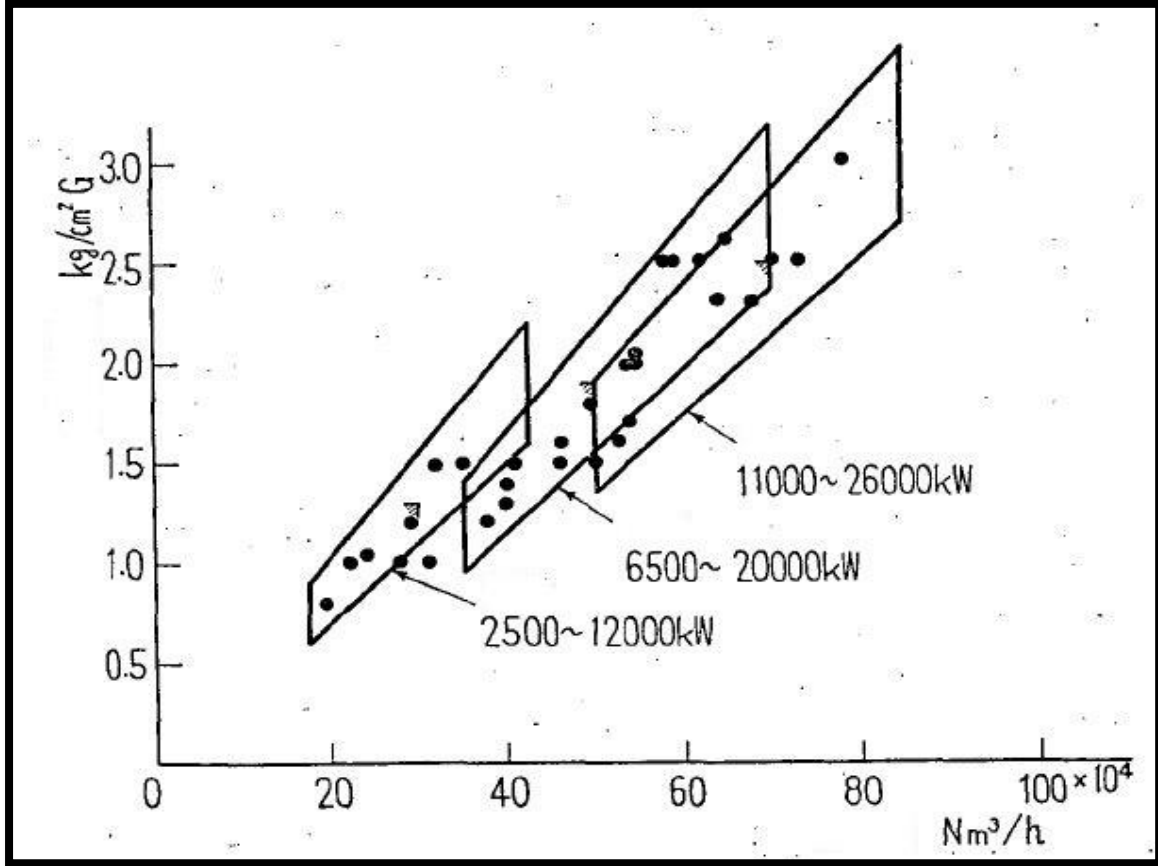
Islak tip tepe basıncı türbinleri, ismini ıslak tip gaz temizleme tesisinden almaktadır. Yüksek fırınlarda açığa çıkan ve bir başka deyişle tepe gazı olarak adlandırılan yüksek fırın gazı, içeriğinde bir çok kirletici yabancı partikül taşır. Bu nedenle gazın içerisindeki kirleticilerin temizlenmesi gerekir. Islak tip tepe basıncı türbini akış şeması Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Yüksek fırın gazının yüksek fırınlardan çıktıktan sonraki ilk durağı kaba toz tutucudur. Burada kendi ağırlığıyla bunkere düşen görece büyük yabancı maddeler ile bir miktar toz gazdan ayrıştırılır. Toz tutucuyu terk eden yüksek fırın gazı suyla temizliğin yapılacağı gaz temizleme tesisine gelir. Gaz temizleme tesisinde basınçlı su ile oluşturulan su perdesinden geçen gaz temizlenir. Yıkanan gazın neminin ayrıştırılması işlemi ise demister adı verilen nem tutucuda yapılır. Bütün bu işlemlerden sonra temizlenen ve nemi ayrıştırılan gaz TBT’ye giriş yapar. TBT’ye giren yüksek fırın gazı türbin rotorunu döndürmek suretiyle iş yapar; genişleyerek ve soğuyarak türbini terk eder.



Şekil 2.9. Islak tip TBT sistemi akış şeması

1979 yılında ıslak tip tepe basıncı türbinlerinin geliştirilmesiyle ilgili çalışma yapan Abe ve arkadaşları, yayınladıkları çalışma ile 1 bar ve üstü tepe basıncına sahip yüksek fırınlarda TBT uygulamanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. 1967-1971 yılları arasında yapılan test çalışmalarıyla TBT ile yüksek ekonomik verim elde edilebileceği görülmüştür. Gaz

debisi ve tepe basıncına göre kurulabilecek tepe basıncı türbinin kapasitesini Şekil 2.10'da göstermişlerdir (Abe, Umemoto ve Teshima, 1979). Buna göre belirlenen YF tepe basıncı ve YFG gaz debisi değerine göre ne kadarlık bir enerji geri kazanılabileceği yaklaşık olarak hesaplanabilmekte, performans hesaplamalarında üretim değeri hakkında yorum yapılabilmektedir.



Şekil 2.10. Gaz debisi ve tepe basıncına göre TBT kapasitesinin belirlenmesi (Abe, Umemoto ve Teshima, 1979)

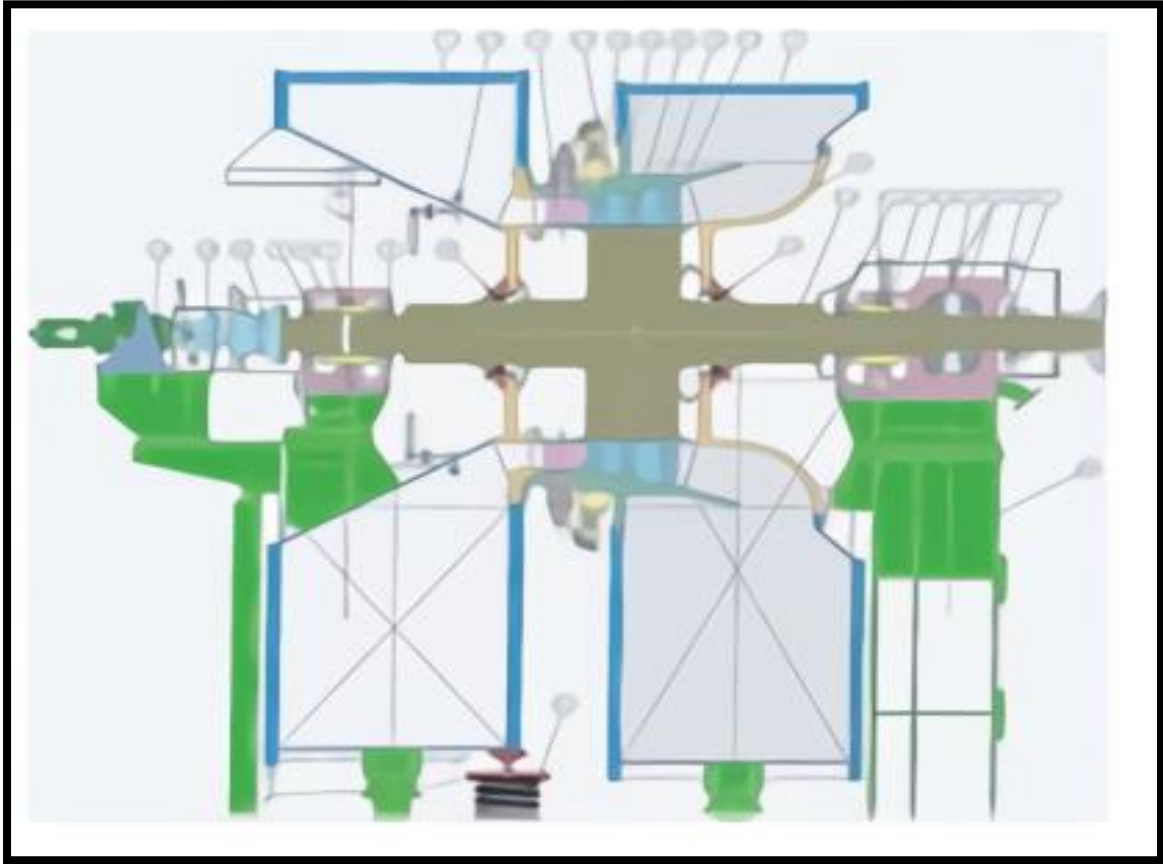
Yüksek fırın kapasitesi ve diğer işletme parametrelerine göre TBT yatırımı geri ödeme süreleri Çizelge 2.2 ile gösterilmiştir. YF kapasitesi ve tepe basıncı değerlerine göre ıslak veya kuru tip TBT'ler ile ne kadarlık bir enerji geri kazanılabileceği, buna göre geri ödeme sürelerinin ne kadar olacağı hesaplanmıştır. Buna göre daha büyük kapasiteli YF'lere kurulacak TBT'nin geri ödeme süresinin daha kısa olacağı görülmektedir. Ayrıca ıslak tip TBT yerine kuru tip TBT'lerin daha fazla enerji geri kazanımı sağladığı, buna paralel olarak da geri ödeme sürelerinin daha kısa olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.2. Yüksek Fırın Kapasitelerine Göre TBT Kurulum Maliyetleri (Worrell, Martin ve Price, 1999)

No	Parametreler	Birim	Dizayn	Dizayn	Dizayn	Dizayn
1	Yüksek Fırın Kapasitesi	m ³	<1000	<1250	<2300	<4000
2	Tepe Basıncı	kPa	110-120	120-150	150-200	200-250
3	Enerji Geri Kazanımı, kuru	GWh	24	38	64	140
4	Enerji Geri Kazanımı, ıslak	GWh	17	26	44	100
5	Geri Ödeme Süresi, kuru	yıl	2,03	1,62	1,51	1,07
6	Geri Ödeme Süresi, ıslak	yıl	4,28	3,32	3,06	2,12

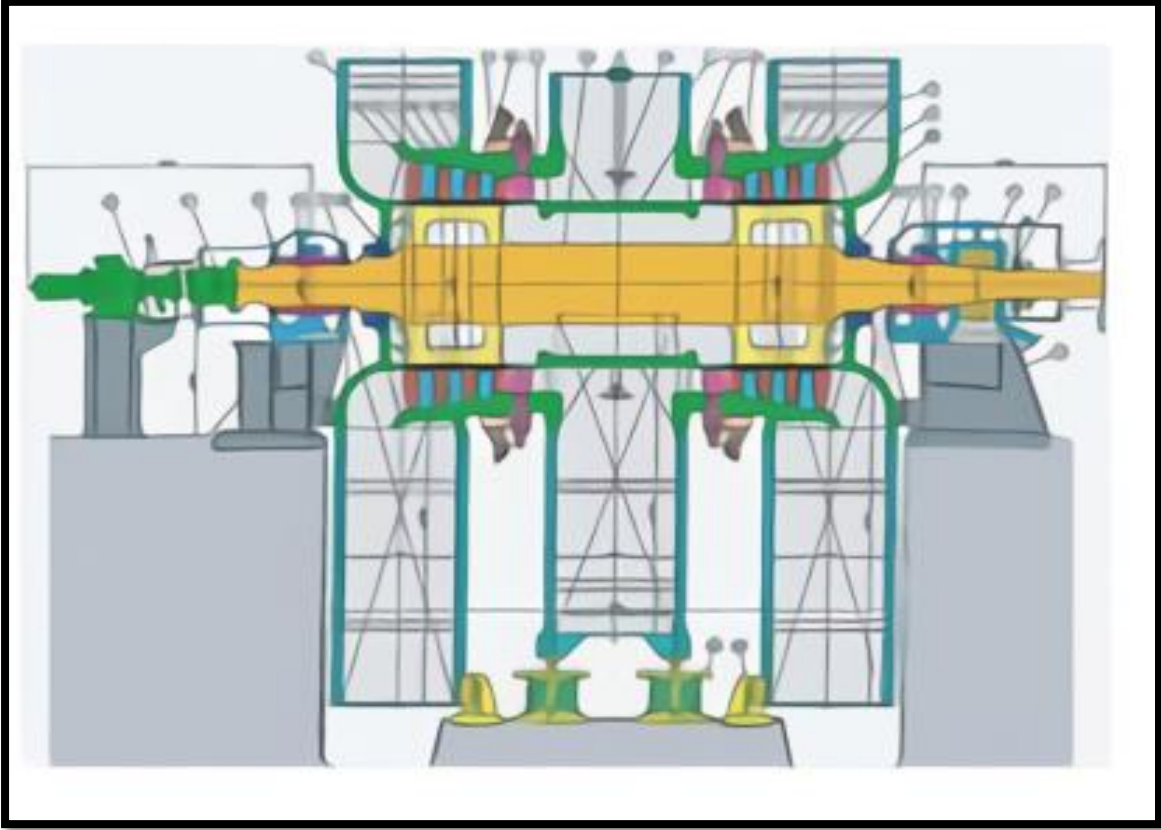
TBT'lerde farklı kurulum varyasyonları mümkündür:

Tek Akışlı: Tek Akışlı TBT'lerde bir adet YF ve bir adet TBT sistemi vardır. YFG türbine tek bir yoldan giriş yapar ve türbin rotoru döndürülür. YFG tek bir çıkış noktasından türbini terk eder.



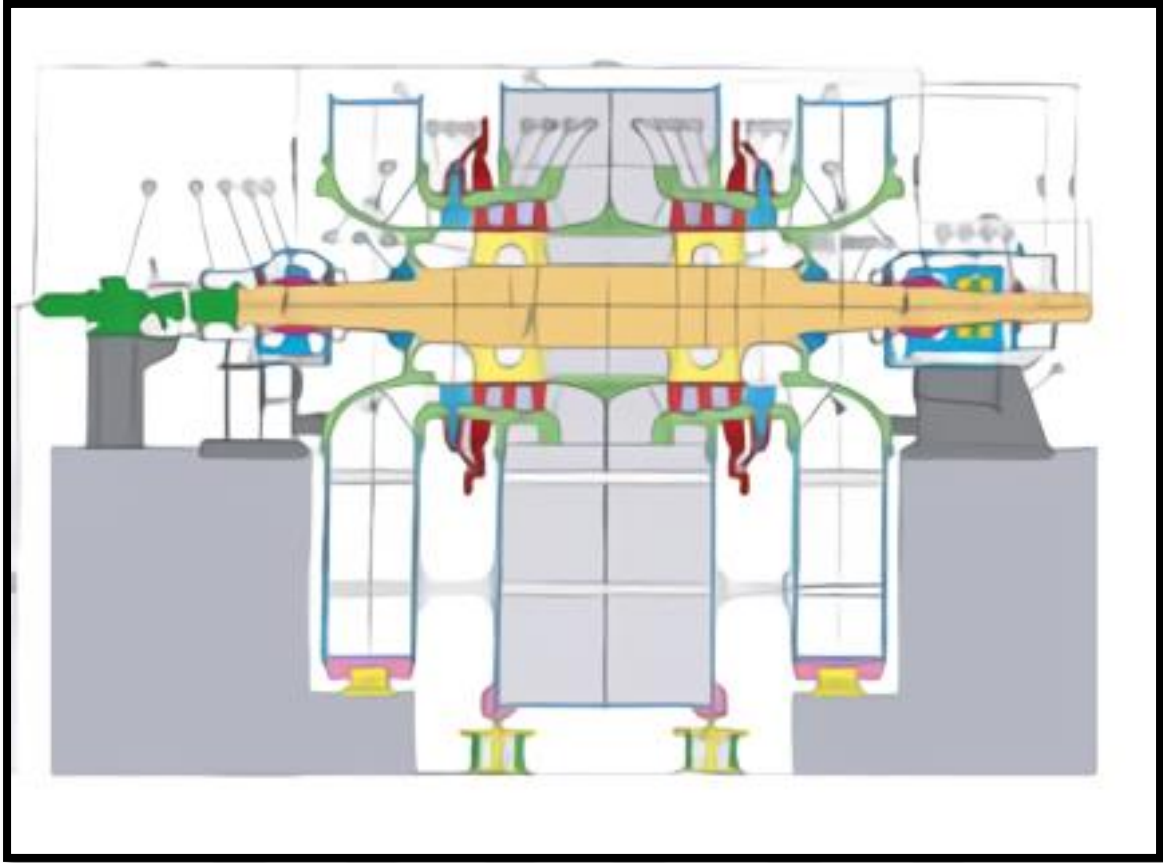
Şekil 2.11. Tek akışlı tepe basıncı türbini örneği (IMI, 2020)

Çift Akışlı: YFG farklı iki kanaldan türbine girer. İki farklı stator kanat sistemi vardır. Jeneratör iki gaz hattının ortasında bulunur. Tek akışlı sistemde olduğu gibi bir adet YF, bir adet TBT vardır. Fakat YFG iki farklı kanaldan türbine girerek, tek bir mile bağlı iki farklı kanat sistemini tahrik eder. türbin mili türbin jeneratör milini döndürerek enerji üretir. İki farklı kanaldan giriş yapan YFG, iki farklı çıkış noktasından türbini terk eder.



Şekil 2.12. Çift akışlı tepe basıncı türbini örneği (IMI, 2020)

Çift Görevli: Benzer özelliklerde iki ayrı YF tarafından sağlanan gaz ile türbin sistemi çalıştırılır. Şekil olarak çift akışlı türbine benzemektedir (DeKarz, 2016). İki farklı yüksek fırından, farklı gaz hatlarıyla taşınan YFG iki farklı kanaldan türbine girerek, tek bir mile bağlı iki farklı kanat sistemini tahrik eder. Türbin mili türbin jeneratör milini döndürerek enerji üretir. İki farklı kanaldan giriş yapan YFG, iki farklı çıkış noktasından türbini terk eder. Çift görevli sistemlerde YF'lerden birisinin duruş yapması ve YFG üretiminin durması halinde TBT tek YF ile çalışmaya devam eder; güç üretiminde düşüş olur.



Şekil 2.13. Çift görevli tepe basıncı türbini örneği (IMI, 2020)

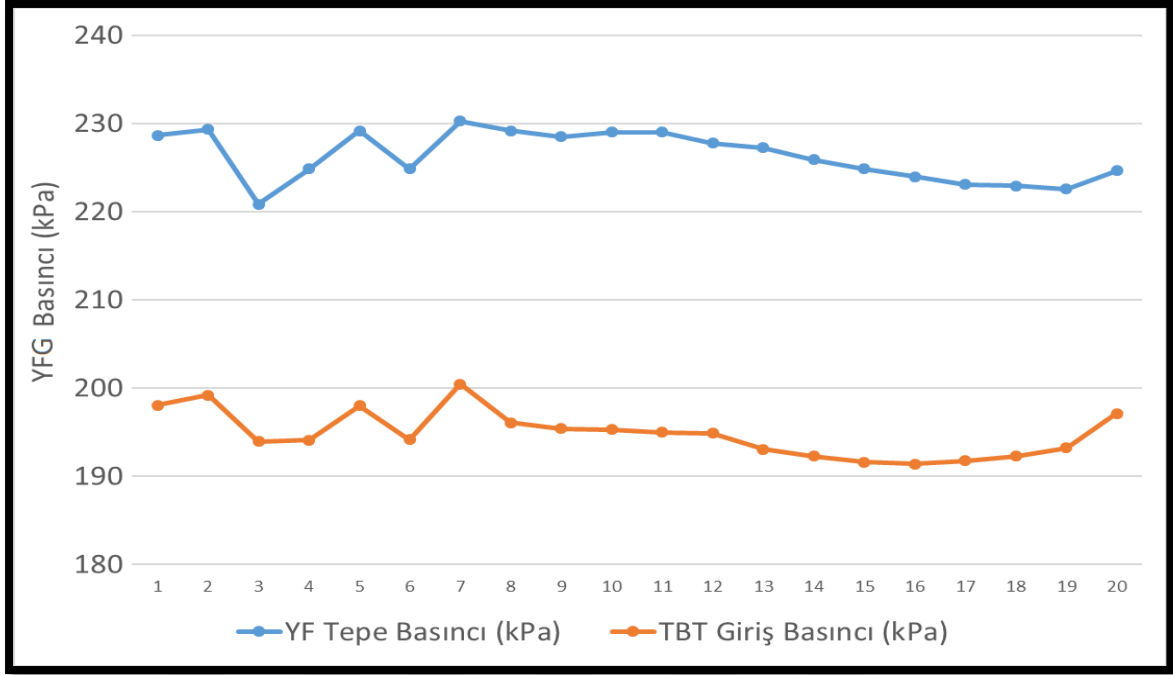
Bu çalışmada örnek olarak seçilen TBT sistemi ıslak tip tepe basıncı türbini olup tek akışlıdır. Örnek Yüksek fırın - TBT sistemi üretim sürecine bağlı izlenen değişkenler ve kayıt altına alınan veriler Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. YFG gaz debisi, TBT sisteminden bir saatte geçen YFG miktarını göstermektedir. Giriş gaz basıncı değeri, YFG’nin YF tepesinde sahip olduğu basıncın gaz temizleme sisteminde uğradığı kayıplar sonrasında TBT girişinde sahip olduğu basınç değeridir. Giriş gaz sıcaklığı ile çıkış gaz sıcaklığı, TBT öncesi ve TBT sonrasında YFG’nin sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Gaz bağıl nem oranı, YFG’nin TBT girişinde içerdiği bağıl nem miktarını gösterir. Çıkış gaz basıncı, TBT’den genişleyerek çıkan YFG’nin basıncıdır. Atmosfer basıncı değeri, TBT sisteminin kurulduğu ve işletildiği bölgedeki açık hava basıncıdır. YFG toz içeriği, TBT için takip edilen önemli parametrelerden birisi olup, birim hacimdeki toz miktarını ifade etmektedir. Türbin çıkış gücü ile ifade edilen değer, TBT ile jeneratörde üretilen enerjinin kW cinsinden ifadesidir. Türbin dönme hızı, TBT rotorunun bir dakikada kaç devir ile döndüğünü ifade eder. Türbin kanat açıklığı, YF tepe basıncını kontrol eden TBT stator kanatçıklarının anlık açıklık oranıdır. Kanat açıklığı anlık azalıp artarak YF tepe basıncı değiştirilebilir.

Çizelge 2.3. TBT sisteminde takip edilen parametreler

No	Parametreler	Birim	Minimum	Dizayn	Maksimum
1	Gaz Debisi	m ³ /saat	250.000	400.000	500.000
2	Giriş Gaz Basıncı	kPa(mutlak)	180	290	330
3	Giriş Gaz Sıcaklığı	K	315	325	340
4	Çıkış Gaz Sıcaklığı	K	285	295	310
5	Gaz Bağlı Nem Oranı	%	100	100	100
6	Çıkış Gaz Basıncı	kPa(mutlak)	107	108	110
7	Atmosfer Basıncı	kPa		103,3	
8	YFG Toz İçeriği	mg/m ³	< 10	< 10	< 10
9	Türbin Çıkış Gücü	kW	850	11690	14600
10	Türbin Dönme Hızı	d/d	3000	3000	3000
11	Türbin Kanat Açıklığı	%	0	-	100

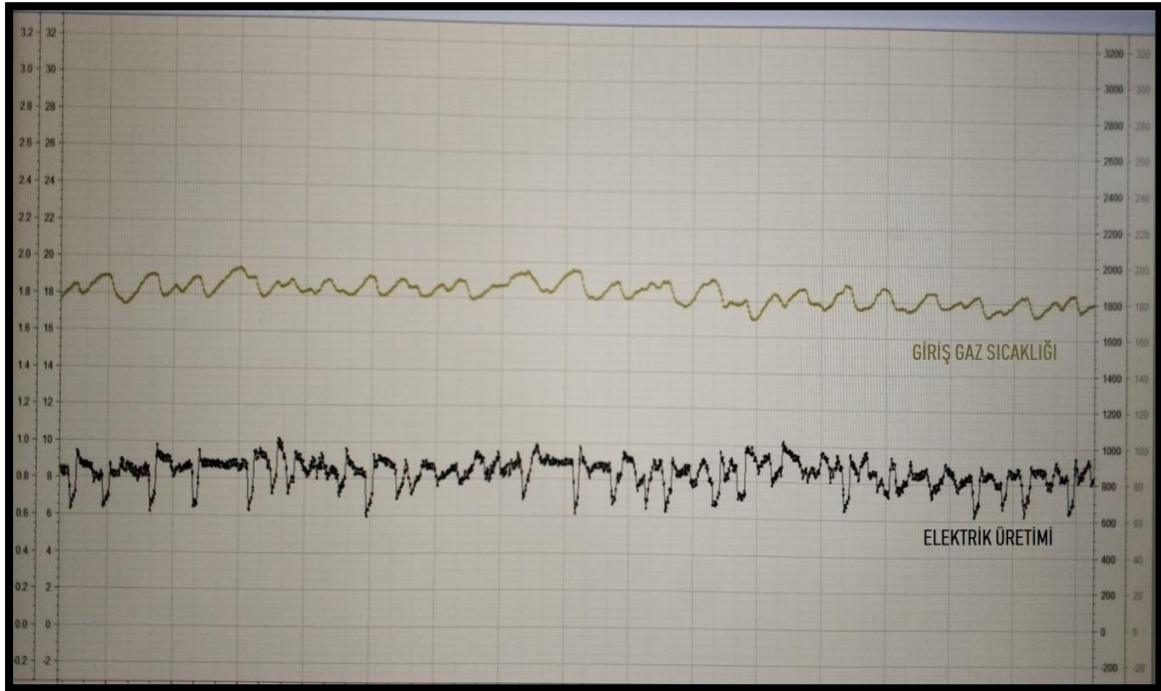
Gaz Debisi: Yüksek fırın prosesinde yan ürün olarak açığa çıkan yüksek fırın gazının miktarını belirtmektedir. Turbo körüklerden sağlanan yakma havasının yüksek fırın içerisinde demirin redüklenmesi işlemi sonrasında yüksek fırın gazına dönüşerek fırını terk eder ve gaz temizleme tesisinde temizlendikten sonra TBT'ye giriş yapar. Gaz debisi terimi, TBT'ye giriş yapan m³/saat cinsinden yüksek fırın gazı miktarını belirtmektedir. Hacimsel debi debimetreler ile ölçülür. Hacimsel debiden, kütleli debiye geçiş yapmak mümkündür. Kütleli debi, hacimsel debinin yüksek fırın gazının yoğunluğu ile çarpımı sonucunda bulunur.

Giriş Gaz Basıncı: Yüksek fırınlar (YF) demir üretim süreci gereği tepe basıncı oluşturur. TBT sistemi kurulumu yapılmış ve devreye alınmış sistemlerde yüksek fırın tepe basıncı TBT üzerinden kontrol edilir. TBT ile oluşturulan yüksek fırın tepe basıncı değeri YF işletme birimi tarafından kontrol edilir. YF çıkışında tepe basıncına sahip olan yüksek fırın gazının, gaz temizleme ünitesi sonrası kayıplardan sonra TBT girişinde sahip olduğu basınca, TBT giriş basıncı adı verilir. Yüksek fırın gazı, ıslak tip gaz temizleme tesisinden geçip TBT'ye ulaşıncaya dek yaklaşık olarak 30 kPa değerinde basınç kaybına uğrar. YF tepe basıncı ile TBT giriş basıncı arasındaki ilişki Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



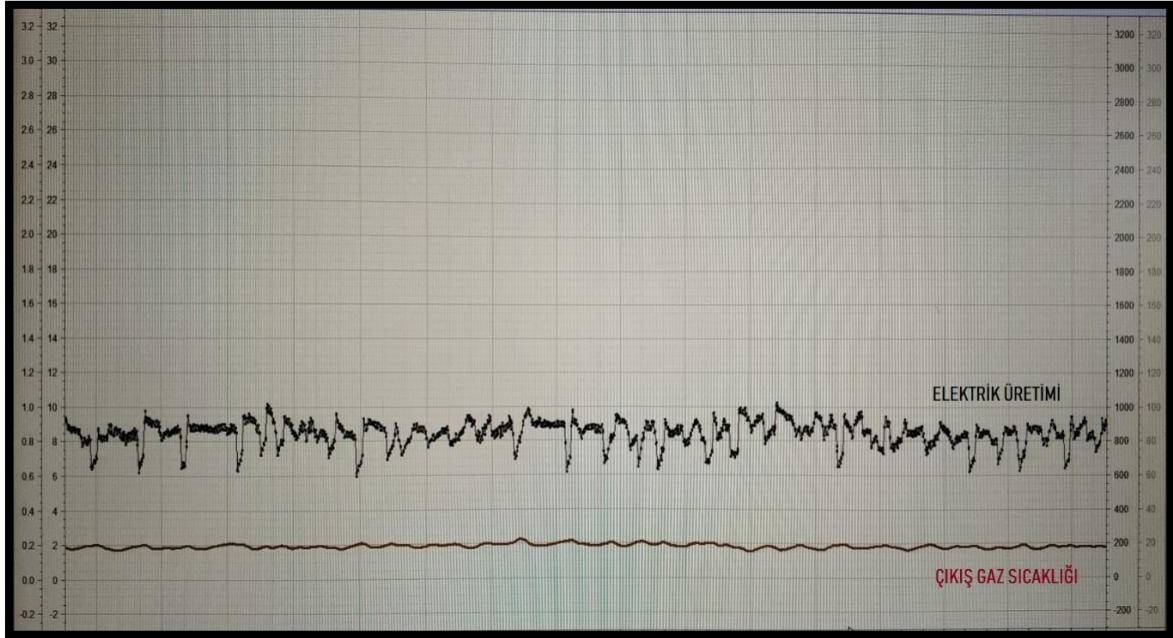
Şekil 2.14. Yüksek fırın gazının gaz temizleme işlemi sırasında uğradığı basınç kaybı

Giriş Gaz Sıcaklığı: Yüksek fırın gazının TBT sistemine giriş noktasında sahip olduğu sıcaklıktır. Yüksek fırını terk eden yüksek fırın gazı, gaz temizleme sisteminde su ile temizleme işlemi sırasında aynı zamanda bir miktar soğur. Türbin girişinde 310-350 K arasında bir sıcaklığa sahiptir. Giriş gaz sıcaklığı ve elektrik üretimi grafiği Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Giriş gaz sıcaklığı – TBT elektrik üretimi grafiği

Çıkış Gaz Sıcaklığı: TBT bir genişleme türbinidir. TBT çıkışında genişleyerek çıkan gazda yaklaşık 30 K'lık bir sıcaklık düşüşü olur. Türbin çıkışında genişleyen ve şebekeye katılan yüksek fırın gazının sahip olduğu sıcaklıktır. Çıkış gaz sıcaklığı ve elektrik üretimi grafiği Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Çıkış gaz sıcaklığı – TBT elektrik üretimi grafiği

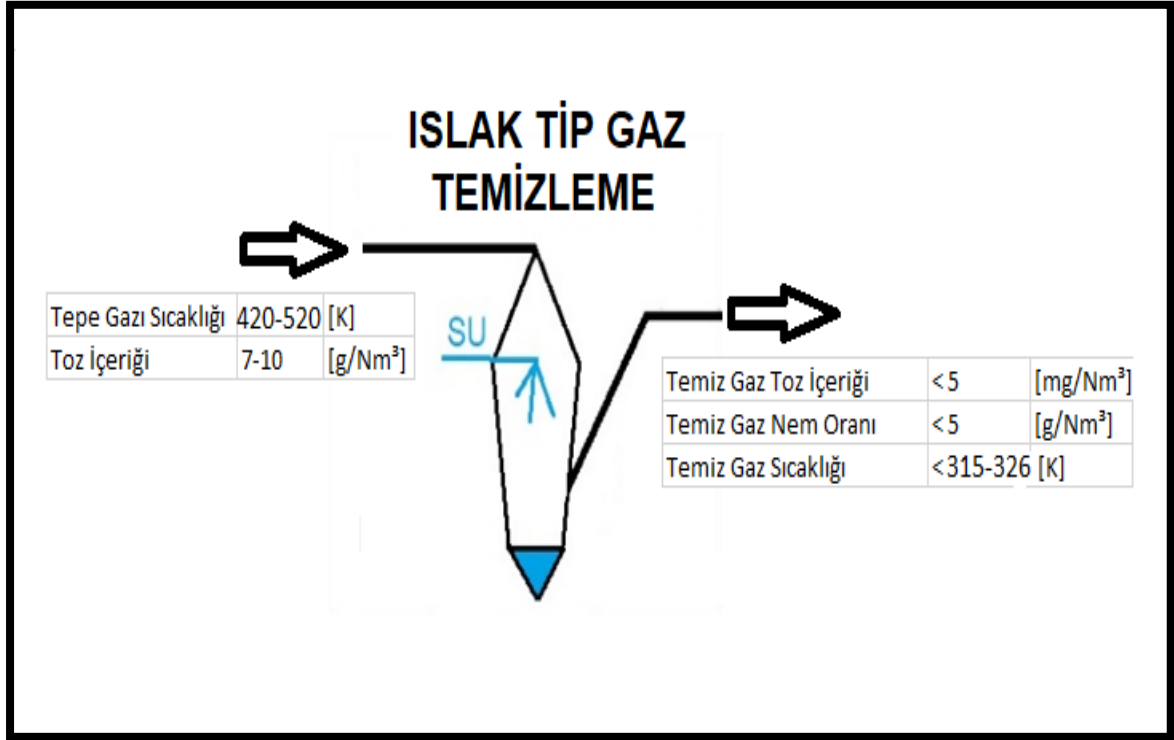
Gaz Bağlı Nem Oranı: TBT sistemine giriş yapan YFG'nin içerdiği nem miktarının, bulunduğu şartlar altında taşıyabileceği maksimum nem miktarına oranıdır.

Çıkış Gaz Basıncı: Türbine giren basınçlı yüksek fırın gazının, türbin çıkışında sahip olduğu basınç değeridir. TBT bir genişleme türbini olduğundan enerjisini türbine aktaran gazın çıkış basıncı giriş basıncına göre oldukça düşüktür.

Atmosfer Basıncı: TBT'nin kurulumunun yapıldığı ve işletildiği bölgedeki atmosfer basıncı değeridir. Deniz seviyesinde kurulumu yapılan bir TBT sistemi için atmosfer basıncı değeri 103,3 kPa olarak alınabilir.

YFG Toz İçeriği: Yüksek fırın gazının gaz temizleme sistemini terk ettikten sonra, TBT girişinde sahip olduğu toz miktarıdır. Toz miktarının TBT girişinden önce düşürülmesi türbin için oldukça önemlidir. TBT'ye gelen gazın içerisindeki toz miktarı türbinin bakım periyodunu da etkileyecektir. Kirli gelen gaz türbin kanatçıkları arasında birikerek türbin verimini düşürecek ve stator kanatların hareketini kısıtlayacaktır. Düşük performanslı bir gaz temizleme tesisinin önünde çalışan bir TBT daha çabuk kirlenerek, daha sık bakım duruşu yapacaktır. Islak tip bir gaz temizleme tesisi öncesinde ve sonrasında YFG'nin toz içeriği ve sıcaklığının durumu Şekil 2.17'de gösterilmiştir. YF çıkışında tepe gazı olarak

adlandırılan sıcak YFG, gaz temizleme sisteminde yıkandıktan sonra soğuyarak yoluna devam eder. YFG içerdği tozun büyük bir kısmını da burada bırakır. Su ile yıkanan gaz bir miktar nemi de beraberinde sürükler, fakat ıslak tip gaz temizlemenin bir parçası olan nem tutucuda nemini bırakır.

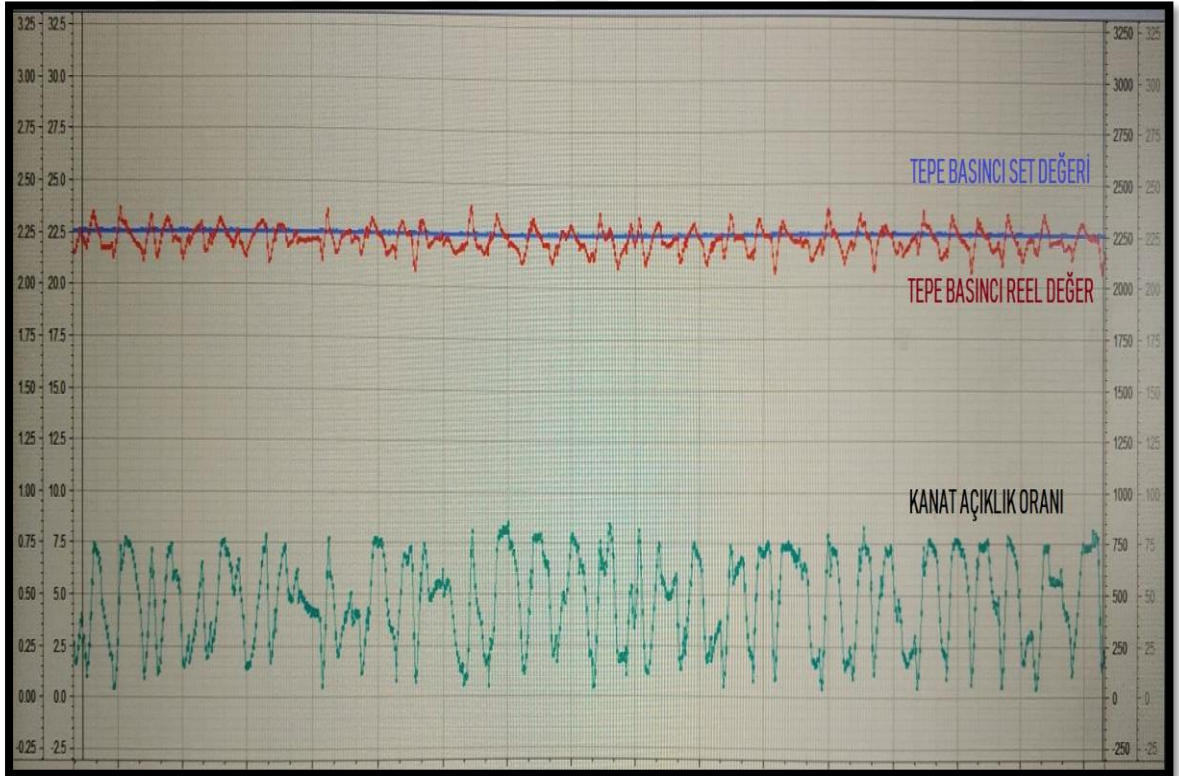


Şekil 2.17. Gaz temizleme öncesi ve sonrası sıcaklık, nem ve toz değerleri

Türbin Kanat Açıklığı: Türbin kanat açıklığı, yüksek fırın tepe basıncını regüle eden stator kanatların açıklık oranının yüzdesel ifadesidir. Stator kanatlar Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Yüksek fırın işletme şartlarına göre değişen tepe gazı basıncı değerinin kontrol edilmesi stator kanatların %0 ile %100 açıklık oranları arasında hareket etmesiyle sağlanır. YF işletme birimi tarafından tepe basıncı set değeri belirlenir. Stator kanatlar ile girilen set değerine tepe basıncı ayarlanır. Set değerine göre stator kanatlar hareket ederek tepe basıncını oluşturur. Stator kanatların açıklık oranının değişmesiyle set değerine tepe basıncının ayarlanması Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Tepe basıncı değeri, set değerine olabildiğince yakın olmalıdır. Tepe basıncı değerinin salınımı fazla olursa YF işletme koşulları etkilenebilir. Bu nedenle stator kanatlar hem YF için hem de TBT için önemli bir ekipmandır.



Şekil 2.18. Tepe basıncı türbini stator kanatları



Şekil 2.19. Stator kanatlar ile tepe basıncının ayarlanması

Türbin Dönme Hızı: Türbin rotorunun rotasyonel dönme hareketinin sahip olduğu hızdır. TBT güç üretimine geçmeden önce sabit bir dönme hızına ulaşır ve şebekeye bağlandıktan sonra aynı hızda dönmeye devam eder. Rotor dönüş hızı, ulusal şebeke frekansıyla (50 Hz) senkron olabildiği devir değeri olan 3000 devir/dakika olarak belirlenmiştir.

Türbin Çıkış Gücü: Gazın kinetik enerjisinin türbin rotoruna aktarılması ve türbinin jeneratör rotorunu döndürmesiyle elektrik üretmesidir. Elde edilen elektrik enerjisi türbin çıkış gücü olarak isimlendirilir. Üretilebilecek maksimum enerji, termodinamik olarak mümkün olan geri kazanımı yapılabilecek enerjinin türbin verimi ve jeneratör verimi ile çarpılması sonucunda hesaplanabilir.

TBT sistemi, yüksek fırınların çalışma rejimiyle doğru orantılı olarak üretim yapmaktadır. Yüksek fırınlar tam kapasite çalışırken TBT sistemi de tam kapasite ile üretim yapabilir. Yüksek fırınların planlı veya plansız duruşlarında tepe basıncını düşürmesi, dolayısıyla YFG debisinin de düşmesi ile TBT güç üretemez hale gelir ve yönlü güç koruması nedeniyle devre dışı olur. TBT'nin devre dışı olmasıyla birlikte,

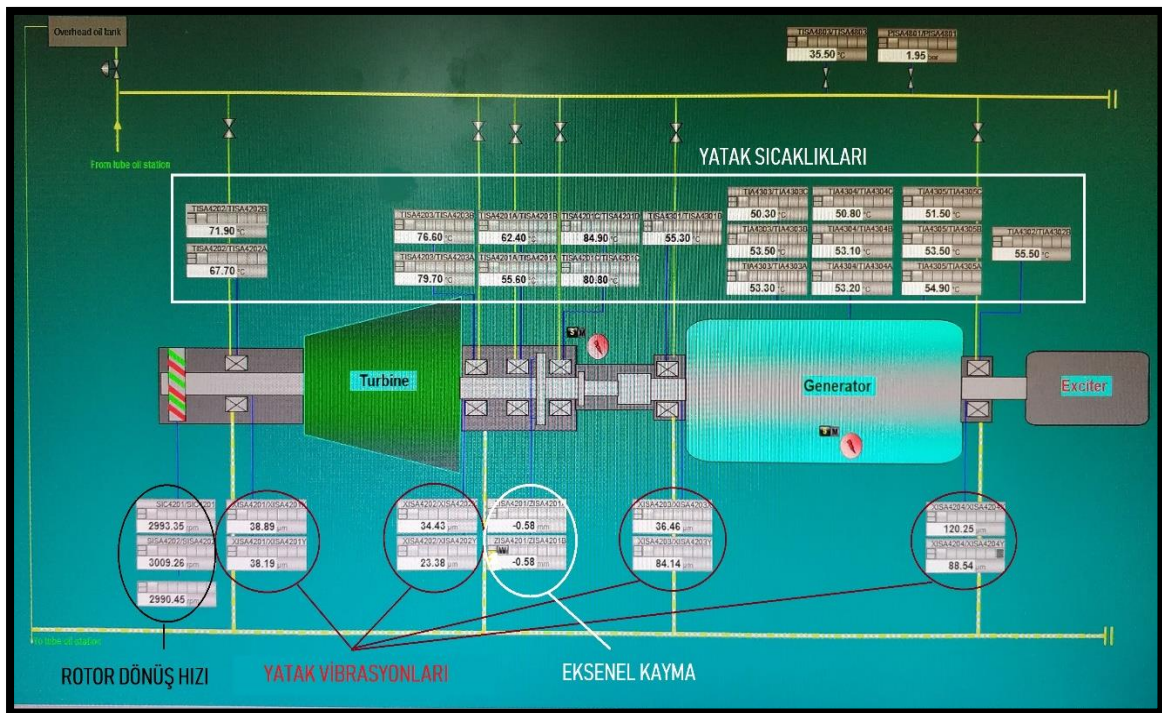
- Acil stop vanası kapanır.
- By-pass vanaları açılır.
- YF tepe basıncı bypass vanaları ile kontrol edilir.
- Türbin rotor hızı 3000 devirden 0'a kadar düşer.
- Rotor hızı sıfırlanınca mil döndürme motoru devreye alınır.
- TBT giriş ve çıkış vanaları kapatılır.

TBT sisteminin devreye alınabilmesi için önce yüksek fırının devreye girmesi ve TBT'nin devreye alınabilmesi için gerekli olan asgari şartların sağlanması gereklidir. Burada bahsedilen asgari şartlar, minimum yüksek fırın tepe basıncı değerini ve üretilen yüksek fırın gazı debisini ifade etmektedir. Şartların oluşmasıyla birlikte yüksek fırın işletme biriminden TBT devreye alınabilir bilgisi beklenir ve ardından TBT devreye alma prosedürü işletilir.

- TBT giriş ve çıkış vanaları açılır.
- Mil döndürme motoru devreye alınır.
- Acil stop vanası açılır.
- TBT start komutu verilir.
- Türbin dönüş hızı 3000 d/d gelince 50 Hz şebeke frekansı yakalanır.
- TBT güç santrali paraleline bağlanarak güç üretim moduna geçer.

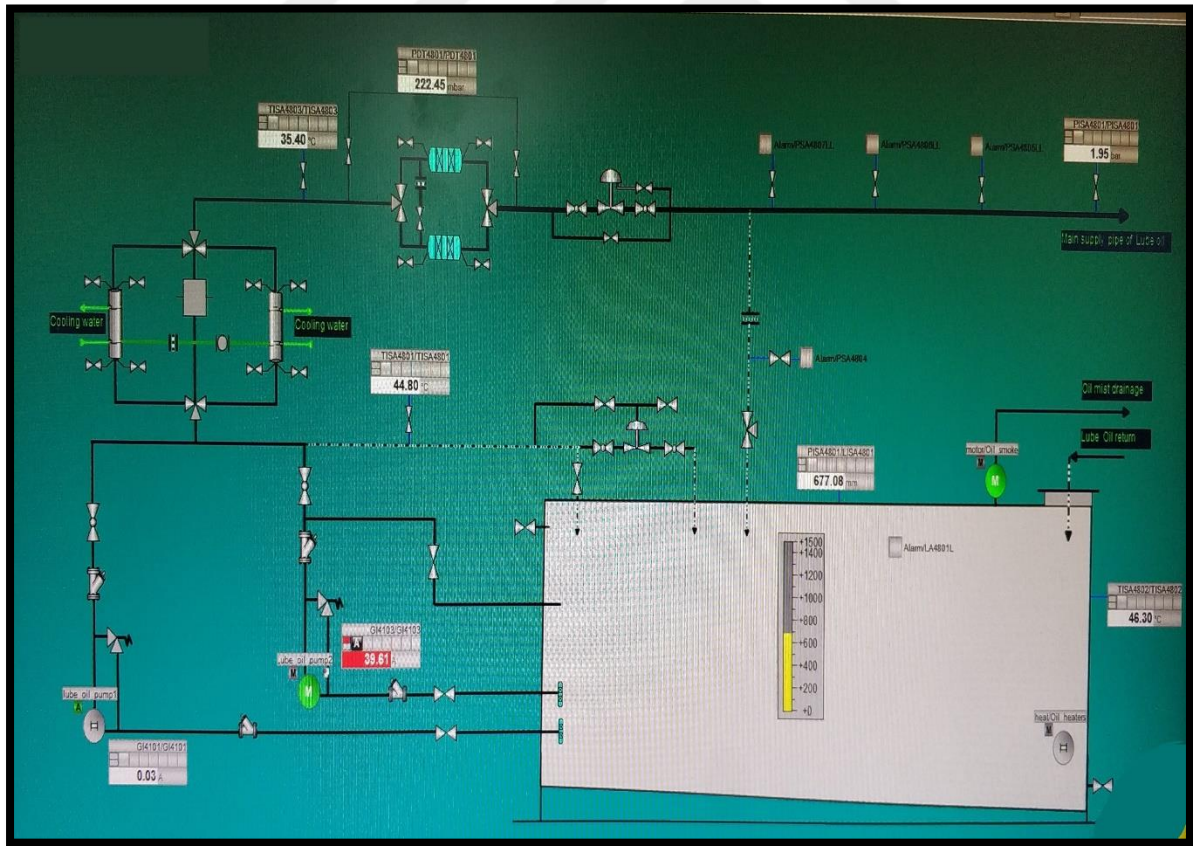
TBT sistemi devredeyken güç üretimini etkileyen parametrelerin yanı sıra türbin prosesi gereği takip edilmesi gereken diğer parametreler hidrolik yağ sistemi, yatak yağlama sistemi, azot sızdırmazlık sistemi, soğutma suyu ve drenaj sistemi, yatak vibrasyonları, yatak sıcaklıkları ve eksenel kayma değerleridir. İşletme sorumlusu bu değerleri anlık olarak işletme ekranlarından takip edebilir. Bu değerlerin takibi ile türbin ekipmanlarının durumu izlenebilmekte; işletme ve bakım ihtiyaçlarının planlamaları yapılmaktadır. Takip edilen parametrelerin kritik değerlere ulaşması veya yaklaşması halinde işletme sorumlusu TBT'yi durdurarak gerekli müdahaleyi yapar. Sistemde kritik parametrelerin alt ve üst limitleri tanımlanarak limit değerlere ulaşması halinde TBT'nin otomatik olarak duruşa gitmesi ve güvenli bölgede kalması sağlanabilir.

Yatak vibrasyonları, yatak sıcaklıkları ve eksenel kayma değerleri ölçüm elemanları TBT rotoru üzerinde bulunması gereken kritik izleme ekipmanlarıdır. Rotor yataklarının durumunu izlemek, yüksek hızda dönen bir makine için oldukça değerlidir. Yatak sıcaklıklarının artması rotor ve yataklar arasındaki yağ filminin zayıfladığına veya yağlamanın olmadığına işaret ediyor olabilir. Vibrasyonun yükselmesi makinenin olumsuz etkilenmesine neden olabilir. Bu nedenle türbin rotoru üzerindeki bu enstrümanların sağlıklı çalışması ve takibinin yapılması gereklidir. Örnek bir vibrasyon, eksenel kayma ve yatak sıcaklıkları takip ekranı Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Vibrasyon, eksenel kayma ve yatak sıcaklıkları takip ekranı

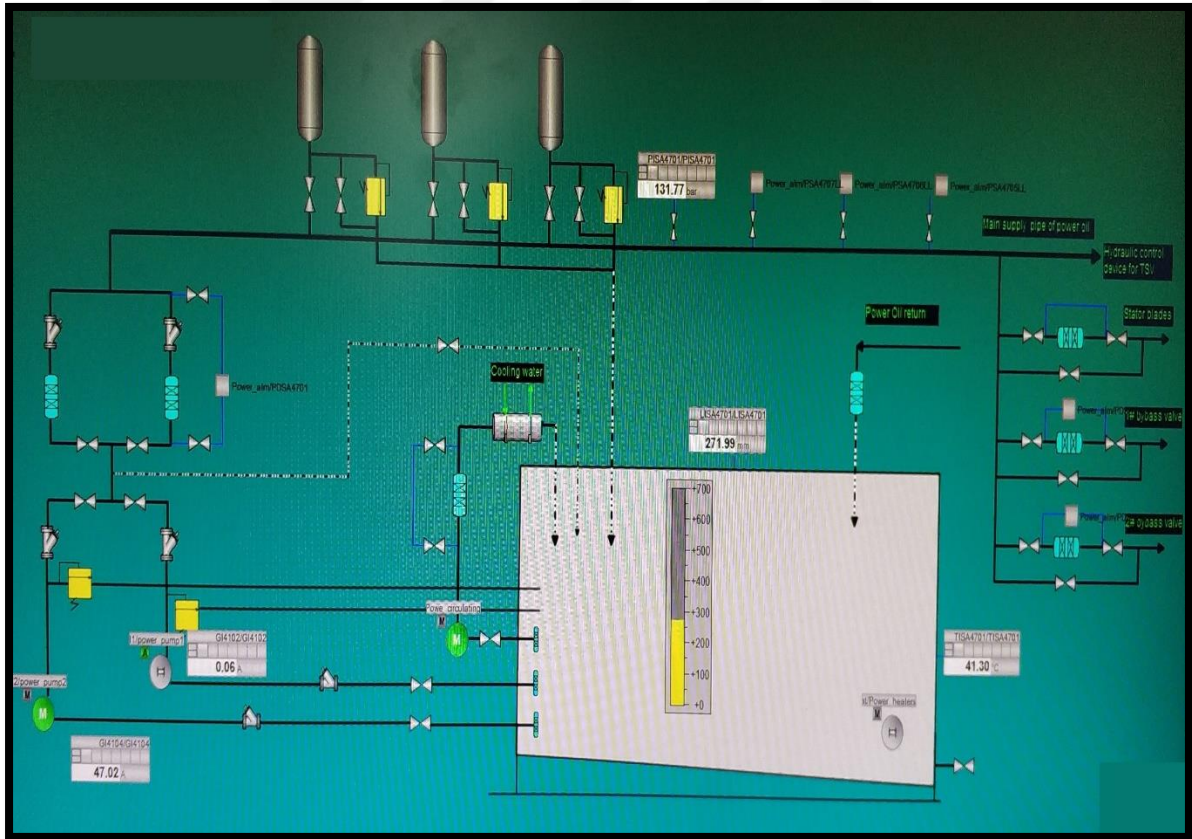
TBT sistemlerinde yağlama yağı türbin ve jeneratör rotor yataklarının yağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek hızda dönen türbinde yağlama sistemi önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle yağ pompalarının çalışma durumu, yedek bir pompanın hazır tutulması, yağ tankı seviyesinin sürekli takibi ve basma hattı basıncının izlenmesi gerekmektedir. Türbin yataklarında dolaşan yağın temiz olması, bu nedenle hat filtrelerinin belirli periyotlarla temizlenmesi veya değiştirilmesi gerekir. Örnek bir TBT’de işletme operatörü yağlama sistemine ait yağ tankı seviyesini, hangi pompanın devrede olduğunu, hat filtrelerinin fark basınç değerlerini, hat basıncını ve yağın sıcaklığını Şekil 2.21’de gösterilen ekrandan takip edebilmektedir. Yağ sistemi parametrelerinde yaşanacak olağandışı bir sapmada TBT sistemi otomatik olarak acil duruşa geçecek şekilde sınır değerler sisteme işlenmiştir. Yağ sisteminde yaşanacak acil bir durumda yağın yataklara ulaştırılmaması riskine karşı türbin kotunun üstünde yüksek bir bölgede acil boşaltma yağ tankı bulunmaktadır. Bu yağ tankı rotor devrinin sıfırlanmasına kadar geçecek sürede yatakların yağlanmasına yetecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.21. Yağlama yağı sistemi takip ekranı

TBT sistemlerinin kritik ünitelerinden birisi de hidrolik güç servo kontrol sistemidir. Türbinin başlıca görevlerinden birisi olan yüksek fırın tepe basıncının ayarlanması stator

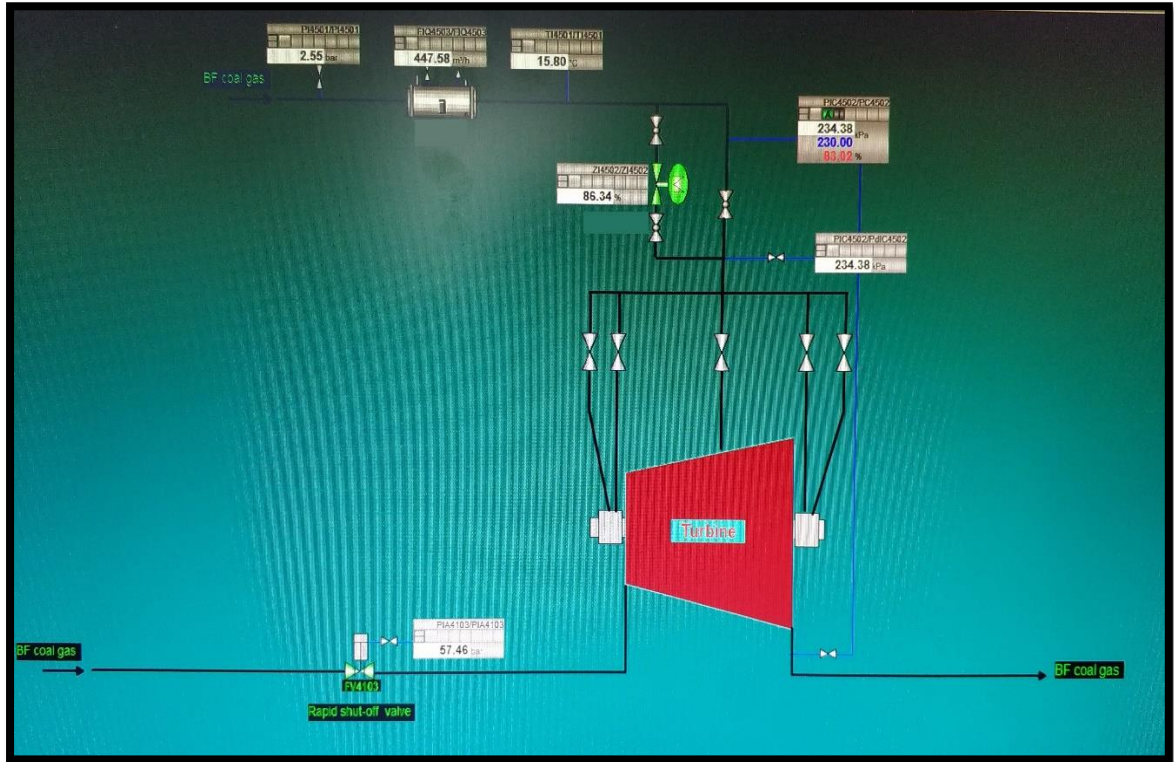
kanatlar ile yapılmakta olup, kanat servo kontrol sistemi hidrolik güç ünitesi tarafından tahrik edilmektedir. Bir diğer kritik ekipman olan ve acil bir durumda türbine gelen yüksek fırın gazını kesen acil stop vanası da hidrolik güç altında açılabilen bir vanadır. Acil stop vanası yay geri dönüşlü bir vana olup, hidrolik basınç ile açılır; hidrolik yağın boşalması ile yayın etkisiyle çok hızlı bir şekilde kapamaya giderek türbini korur. Acil stop vanasının kapatmasına paralel aynı anda bypass vanası açılarak yüksek fırın gazına türbin üzerinden geçmek yerinde alternatif bir yol açılır. Burada bahsedilen bypass vanası da hidrolik etki altında kapalı olan, hidrolik yağın boşalması ile hızlı bir şekilde açmaya giden bir vanadır. TBT için böylesine kritik görevleri olan bir ünite olan hidrolik güç ünitesi Şekil 2.22’de gösterilen örnek bir takip ekranı ile izlenmektedir. Bu ekran üzerinde ilgili operatör yağ tankı seviyesini, çalışan pompanın durumunu, hat filtrelerinin fark basınçlarını, akümülatörleri, hat basıncını ve yağ sıcaklığını takip edebilmektedir. Sistem parametrelerinin olağan dışı değerlere sapması ile TBT sistemi acil duruşa geçecek şekilde limit değerler belirlenmiştir.



Şekil 2.22. Hidrolik güç sistemi takip ekranı

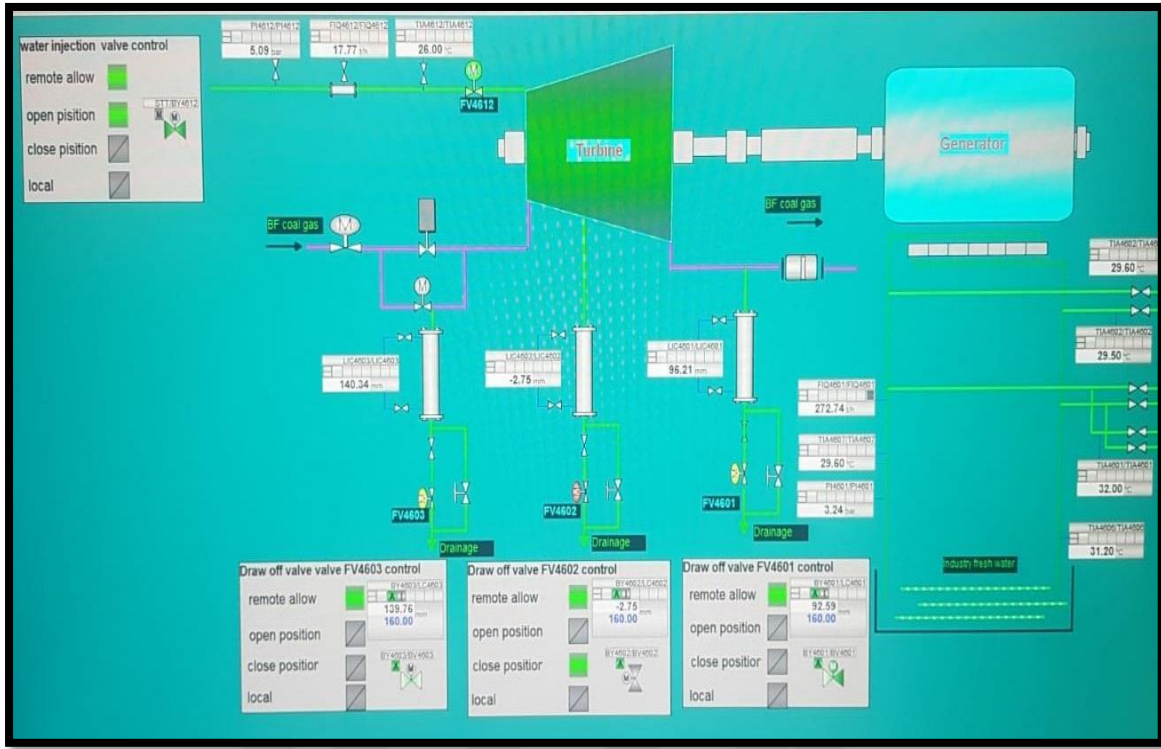
TBT sisteminde iç ortam ile dış ortamın birbirinden izole edilmesi gerekir. İç ortamda bulunan basınçlı gaz mil ile gövde arasından sızarak dış ortama çıkabilir. Bu sızımayı

engellemek adına türbin rotorunun her iki tarafında labirent yatak adı verilen ince kanallar bulunur. Kanalların bir tarafı iç ortamdan gelen yüksek fırın gazı basıncı, diğer tarafı da dış ortam havası basıncı etkisi altındadır. İç ortamdaki gazın dış ortam basıncını yenerek dışarı çıkması olağandır. Hem gaz kaybını önlemek, hem de toksik yayılımı engellemek adına iç ortamdaki gaz basıncını yenecek şekilde dış ortamdan labirent kanala basınçlı azot verilir. Azot burada sızdırmazlık görevi görür. Azot basıncının ve debisinin takibi Şekil 2.23'te gösterilen örnek bir takip ekranı üzerinden yapılır.



Şekil 2.23. Azot sızdırmazlık sistemi takip ekranı

TBT gaz ile birlikte taşınan toz ve nemin etkisi altındadır. Gazla birlikte gelen toz büyük oranda stator kanatlar üzerine yapışır. Bu durum zamanla stator kanatların hareketini kısıtlayarak işlevini tam olarak yerine getirmesine engel olur. Bu sebeple stator kanatlar önünde su püskürtme nozulları bulunur. Kanat yıkama adı verilen su hattı ile stator kanatlar sürekli olarak yıkanır. TBT sisteminde su ayrıca hidrolik güç ünitesi ve yağlama yağı ünitesinden soğutma amacıyla eşanjörlerde kullanılır. Türbin içine kanat yıkama amacıyla püskürtülen su ile yoğuşarak oluşan kondens suyu drenajlar ile türbinden uzaklaştırılır. Şekil 2.24'de örnek bir su sistemi takip ekranı görülmektedir.



Şekil 2.24. Soğutma suyu ve drenaj sistemi takip ekranı

2.2. Metot

2.2.1. TBT üretimini etkileyen parametrelerin analizi

TBT enerji üretim miktarı saatlik, günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak kayıt altına alınmaktadır. TBT'nin çalışma süresi ve üretim performansı doğrudan yüksek fırınla ilişkilidir. Çünkü TBT işletme parametreleri yüksek fırın işletme şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple TBT üretim değerleri saatlik, günlük, haftalık ve aylık bazda değişkenlik gösterebilir. Üretim değerlerinin çok farklı olduğu zamanlarda TBT işletme parametreleri detaylı olarak incelenmelidir. Çizelge 2.1'de belirtilen parametrelerin her biri TBT üretimi üzerinde aynı ağırlığa sahip değildir. TBT sisteminde takip edilen parametrelerin TBT üretimi ile aralarındaki bağımlılık ilişkileri (korelasyon) kontrol edilmiştir. Korelasyon, iki parametre arasındaki lineer ilişkiyi veya bir parametrenin iki ya da daha fazla parametre ile olan ilişkisini değerlendirmek, eğer varsa bu ilişkinin derecesini ölçmek için kullanılan istatistiksel bir metottur. Analizi yapabilmek için, her iki parametrenin de sürekli olması ve normal dağılım göstermesi gerekir. Pozitif bir ilişkinin olması, her iki parametre arasında doğru orantılı bir artış olduğunu, ya da ilk parametrenin değerlerinin düşmesi durumunda ikinci parametreye ait değerlerin de düşme eğiliminde olduğunu gösterir. Negatif ilişki ise olması değişkenlerin birine ait değerlerin

artması veya azalması durumunda diğer değişkene ait değerlerin tam tersi yönde değişmesi demektir. Korelasyon katsayısının sıfır veya sıfıra çok yakın olması parametreler arasında lineer bir ilişkinin söz konusu olmadığını gösterir (Alkan ve Ilgın, 2018). Pearson Korelasyon Katsayısı (r) ile parametrelerinin aralarındaki ilişkinin gücü tespit edilmiştir. “r” ile gösterilen bu katsayı iki sürekli değişken arasındaki lineer ilişkinin belirlenmesinde kullanılır. Pearson Korelasyon Katsayısının hesaplanmasında en çok kullanılan formüllerden birisi Eşitlik 2.1 ile gösterilmiştir.

$$r_{x,y} = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{[n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][n\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}} \quad (2.1)$$

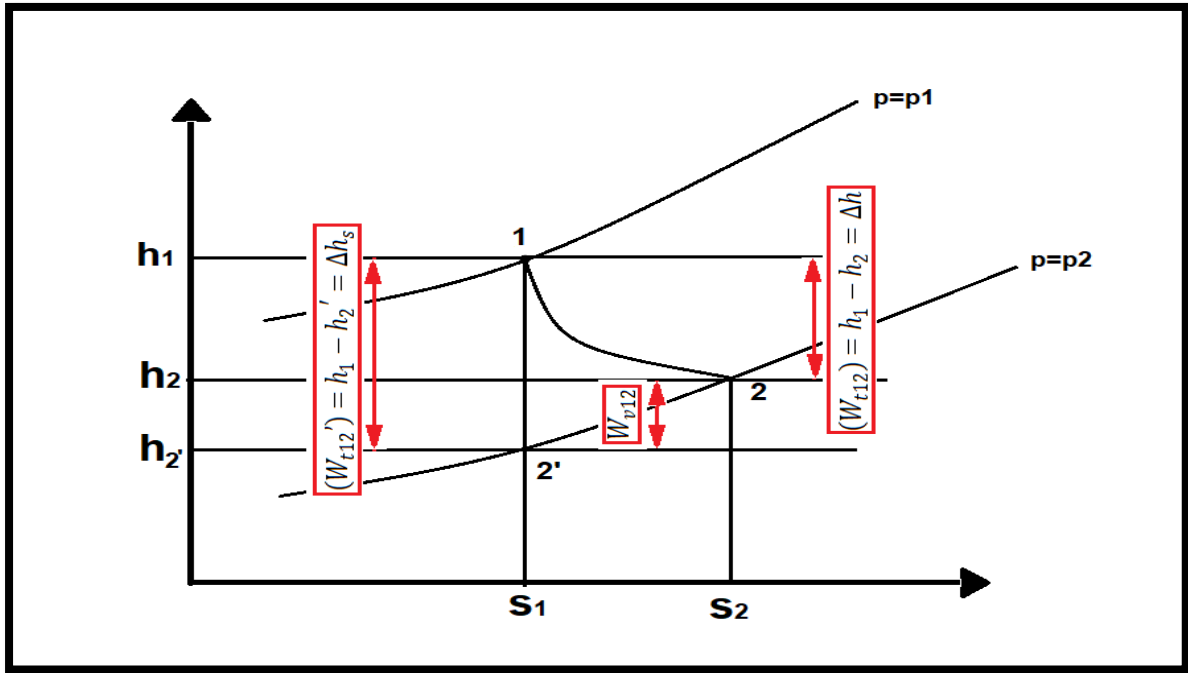
İlişkinin gücü değerlendirmesi Çizelge 2.4’e göre yapılmıştır. Korelasyon katsayısı belirlendikten sonra ilişki gücü hakkında bir değerlendirme yapmak mümkün olacaktır.

Çizelge 2.4. Pearson korelasyon katsayısına göre ilişki gücünün tespiti

No	Parametreler	Değerlendirme
1	$0,8 \leq r \leq 1$	Güçlü pozitif ilişki
2	$-1 \leq r \leq -0,8$	Güçlü negatif ilişki
3	$-0,2 \leq r \leq 0,2$	İlişki yok
4	$-0,8 \leq r \leq -0,2$	Orta güçlükte negatif ilişki
5	$0,2 \leq r \leq 0,8$	Orta güçlükte pozitif ilişki

2.2.2. TBT performans hesaplamaları

Türbin içerisinde, akışkan geçerken mil üzerine yerleştirilmiş kanatçıklara karşı iş yapmaktadır. Böylece mil dönmek suretiyle türbin iş yapar. Türbinde iş, akışkan tarafından yapıldığından pozitifdir. Normal çalışma sırasında makineler ile çevre arasında ısı geçişi olsa da, sürekli akış makinelerinin adyabatik çalışma koşullarına yakın çalıştığı kabul edilebilir. Bu nedenle türbinler için model hal değişimi adyabatik kabul edilmiştir. Türbindeki adyabatik genişleme Şekil 2.25’de görülmektedir. Burada; Tersinir İzentropik Genişleme: 1-2’ ve Tersinmez Adyabatik Genişleme: 1-2 ’dir.



Şekil 2.25. Türbindeki adyabatik genişleme

TBT sisteminde;

İdeal tersinir izentropik genişlemenin meydana geldiği durumdaki elde edilebilecek maksimum iş (kJ/kg);

$$(W_{t12}') = h_1 - h_2' = \Delta h_s \quad (2.2)$$

Tersinmez adyabatik genişleme şartlarındaki elde edilebilecek iş (kJ/kg);

$$(W_{t12}) = h_1 - h_2 = \Delta h \quad (2.3)$$

İzentropik genişlemeye göre açığa çıkan iş kaybı (kJ/kg);

$$W_{v12} = (W_{t12}') - W_{t12} = h_2 - h_2' \quad (2.4)$$

İzentropik türbin verimi;

$$\eta_{ST} = \frac{W_{t12}}{(W_{t12}')} = \frac{W_{t12}}{W_{t12} + W_{v12}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2')} = \Delta h / \Delta h_s \quad (2.5)$$

İzentropik türbin gücü (kW);

$$P_{12} = \dot{m}(W_{t12}') \cdot \eta_{ST} = \dot{m}W_{t12} \quad (2.6)$$

Şaft üzerindeki türbin gücü (kW);

$$P_{w12} = \dot{m} W_{t12} \eta_T = P_{12} \eta_T \quad (2.7)$$

Jeneratör terminal gücü (kW);

$$P_{G12} = P_{w12}\eta_G = mW_{t12}\eta_T\eta_G \quad (2.8)$$

Eğer türbinden geçen gaz sabit özgül ısıya sahip ideal bir gaz olarak modellenilebilirse, izentropik iş:

$$W_{izentropik} = (W_{t12}) = [(kRT_1)/(k - 1)] \times [1 - (P_2/P_1)^{(k-1)/k}] \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9'un birlikte çözümü sonucunda TBT çıkış gücü:

$$P = \frac{(kRT_1)}{(k-1)} \times \left(1 - \frac{(P_2/P_1)^{(k-1)}}{k}\right) m\eta_T\eta_G \quad (2.10)$$

ile hesaplanabilir (Kanoğlu, Çengel, ve Dinçer, 2012).

Burada (W_{t12}), ideal tersinir izentropik genişlemenin (1-2') meydana geldiği durumdaki elde edilebilecek maksimum iş (kJ/kg), W_{t12} , tersinmez adyabatik genişleme şartlarındaki elde edilebilecek iş (kJ/kg), W_{v12} , izentropik genişlemeye göre açığa çıkan iş kaybı(kJ/kg), Δh_s , tersinir genişlemedeki izentropik entalpi eğrisi (kJ/kg), Δh , tersinmez genişlemedeki izentropik entalpi eğrisi (kJ/kg), η_{sT} , izentropik türbin verimi, η_m , yatak sürtünme mekanik verimi, η_G : Jeneratör verimi, m , kütleli gaz debisi (kg/s), P_{12} , izentropik türbin gücü (kW), P_{w12} , shaft üzerindeki türbin gücü(kW), P_{G12} , jeneratör terminal gücü (kW) olarak ifade edilmiştir.

R evrensel gaz sabitidir ve 1 kmol ideal gazın, sabit basınçta ve 1 K sıcaklık değişimi sırasında yaptığı işdir. Isı kapasitesi katsayısı (k), sabit basınçtaki ısı kapasitesinin sabit hacimdeki ısı kapasitesine oranıdır.

$$k = C_p / C_v \quad (2.11)$$

P ile MW cinsinden türbin çıkış gücünü, T_1 , Kelvin cinsinden TBT giriş gaz sıcaklığını ifade etmektedir. Yanı sıra P_1 , TBT giriş gaz basıncını, P_2 , TBT çıkış gaz basıncını (kPa) (Buradaki basınç değerleri mutlak basınçtır), ve m : Kütleli gaz debisini (kg/s). (Hacimsel gaz debisi ve YFG yoğunluğunun çarpımı sonucunda bulunur) ifade etmektedir. Bu çalışmada Yüksek Fırın Gazı Yoğunluğu: 1,27 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Örnek TBT sisteminde $\eta_T \cdot \eta_G$ çarpımı 0,86 olarak belirlenmiştir. $\eta_T \cdot \eta_G$ ise türbin verimi ile jeneratör veriminin çarpımıdır.

2.2.3. Çoklu lineer regresyon (ÇLR)

Çoklu lineer regresyon modeli basit lineer regresyon modelinden farklı olarak birden fazla bağımsız değişkenin dikkate alınarak bağımlı değişkenin hesaplandığı regresyon modelidir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j + \varepsilon \quad (2.12)$$

Denklemden Y , X' e bağlı değişkeni gösterirken β_0 doğrunun y-eksenini kestiği yeri, β_1 regresyon katsayısını (doğrunun eğimi), β_j j ' nci parametreyi ifade ederken ε ise şansa bağlı hata değerini ifade etmektedir. β_0 ve β_{1-j} değerleri veri setinin tamamı kullanılarak hesaplanan teorik değerlerdir. Bağımlı değişken Y 'nin X' e bağlı regresyon modeli yardımı ile hesaplanan başarısı çeşitli performans ölçütleri ile değerlendirilebilir.

Bu çalışmada kullanılan ÇLR modeli için optimizasyon metodu olarak Kademeli regresyon (Stepwise Regression) kullanılmıştır. Bu süreçte modeldeki terimlerin yararlı bir alt kümesini belirlemek amacıyla modele terimleri kaldırılır ve/veya eklenir. Prosedüre göre varsayılan olarak boş bir model ile başlanır ve ardından her adım için bir terim eklenir veya çıkarılır (Minitab® 18 Support).

2.2.4. Hata değerlendirme kriterleri

TBT'ye ait gerçek üretim değerleri ve model tahminlerinin karşılaştırılabilmesi için Belirlilik Katsayısı (R^2), Ortalama Karesel hata (MSE), ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) kriterleri kullanılmıştır (Aksu, 2016). Bu kriterler kullanılarak yapılacak analizler sonucunda gerçek üretim değerleri ile modeller ile yapılan tahminlerin performansları sayısal olarak karşılaştırılabilecek, anlamlı yorumlar yapılabilecektir. Belirlilik katsayısı yüksek, ortalama karesel hatası ve ortalama mutlak karesel hatası düşük olan modelin tahmin gücü daha yüksektir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (2.13)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (2.14)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100 \quad (2.15)$$

Burada x_i , gözlenen değer, y_i , tahmin edilen değer \bar{x}_i , gözlenen değerlerin ortalaması ve N ise gözlem sayısıdır.

2.2.5. Karbon salınımının hesaplanması

Bir tesisin elektrik tüketimine bağlı karbon salınım miktarı, o tesisin tükettiği elektriğin salınım faktörü ile çarpılması sonucunda hesaplanır. Türkiye için karbon salınım faktörü, Çizelge 2.5’te belirtilen değer esas alınarak seçilmiştir. Buna göre elektrik tüketimi için emisyon faktörü (EF) 0.6 kg CO₂e/kWh’dir (Dulkadiroğlu, 2018; Mutlu, Özgür ve Bekaroğlu, 2018). Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) çalışmaları esas alındığında karbon salınım miktarı, Eşitlik 2.16’a göre hesaplanabilir.

$$\text{Karbon Salınımı (kgCO}_2\text{)} = \text{Tüketilen Elektrik(kWh)} \times \text{EF} \quad (2.16)$$

Çizelge 2.5. Karbon emisyon faktörleri

No	Emisyon Kaynağı	Birim	EF
1	Birincil Ham Hadde	kg CO ₂ e/ton	3328,4
2	İkincil Ham Madde	kg CO ₂ e/ton	1541,2
3	Endüstriyel Atık	kg CO ₂ e/ton	60
4	Elektrik Tüketimi	kg CO ₂ e/kWh	0,6
5	Doğalgaz Tüketimi	kg CO ₂ e/m ³	2,09672
6	Motorin	kg CO ₂ e/ton	3190,29
7	Personel Aracı-Dizel	kg CO ₂ e/km	0,17887
8	Servis Aracı-Dizel	kg CO ₂ e/km	0,67219
9	Atık Kamyonu-Dizel	kg CO ₂ e/km	1,07844

Emisyon faktörü birimi olarak verilen “kgCO₂e” emisyon kaynağının oluşturduğu farklı sera gazlarının CO₂ eşdeğerinin alınarak hesaba dahil edildiğini göstermektedir. Bu sayede her gaz için ayrıca hesap yapmaya gerek kalmamıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yüksek fırınlara yakma havası sağlayan türbin tahrikli kompresörlere turbo körük adı verilir. Turbo körükler, kok kömürünün yanması ve PCI (toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonu) için gereken oksijeni sağlamakla kalmaz, proses gereği yüksek fırın iç basıncının oluşturulmasında da önemli göreve sahiptir (Liu, 2008). Turbo körüklerde tüketilen enerjinin %25-%30 kadarı geri kazanılabilir. Bir ton sıvı ham demir (SHD) üretimi için 150 kWh/ton enerji gereksinimi vardır. Çalışma yapılan 2500 m³ hacimli yüksek fırının günlük SHD üretimi 6600 Ton/gün olduğuna göre enerji ihtiyacı:

$$150 \text{ kWh/ton} \times 6600 \text{ Ton/gün} = 990000 \text{ kWh/gün} = 990 \text{ MWh/gün}$$

TBT sisteminin kurulmasıyla birlikte turbo körüklerde günlük tüketilen 990 MWh enerjinin yüzdesel olarak ne kadarının geri kazanımının yapılabildiği incelenmiştir.

Yüksek fırının sürekli koşullarda çalıştığı durumlara göre ortalama güç üretimi, türbin giriş basıncı, türbin giriş gaz sıcaklığı ve yüksek fırın gazı debisi aşağıda verilmiştir:

Çizelge 3.1. Yüksek fırın-TBT sistemi verileri ortalama değerler tablosu

No	Parametreler	Birim	Gözlem Değeri
1	Gaz Debisi	m ³ /saat	395000
2	TBT Giriş Basıncı	kPa	297
3	TBT Giriş Sıcaklığı	K	325,5
4	TBT Güç Üretimi	MW/saat	10,52

Bu veriler ışığında TBT ile günlük geri kazanımı yapılabilecek enerji miktarı:

$$10,52 \text{ MWh/saat.gün} \times 24 \text{ saat} = 252,48 \text{ MWh/gün}$$

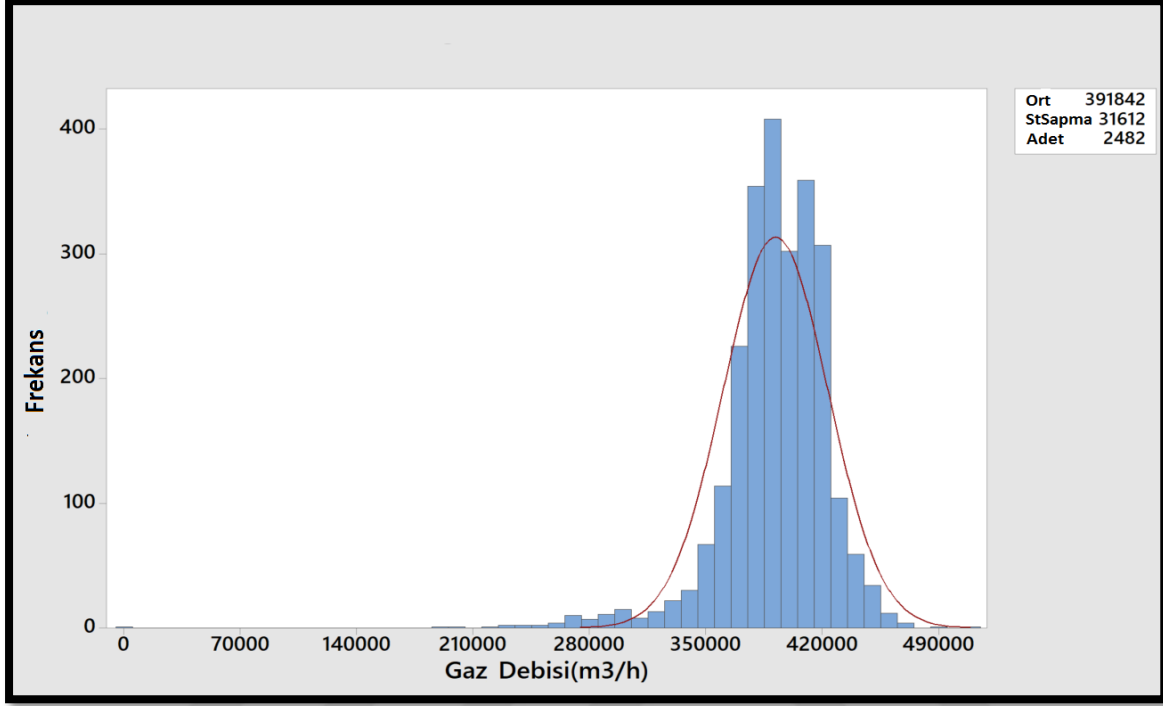
Türbinin mevcut üretim kapasitesiyle yüksek fırınlarda harcanan enerjinin geri kazanım yüzdesi:

$$(252,48 \text{ MWh} / 990 \text{ MWh}) \times 100 \approx \%26$$

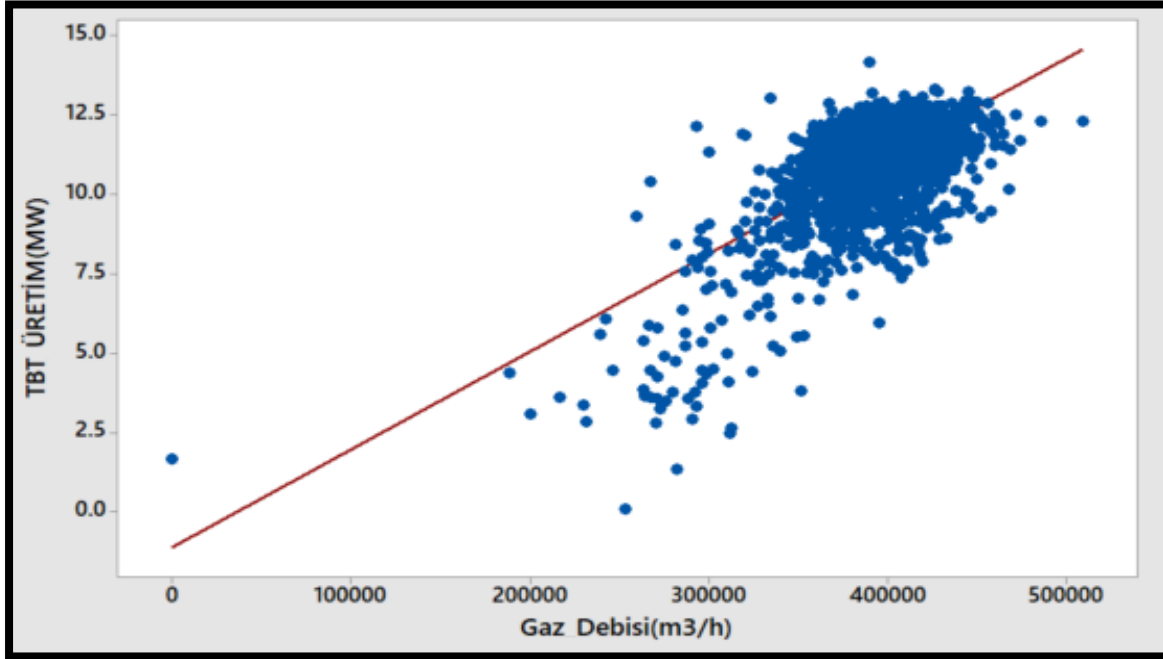
Yapılan hesap sonucunda YF'ye yakma havası sağlayan turbo körüklerde tüketilen enerjinin yaklaşık %26'sının geri kazanımının yapılabildiği belirlenmiştir.

3.1. Gaz Debisi – TBT Üretim İlişkisi

Örnek TBT üzerinden alınan gaz debisi verilerine ait histogram ve istatistiksel veriler Şekil 3.1’de, Gaz Debisi-TBT Üretimi Korelasyonu Şekil 3.2’te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gaz debisi verisi histogramı

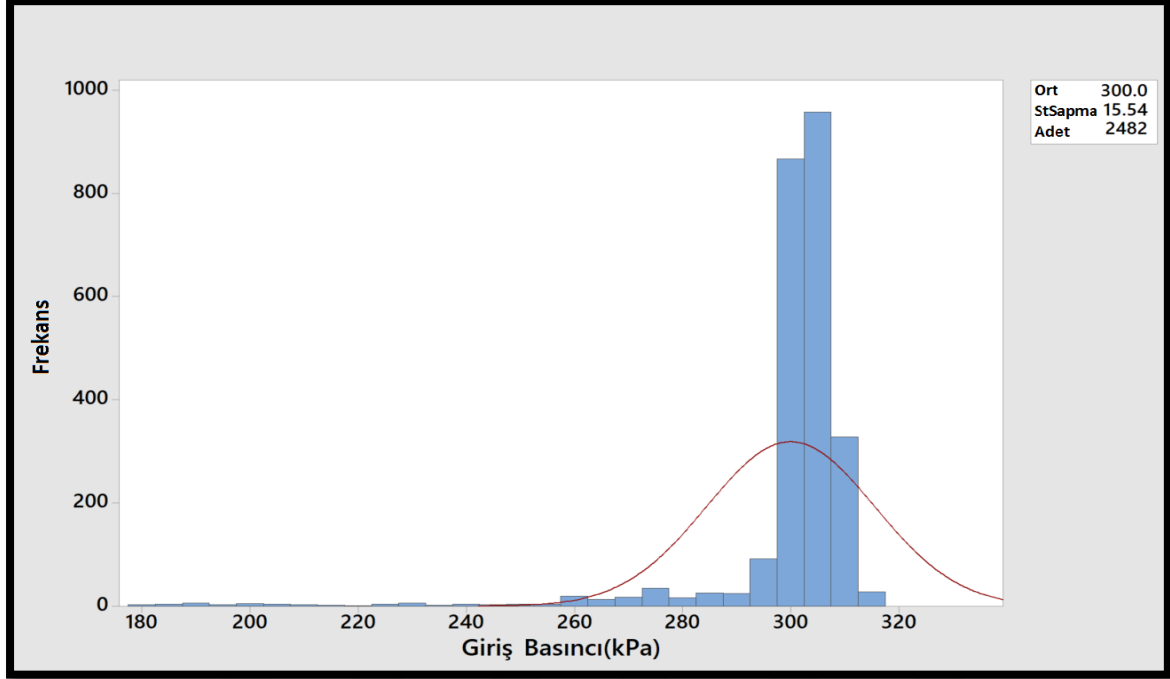


Şekil 3.2. Gaz debisi – TBT üretimi arasındaki korelasyon

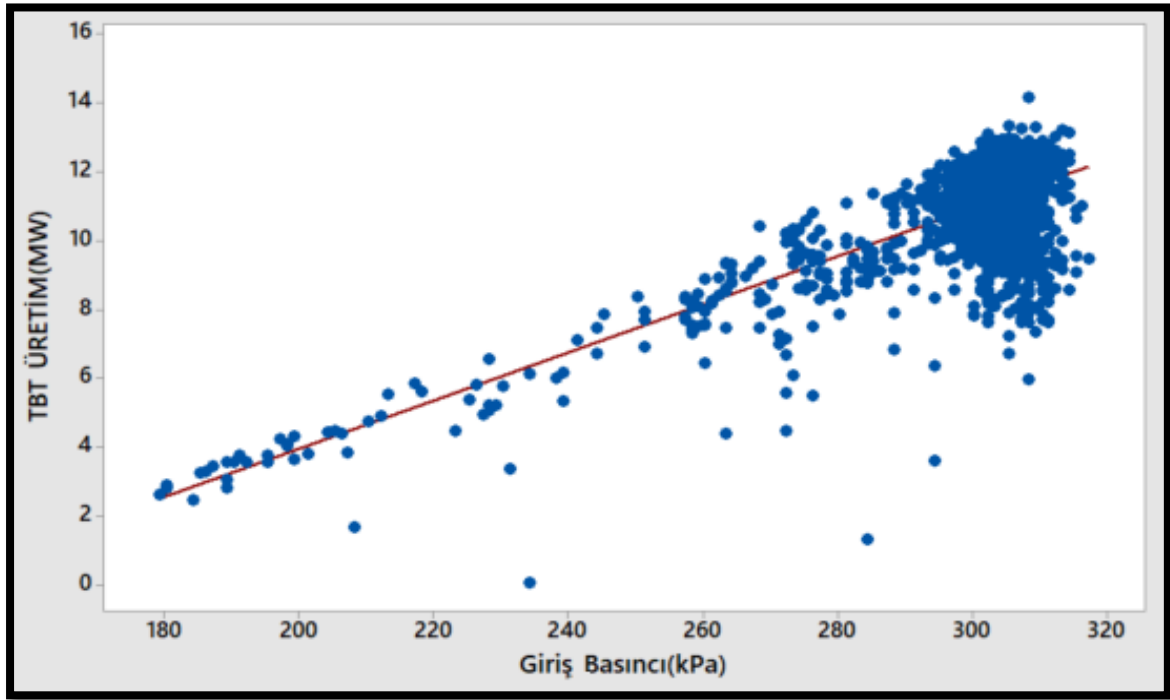
Pearson korelasyon katsayısı (r) 0.641 olarak hesaplanmıştır. Gaz Debisi ve TBT Üretimi arasındaki ilişki orta güçte pozitif ilişkidir.

3.2. Giriş Gaz Basıncı – TBT Üretim İlişkisi

Örnek TBT üzerinden alınan giriş basıncı verilerine ait histogram ve istatistiksel veriler Şekil 3.3’de, Gaz Basıncı-TBT Üretimi Korelasyonu Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Giriş gaz basıncı verisi histogramı

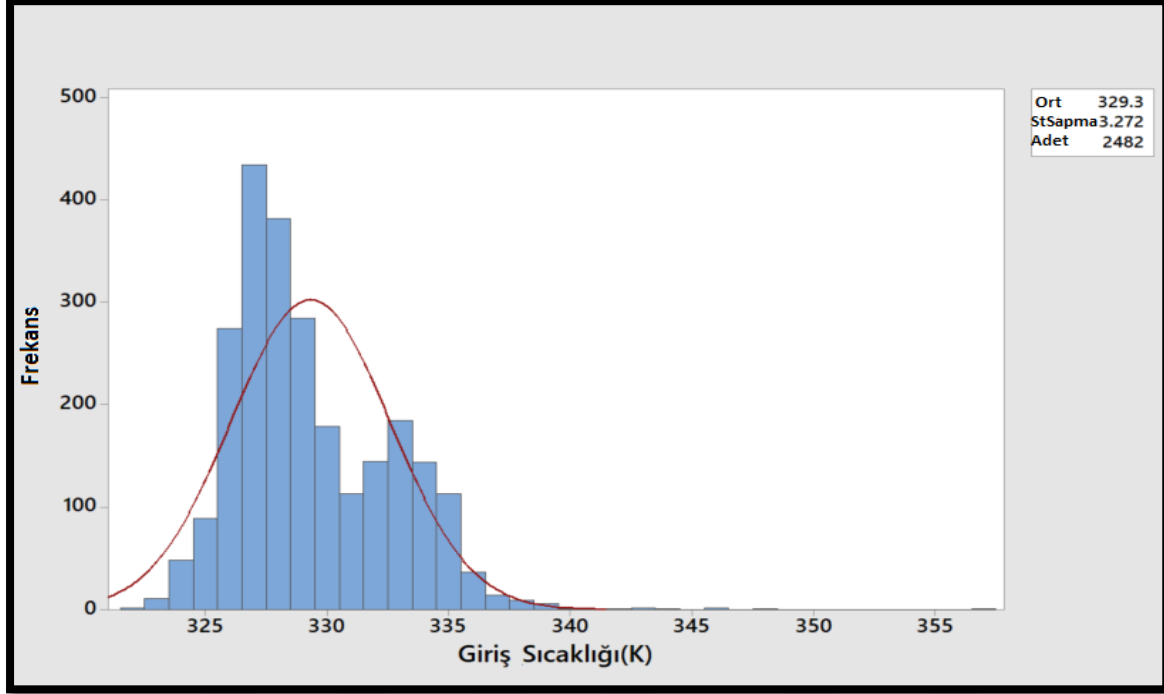


Şekil 3.4. Gaz debisi – TBT üretimi arasındaki korelasyon

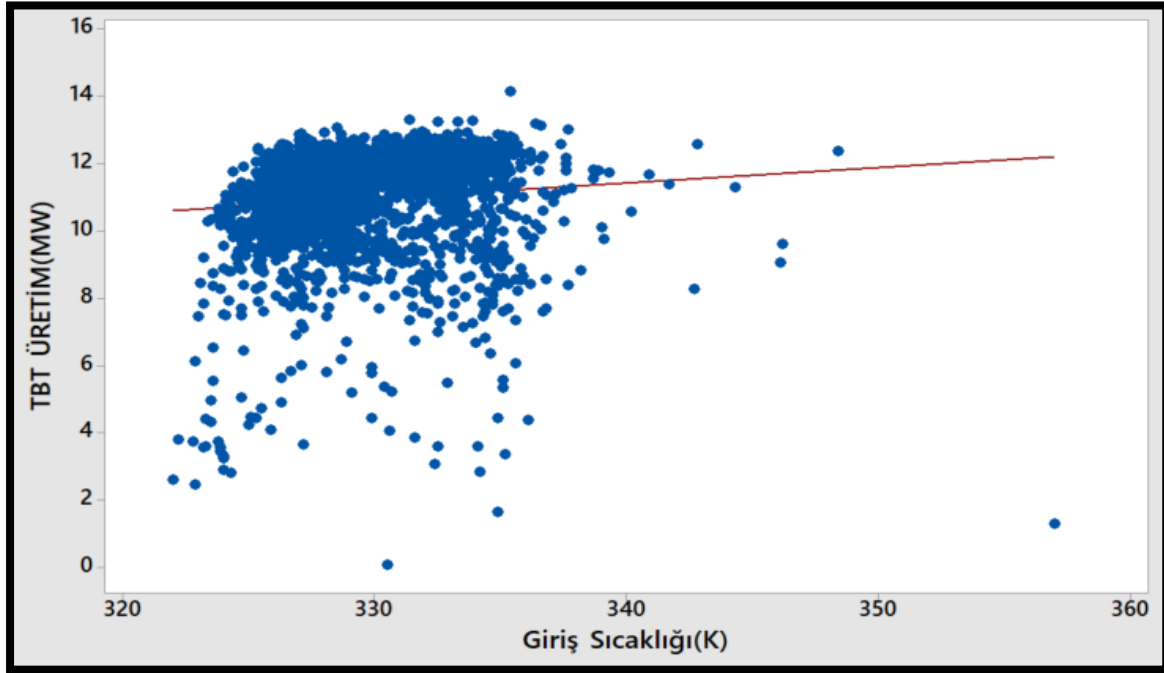
Pearson korelasyon katsayısı (r) 0,714 olarak hesaplanmıştır. Gaz Basıncı ve TBT Üretimi arasındaki ilişki orta güçte pozitif ilişkidir.

3.3. Giriş Gaz Sıcaklığı – TBT Üretim İlişkisi

Örnek TBT üzerinden alınan giriş gaz sıcaklığı verilerine ait histogram ve istatistiksel veriler Şekil 3.5’de, Giriş Sıcaklığı-TBT Üretimi Korelasyonu Şekil 3.6’te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Giriş gaz sıcaklığı verisi histogramı

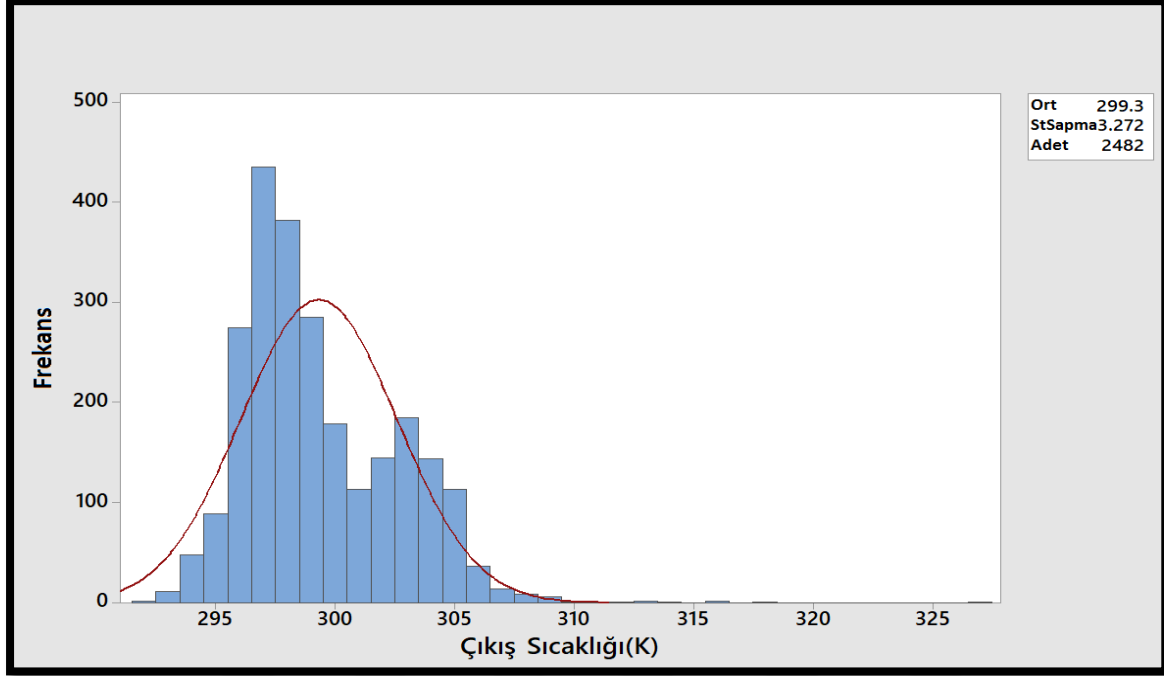


Şekil 3.6. Giriş sıcaklığı – TBT üretimi arasındaki korelasyon

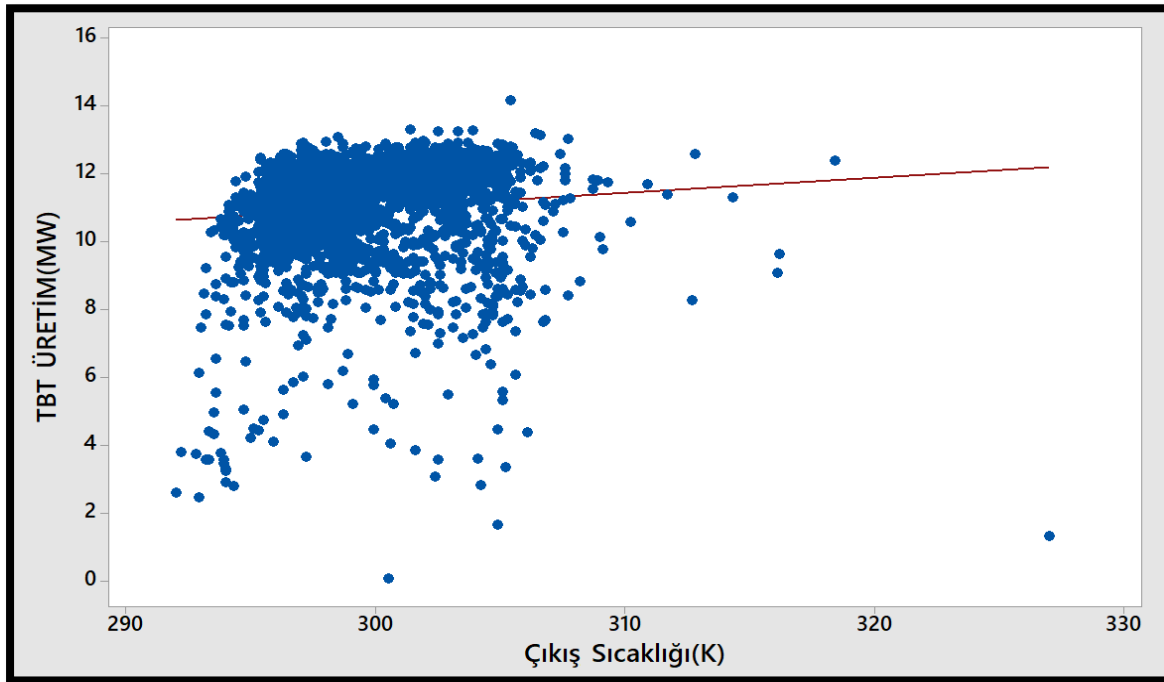
Pearson korelasyon katsayısı (r) 0,097 olarak hesaplanmıştır. Giriş Gaz Sıcaklığı ve TBT Üretimi arasındaki ilişki zayıftır.

3.4. Çıkış Gaz Sıcaklığı – TBT Üretim İlişkisi

Örnek TBT üzerinden alınan çıkış gaz sıcaklığı verilerine ait histogram ve istatistiksel veriler Şekil 3.7’de, Çıkış Sıcaklığı-TBT Üretimi Korelasyonu Şekil 3.8’te gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Çıkış gaz sıcaklığı verisi histogramı



Şekil 3.8. Çıkış gaz sıcaklığı – TBT üretimi arasındaki korelasyon

Pearson korelasyon katsayısı (r) 0,097 olarak hesaplanmıştır. Çıkış Gaz Sıcaklığı ve TBT Üretimi arasındaki ilişki zayıftır.

3.5. Çıkış Gaz Basıncı – TBT Üretimi İlişkisi

TBT çıkış gaz basıncı yüksek fırın gazı ana şebeke basıncını kontrol eden gazometre etkisi altındadır. TBT çıkışında gaz basıncı, dizayn değeri olan 108 kPa civarında ölçülmüştür. Yüksek fırın işletme parametrelerine bağlı bir değişken değildir. Bu sebeple TBT üretimi ile çıkış gaz basıncı arasında bir ilişki testi yapılmamıştır.

TBT başlıca işletme parametrelerinin değiştirilmesiyle TBT üretiminin nasıl değişeceği incelenmiştir.

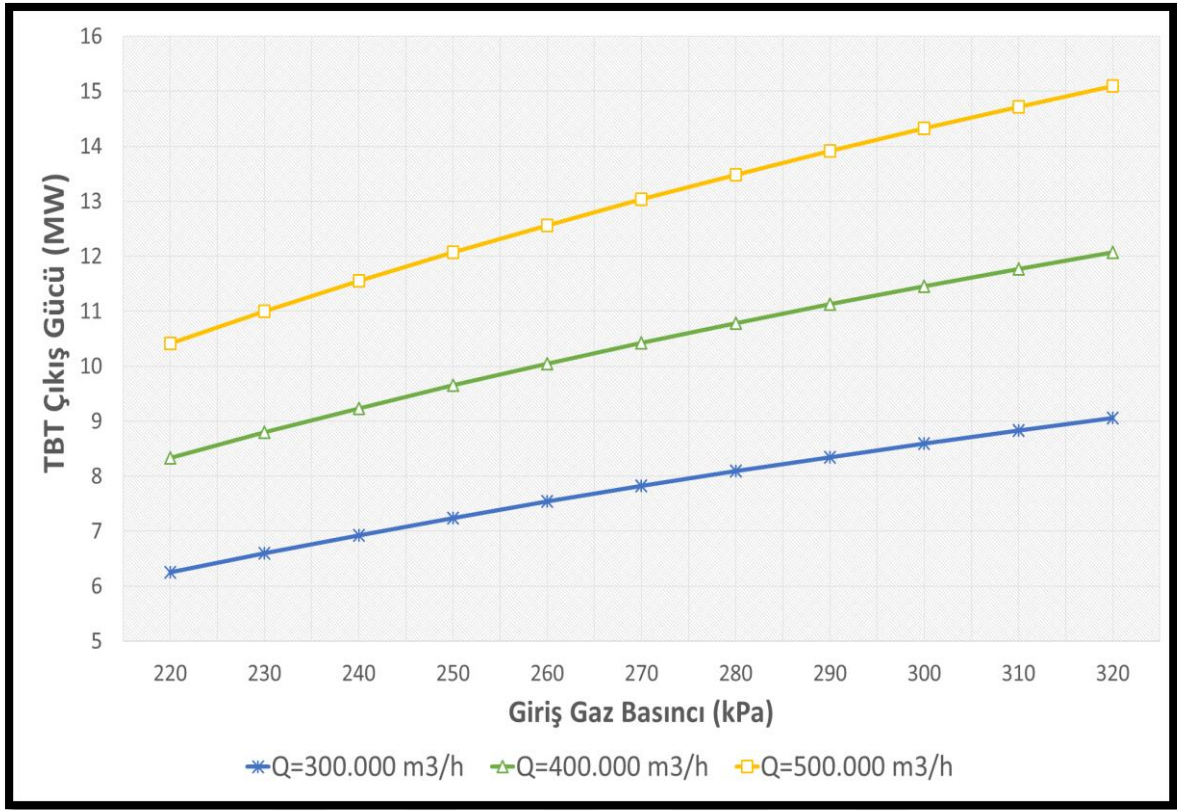
3.6. Farklı Gaz Debilerine Göre TBT Güç Üretimi

Yüksek fırın gazı debisinin 300000 m³/saat, 400000 m³/saat ve 500000 m³/saat olduğu durumlara göre Giriş Basıncı-Elektrik Üretimi, Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi, Çıkış Basıncı-Elektrik Üretimi bu bölümde grafiklerle verilmiştir.

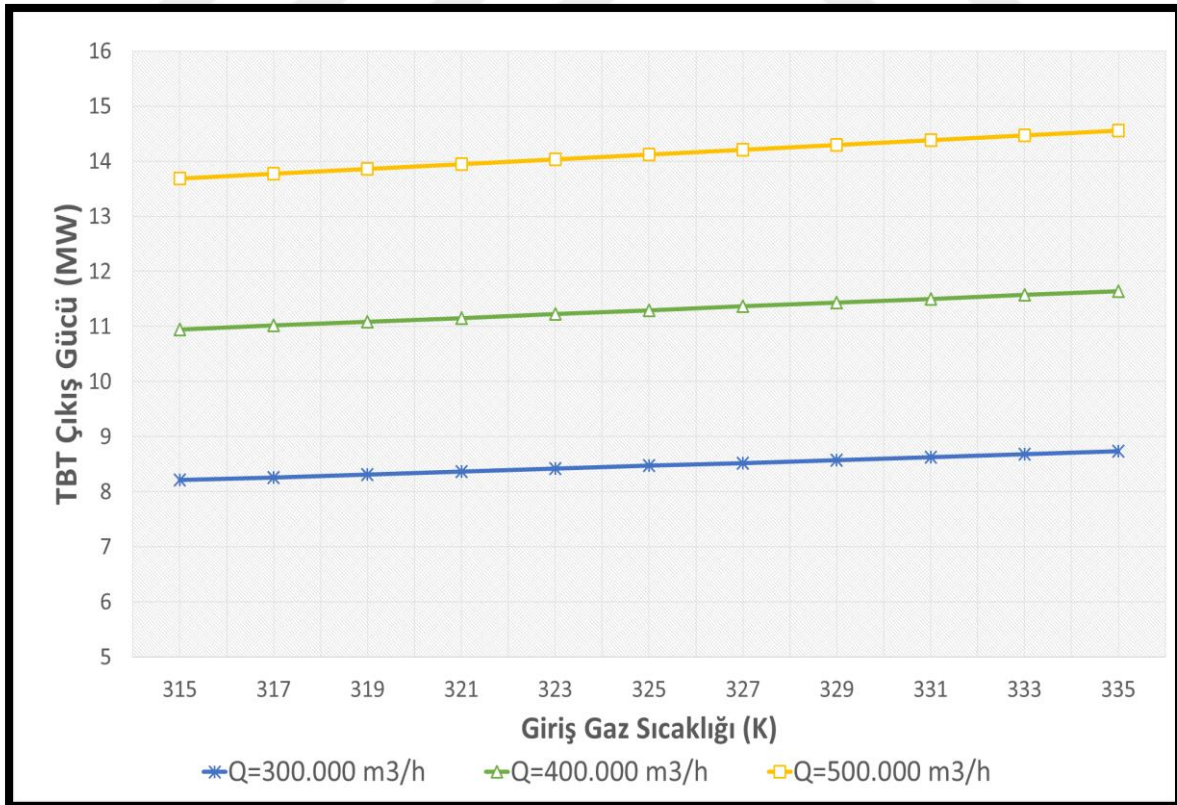
Üç farklı gaz debisi değerinde giriş basıncı kademeli olarak bir önceki değere göre 10 kPa artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.9'da incelenmiştir. Giriş gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin arttığı gözlemlenmektedir. Giriş gaz basıncıyla TBT üretiminin doğru orantılı artışı artan gaz debilerinde de aynı şekilde kendini göstermektedir. Gaz debisinin 100000 m³/saat artışı aynı gaz basıncına göre 2,6 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır.

Üç farklı gaz debisi değerinde giriş gaz sıcaklığının kademeli olarak bir önceki değere göre 2 K artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.10'da incelenmiştir. Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminin az miktarda arttığı gözlemlenmektedir. 20K'lık gaz sıcaklığı artışının 0,6-0,7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı gaz sıcaklığında gaz debisinin 100000 m³/saat artışı aynı gaz basıncına göre 2,9 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır. Burada 14,55 MW ile en yüksek üretim değeri gözlenmiştir.

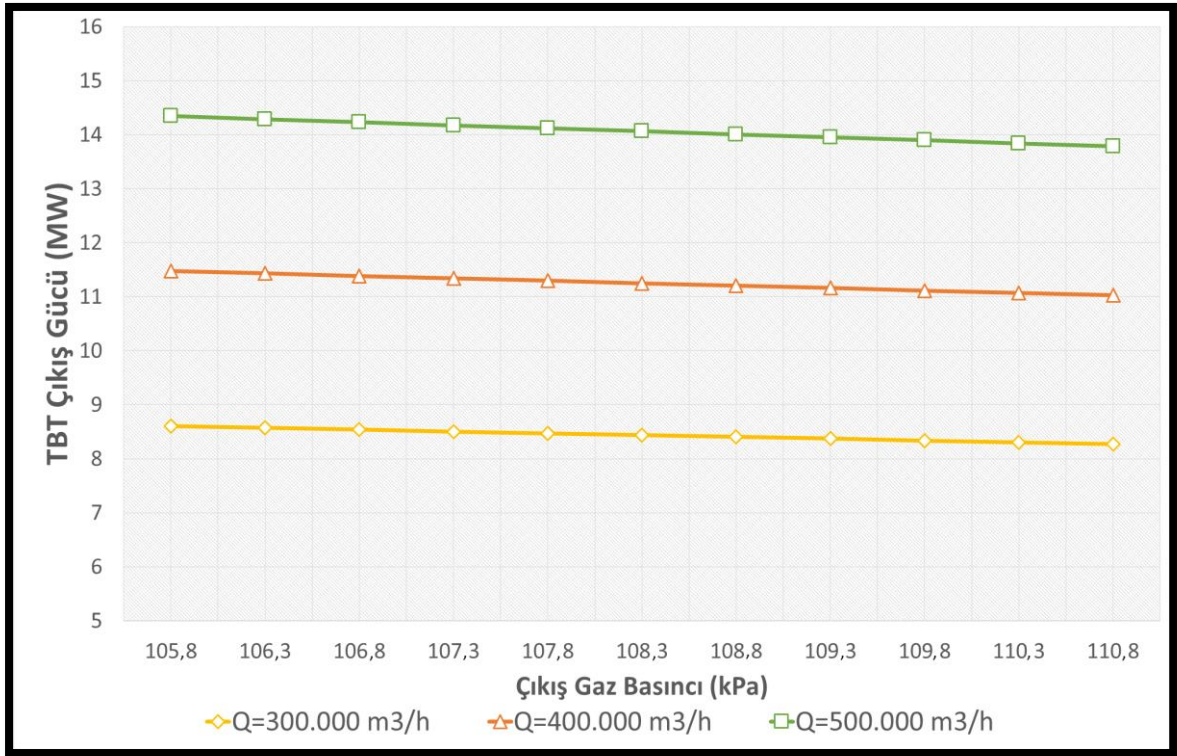
Üç farklı gaz debisi değerinde çıkış basıncı değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 0,5 kPa azaltılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.11'de incelenmiştir. Çıkış gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin azaldığı, aralarında ters orantı olduğu gözlemlenmektedir. Aynı türbin çıkış basıncında, gaz debisinin 100000 m³/saat artışı 2,8 MW daha fazla güç üretimine neden olduğu görülmektedir.



Şekil 3.9. Farklı gaz debilerine göre giriş basıncı-TBT çıkış gücü grafiği



Şekil 3.10. Farklı gaz debilerine göre giriş gaz sıcaklığı- TBT çıkış gücü grafiği



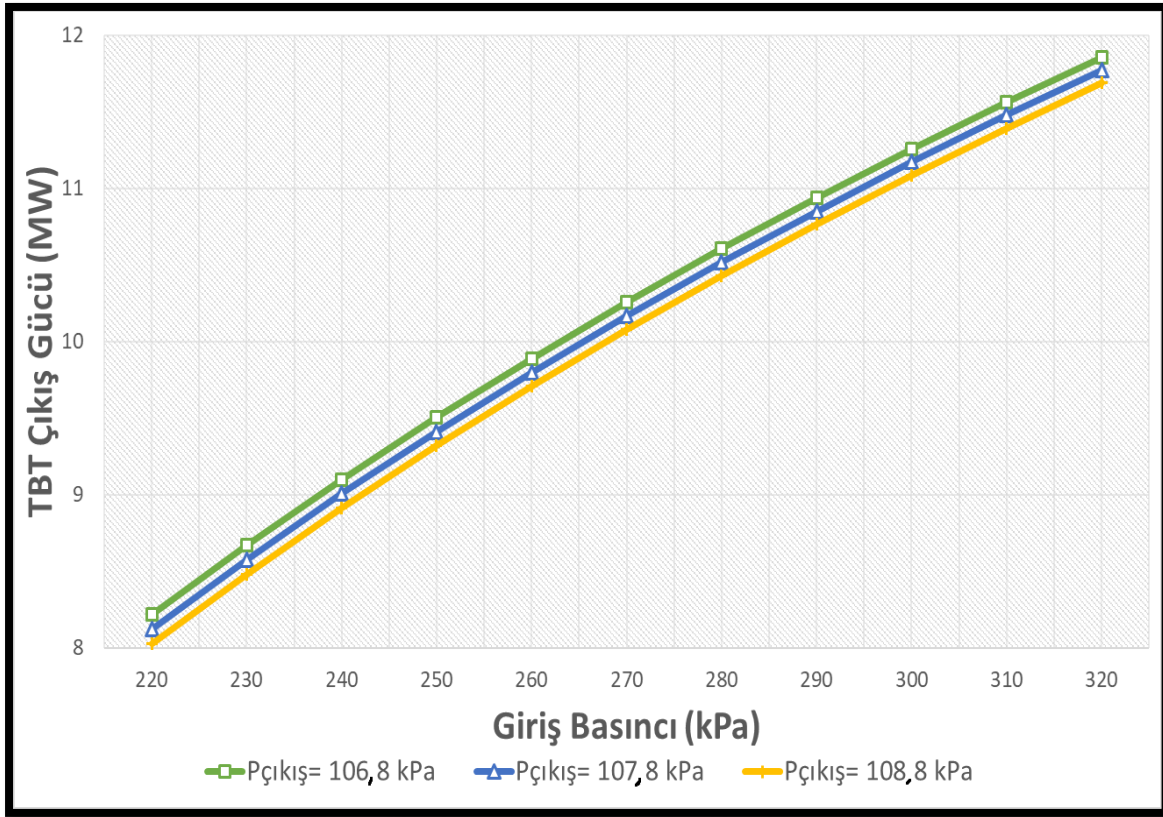
Şekil 3.11. Farklı gaz debilerine göre çıkış gaz basıncı- TBT çıkış gücü grafiği

3.7. Farklı Çıkış Gaz Basıncına Göre TBT Güç Üretimi

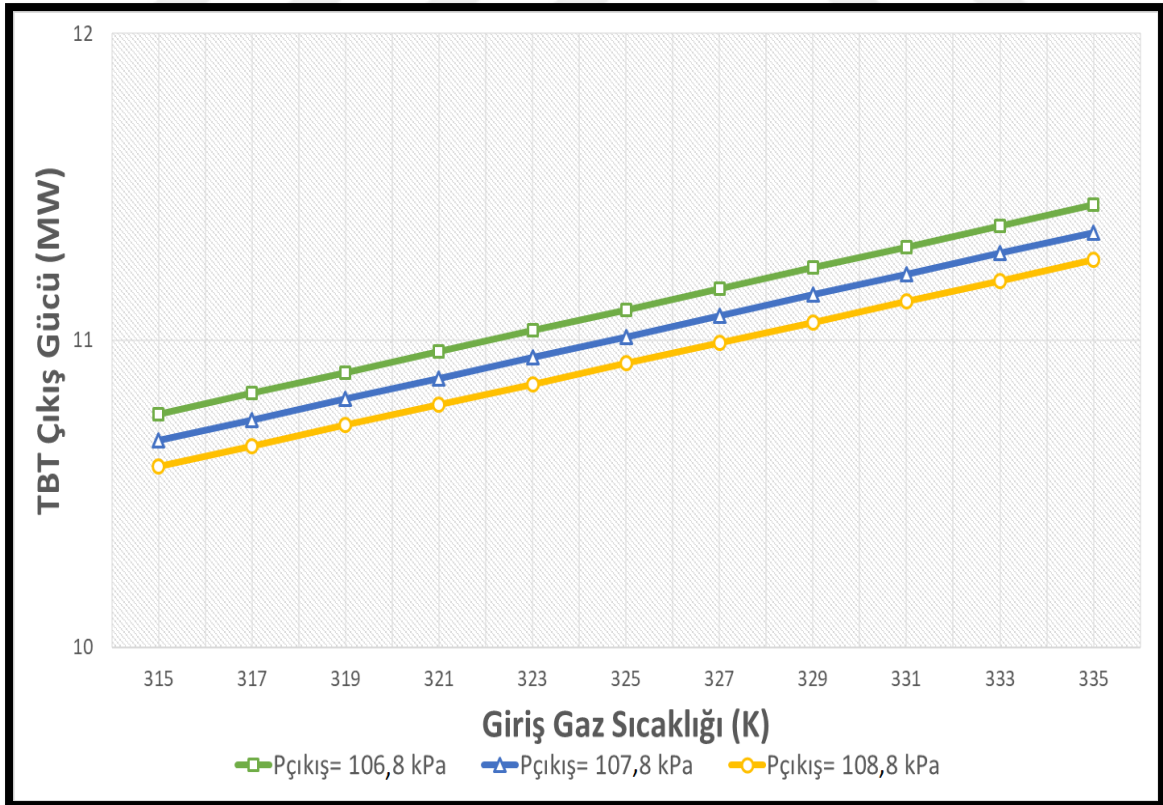
TBT çıkış basıncının 106,8 kPa, 107,8 kPa ve 108,8 kPa olduğu durumlara göre Giriş Basıncı-Elektrik Üretimi, Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi, Gaz Debisi-Elektrik Üretimleri ele alınmıştır.

Üç farklı gaz çıkış basıncı değerinde giriş basıncı değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 10 kPa artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.12’de incelenmiştir. Giriş gaz basıncının artmasının TBT üretimine ciddi bir katkısının olduğu görülmektedir. Giriş basıncının 100 kPa artmasıyla, TBT üretiminin yaklaşık 3,6 MW arttığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte türbin çıkış basıncındaki artışın, elektrik üretimini az miktarlarda da olsa azalttığı görülmektedir.

Üç farklı gaz çıkış basıncı değerinde giriş gaz sıcaklığının değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 5 K artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.13’de incelenmiştir. Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminde az miktarda bir artış olduğu görülmektedir. 20K’lık gaz sıcaklığı artışının 0,6-0,7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bununla birlikte türbin çıkış basıncındaki artışın, elektrik üretimini az miktarlarda da olsa azalttığı görülmüştür.

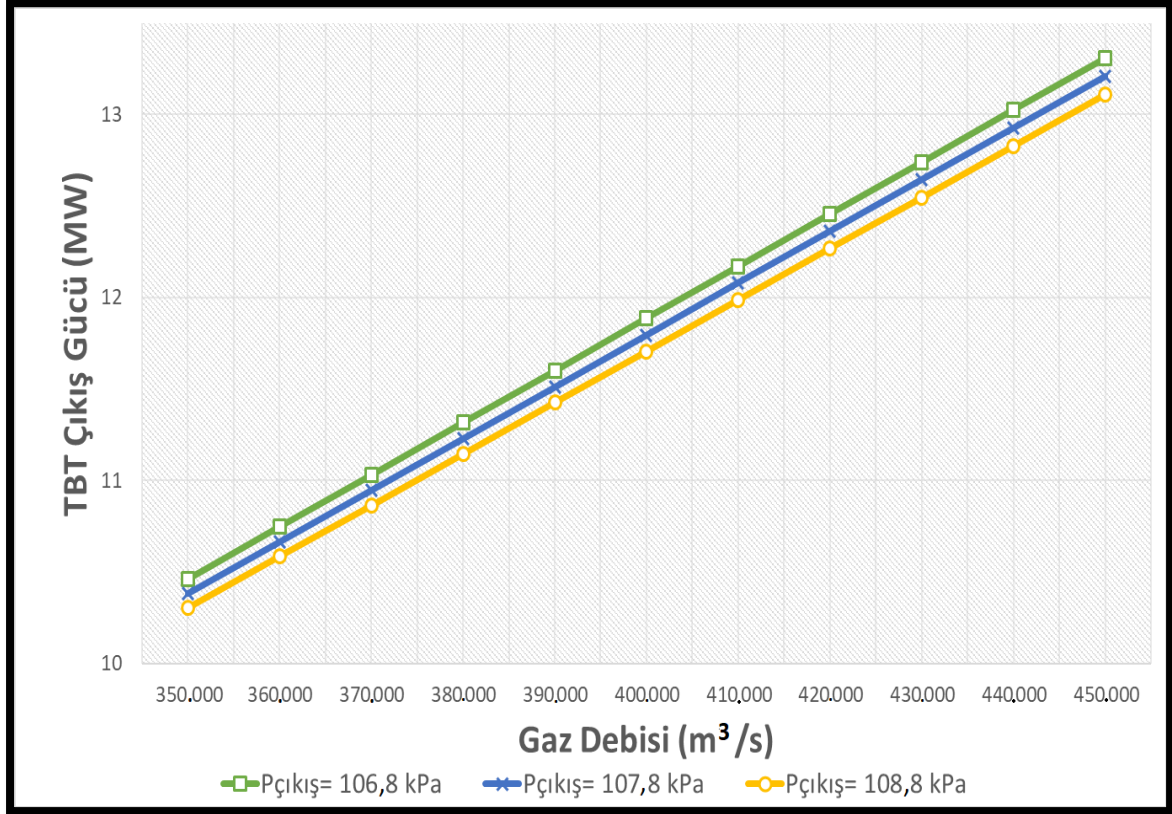


Şekil 3.12. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz basıncı- TBT çıkış gücü grafiği



Şekil 3.13. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz sıcaklığı- TBT çıkış gücü grafiği

Üç farklı gaz çıkış basıncı değerinde giriş gaz debisinin değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 10.000 m³/saat artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.14'te incelenmiştir. Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100000 m³/saat artışı elektrik üretimini 2,6 MW arttırmakta, TBT çıkış basıncının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha düşük üretim değerleri elde edildiği görülmektedir.

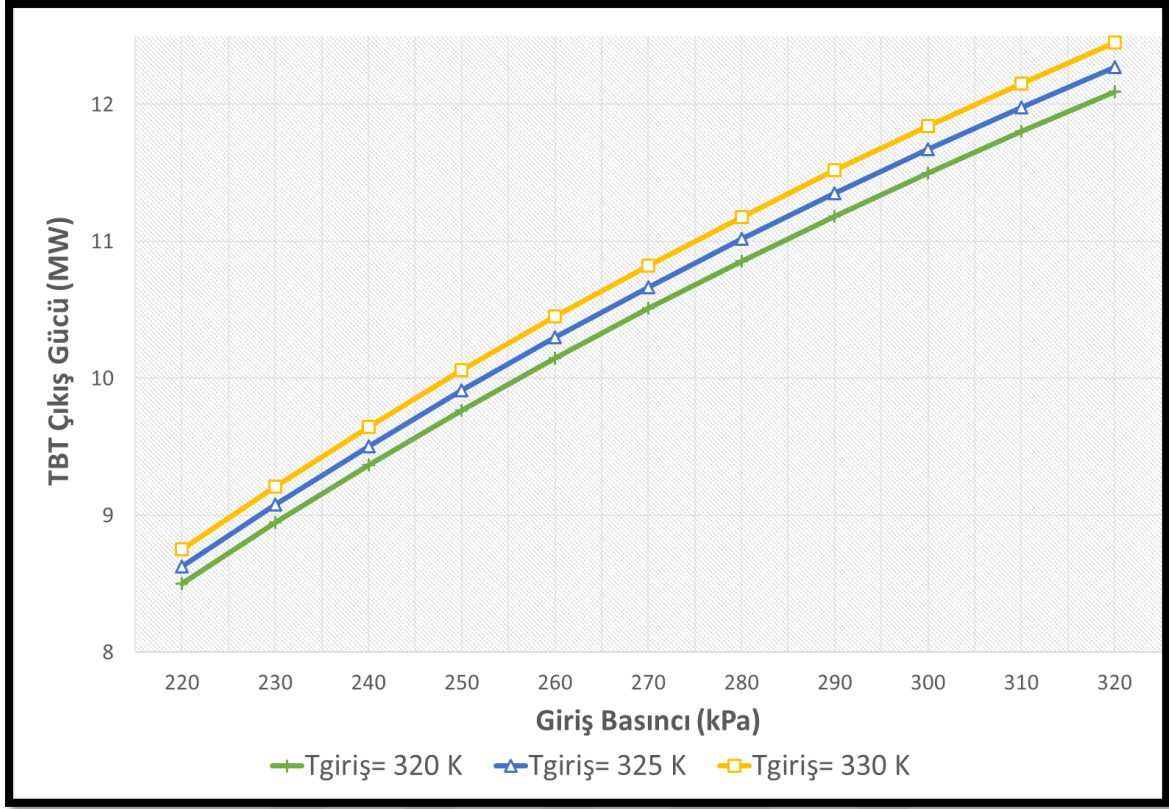


Şekil 3.14. Farklı çıkış basınçlarına göre gaz debisi- TBT çıkış gücü grafiği

3.8. Farklı Gaz Sıcaklığına Göre TBT Güç Üretimi

TBT gaz giriş sıcaklığının 5 derece artırılmasıyla 320 K, 325 K ve 330 K olduğu durumlara göre Giriş Basıncı-Elektrik Üretimi, Çıkış Basıncı-Elektrik Üretimi, Gaz Debisi-Elektrik Üretimleri ele alınmıştır.

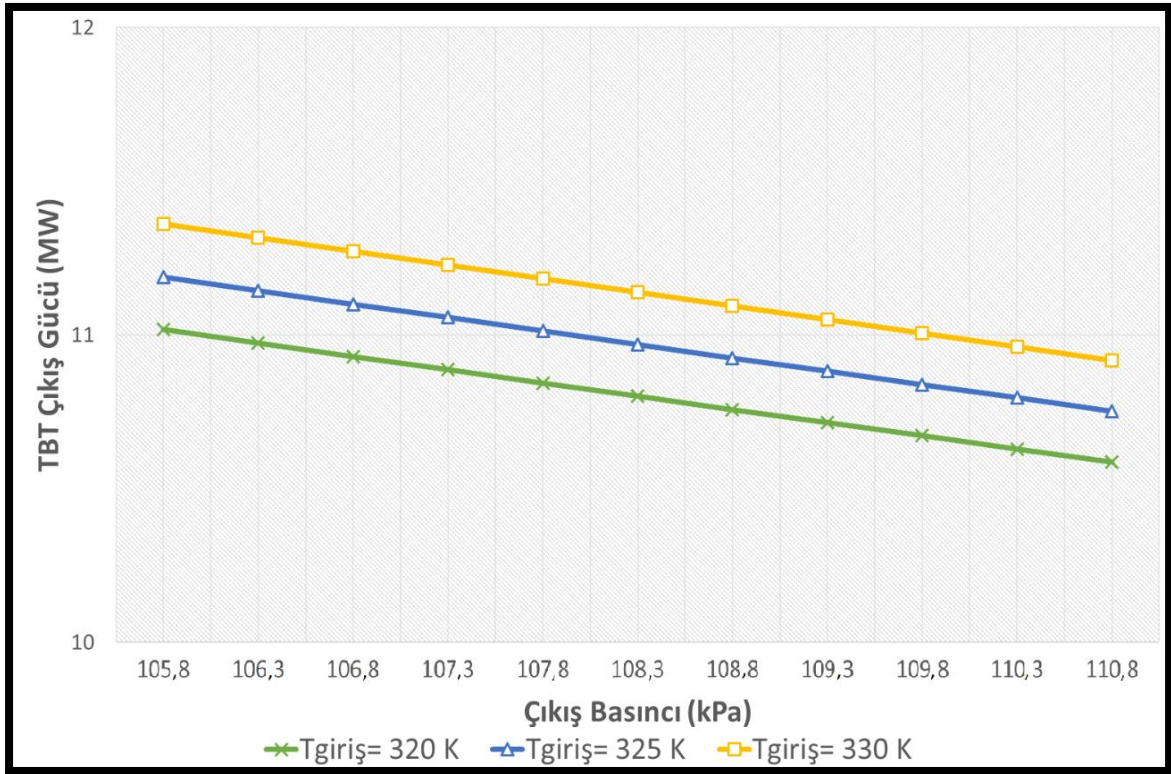
Üç farklı gaz giriş sıcaklığı değerinde giriş basıncı değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 10 kPa artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.15'de incelenmiştir. Giriş gaz basıncının artmasının TBT üretimine ciddi bir katkısının olduğu görülmektedir. Giriş basıncının 100 kPa artmasıyla, TBT üretiminin yaklaşık 3,6 MW arttığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte gaz sıcaklığındaki artışın, elektrik üretimini az miktarlarda da olsa arttırdığı görülmüştür.



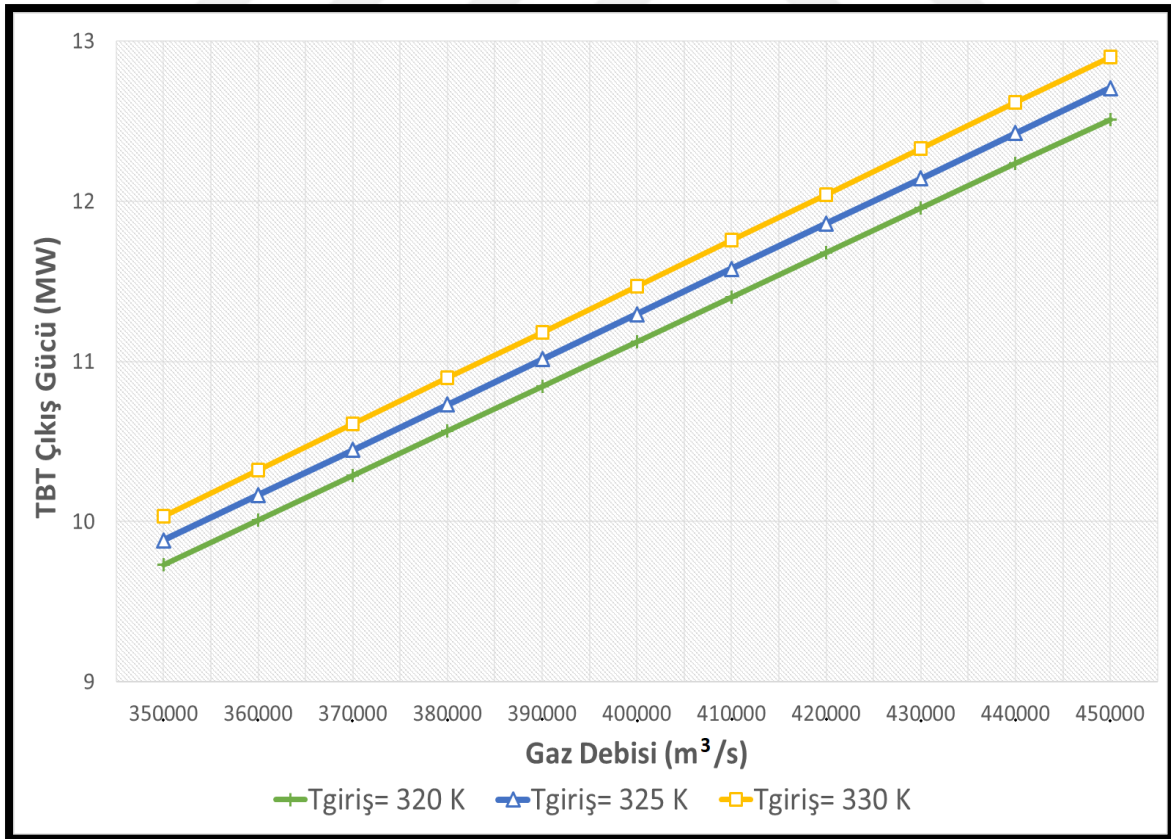
Şekil 3.15. Farklı gaz sıcaklıklarına göre giriş gaz basıncı- TBT çıkış gücü grafiği

Üç farklı gaz giriş sıcaklığı değerinde çıkış gaz basıncı değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 0,5 kPa azaltılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.16'da incelenmiştir. Çıkış Basıncının TBT üretimiyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretimi artış gösterse de farklı gaz sıcaklıklarında çıkış basıncı-TBT üretim ilişkisi benzerlik göstermektedir.

Üç farklı gaz giriş sıcaklığı değerinde giriş gaz debisi değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 10.000 m³/saat artırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.17'de incelenmiştir. Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100000 m³/saat artışı elektrik üretimini 2,6 MW arttırmakta, gaz sıcaklığının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha yüksek üretim değerleri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.16. Farklı gaz sıcaklıklarına göre çıkış gaz basıncı- TBT çıkış gücü grafiği



Şekil 3.17. Farklı gaz sıcaklıklarına göre gaz debisi- TBT çıkış gücü grafiği

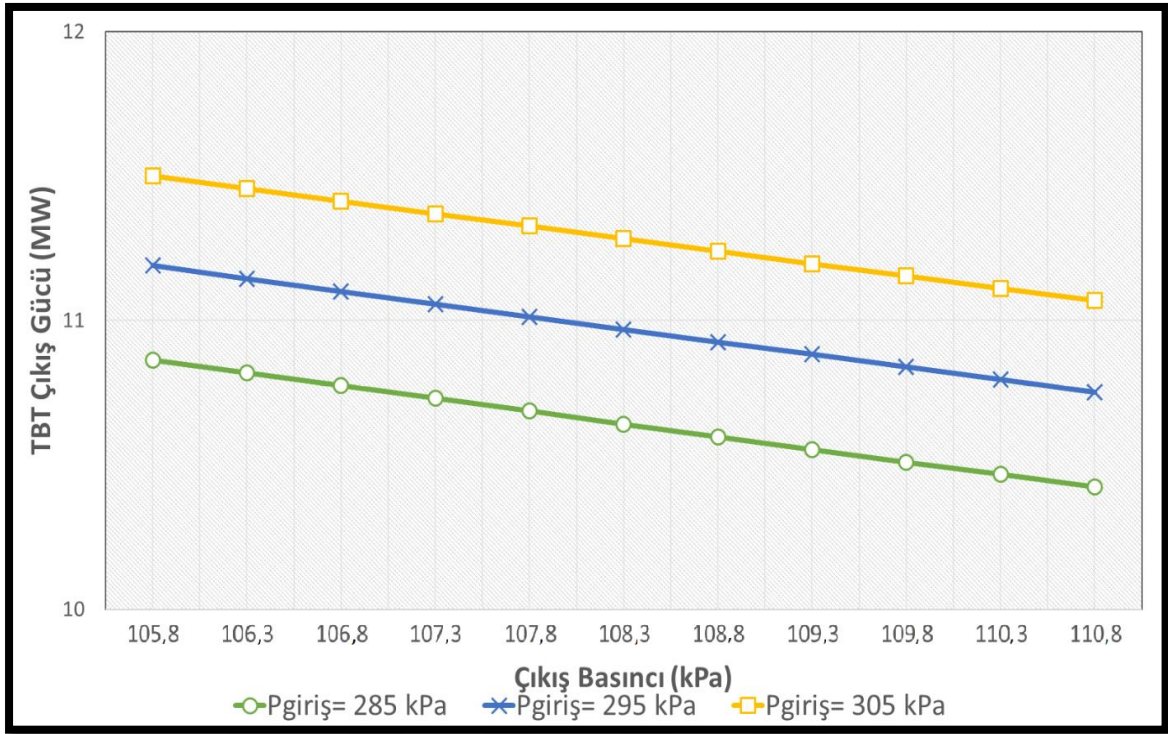
3.9. Farklı Giriş Basıncına Göre TBT Güç Üretimi

TBT giriş basıncının 285 kPa, 295 kPa ve 305 kPa olduğu durumlara göre Çıkış Basıncı-Elektrik Üretimi, Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi, Gaz Debisi-Elektrik Üretimleri ele alınmıştır. Çıkış Basıncının TBT üretimiyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir.

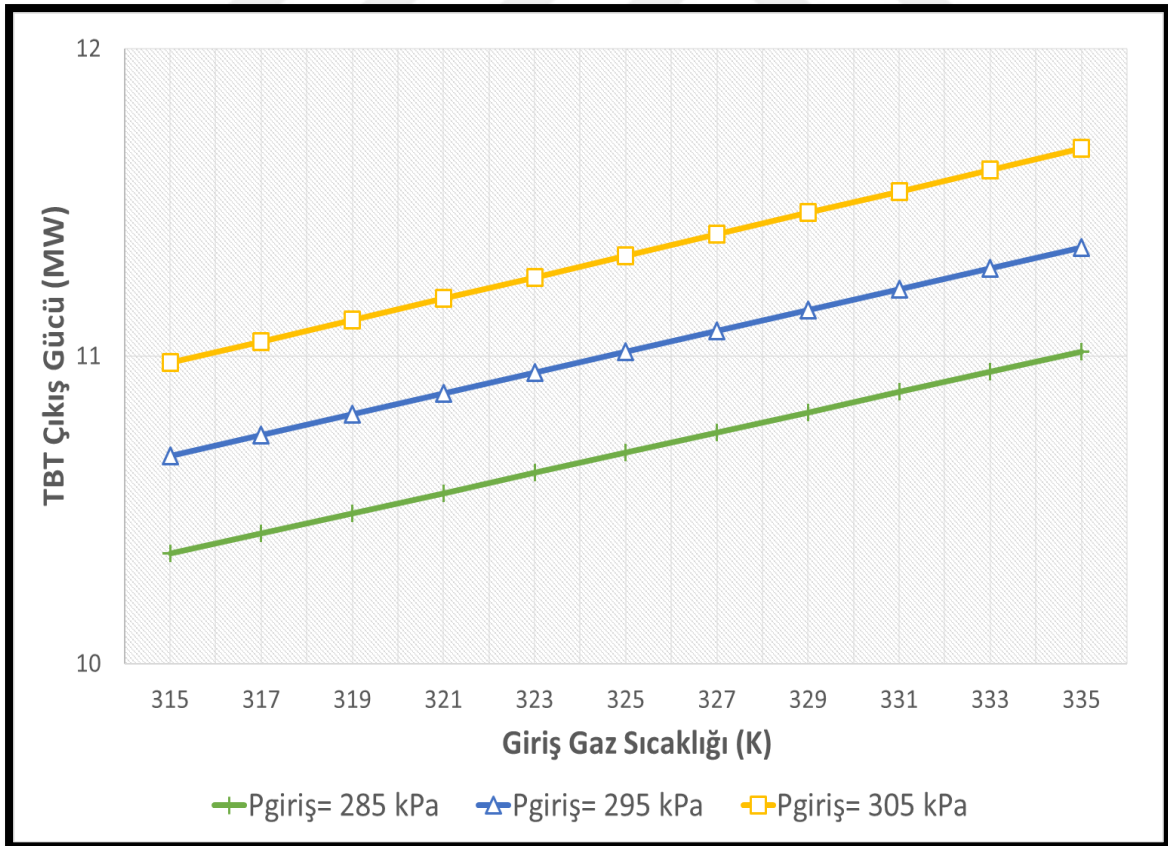
Üç farklı gaz giriş basıncı değerinde çıkış gaz basıncı değeri kademeli olarak bir önceki değere göre 0,5 kPa azaltılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.18'te incelenmiştir. Çıkış Basıncının TBT üretimiyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Gaz basıncının artmasıyla TBT üretimi artış gösterse de farklı giriş gaz basınçlarında 5 kPa değerinde bir çıkış basıncı artışı toplamda 0,5 MW civarında TBT üretiminde düşüşe neden olmaktadır.

Üç farklı gaz giriş basıncı değerinde giriş gaz sıcaklığı kademeli olarak bir önceki değere göre 5 K arttırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.19'da incelenmiştir. Gaz giriş basıncının artmasıyla TBT üretimi artış gösterse de aynı gaz basıncında giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminde az miktarda bir artış olduğu görülmektedir. 20 K'lık gaz sıcaklığı artışının 0,6-0,7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı sıcaklık değerinde 10 kPa'lık giriş basıncının artışı, TBT üretiminin 0,3 MW artmasına neden olmaktadır. Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi Grafiği görülmektedir.

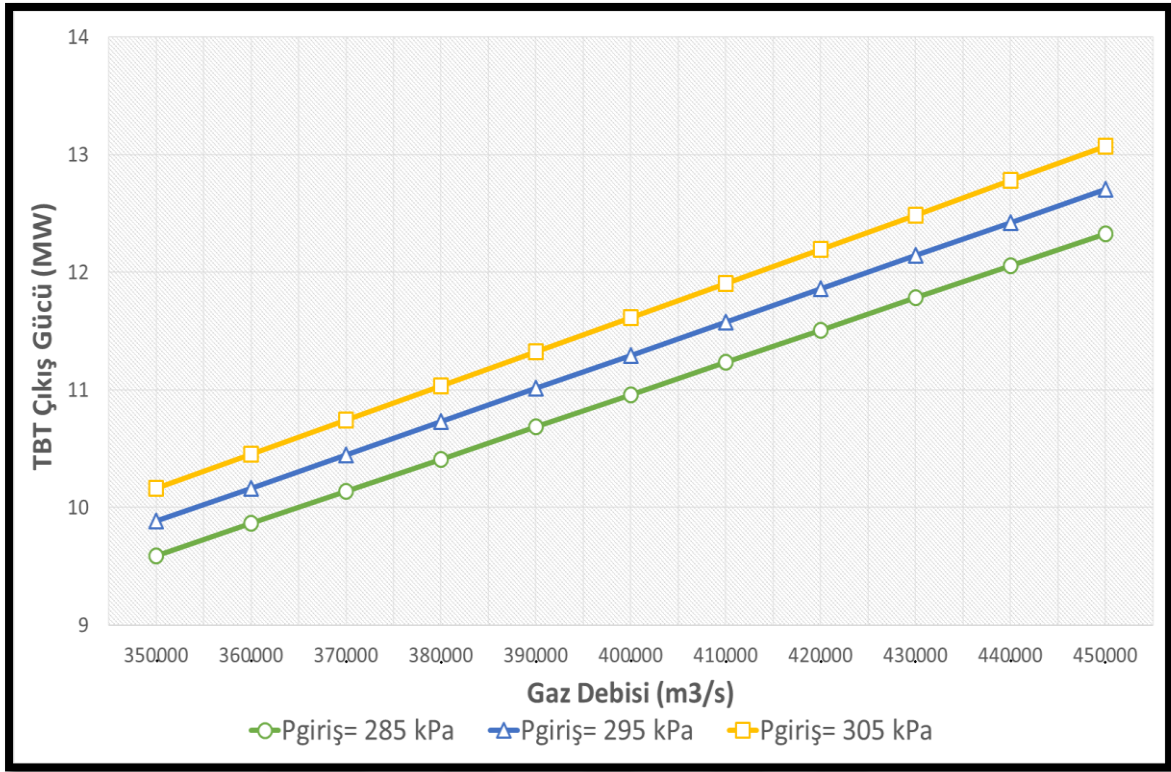
Üç farklı gaz giriş basıncı değerinde giriş gaz debisi kademeli olarak bir önceki değere göre 10.000 m³/saat arttırılarak TBT çıkış gücünün değişimi Şekil 3.20'de incelenmiştir. Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100.000 m³/saat artışı elektrik üretimini 2,6 MW arttırmakta, giriş gaz basıncının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha yüksek üretim değerleri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.18. Farklı giriş basınçlarına göre çıkış basıncı- TBT çıkış gücü grafiği

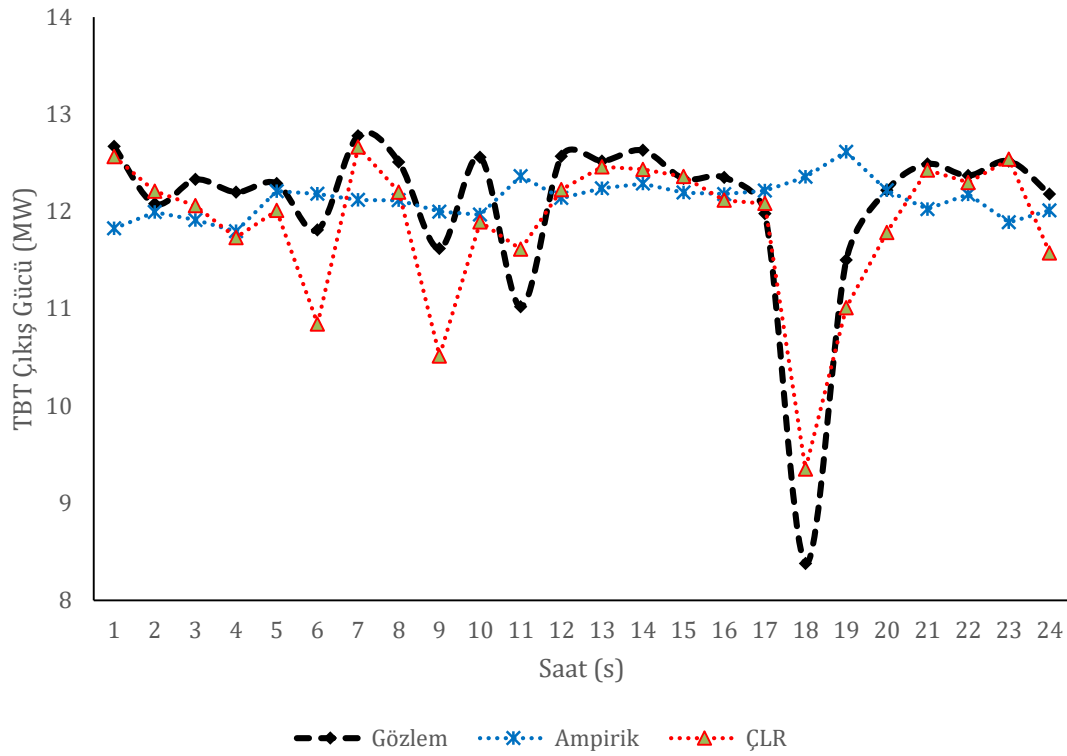


Şekil 3.19. Farklı giriş basınçlarına göre gaz sıcaklığı- TBT çıkış gücü grafiği

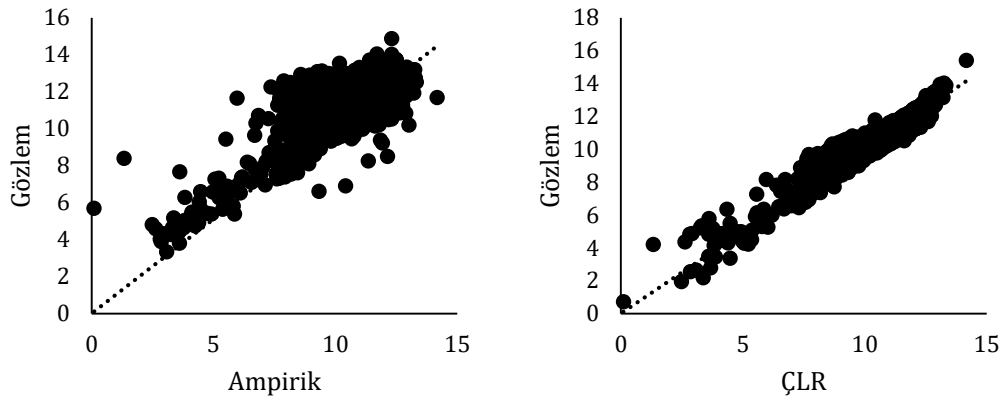


Şekil 3.20. Farklı giriş basınçlarına göre gaz debisi- TBT çıkış gücü grafiği

Bu çalışmada kayıt altına alınan TBT çıkış gücü ölçümleri ampirik olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber baz alınan parametrelere bağlı olarak ÇLR modeli ile ayrıca TBT çıkış gücü hesaplanmıştır. Model olarak ÇLR, ampirik modele göre daha yüksek uyum göstererek gerçek değerleri tahmin etmede daha başarılı olmuştur. Gün bazında TBT çıkış gücü: Gözlem, Ampirik ve ÇLR modellerinin karşılaştırılması Şekil 3.21’de görülmektedir. TBT çıkış gücü: Gözlem, Ampirik ve ÇLR modellerinin saçılım grafikleri ise Şekil 3.22’de verilmektedir. TBT çıkış gücü gözlem değerleri ile Ampirik ve ÇLR modellerinin tahminleri arasında performans değerleri incelendiğinde ÇLR model 0,9205 değeri ile daha yüksek R^2 değerine ulaştığı bu durumun MSE değerleri ile uyumlu olduğu Çizelge 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.21. TBT çıkış gücü: Gözlem, ampirik ve ÇLR modellerinin karşılaştırılması



Şekil 3.22. TBT çıkış gücü: Tüm veri için gözlem, ampirik ve ÇLR modellerinin saçılım grafikleri

Çizelge 3.2. TBT çıkış gücü için ampirik ve ÇLR modellerinin performans değerleri

Model	Performans Ölçütü		
	<i>MSE</i>	<i>MAPE</i>	R^2
Ampirik	0,6038	% 3,65	0,9168
ÇLR	0,1807	% 3,62	0,9205

Yüksek fırınlarda bir ton sıvı ham demir üretimi için gereken enerjinin %26'sının TBT ile geri kazanımının yapılabildiği hesaplanmıştır. Bununla birlikte TBT ile elektrik üretilmesi sonucunda karbon salınım miktarında da azalma olacaktır. Eşitlik 2.15 ile toplam CO₂ emisyonu azaltım miktarı hesaplanmıştır.

$$\text{Karbon Emisyon Düşüşü} = 88368 \times 0,6 = 53020 \text{ Ton/yıl}$$

Çizelge 3.3. TBT ile elektrik üretimine bağlı karbon emisyonu azaltımı

No	Parametreler	Birim	Saatlik	Yıllık
1	TBT Elektrik Üretimi	MWh	10,52	88368
2	TBT Çalışma Süresi	Saat	-	8400
3	Karbon Emisyonundaki Düşüş	Ton	6,3	53020

Çizelge 3.3'de TBT'nin saatlik üretim ortalaması değeri ile yıllık çalışma süresinin çarpımı sonucu hesaplanan toplam elektrik üretim miktarı verilmiştir. Karbon emisyonundaki düşüş miktarı da üretilen elektriğin EF ile çarpılması sonucunda bulunmuştur. TBT ile elektrik üretilmesi, proste kullanılmak üzere enerji üretim santralinde üretilmesi gereken elektriğin azaltılabilmesi demektir. Bu nedenle TBT'de yakıt harcanmadan ve dolayısıyla karbon emisyonu oluşturmadan üretilen elektrik ile karbon emisyonunda 53020 ton düşüş sağlanmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada örnek bir işletmede bulunan Yüksek Fırın Tepe-Basıncı Türbin Sistemi (TBT) prosesinde, teknik özellikleri bilinen bir yüksek fırın-gaz temizleme sistemi ile ona bağlı işletilen bir TBT sistemine ait veriler kullanılarak TBT sistemi araştırılmıştır. TBT üretim parametrelerinin elektrik üretimiyle olan ilişkisi incelenmiştir. Söz konusu TBT sistemine ait üretim değerleri hem ampirik olarak hesaplanmış hem de bir ÇLR modeli tahmin edilmiştir. Nihayetinde ise sistem gözlem değerleri, ampirik değerler ve ÇLRM modelinin tahmin ettiği değerleri hata değerlendirme kriterleri kıyaslanmıştır. TBT'nin kurulmasıyla birlikte sera gazı emisyonlarının düşürülmesi, karbon emisyonu azaltımı hesabı yapılmıştır. Bu çalışmada örnek bir işletmede bulunan Yüksek Fırın Tepe-Basıncı Türbin Sistemi (TBT) tarafından gerçekleştirilen elektrik enerjisi üretimi incelenmiş olup aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yüksek fırının sürekli çalıştığı koşullarda elde edilen TBT saatlik ortalama gözlem verilerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda yüksek fırına yakma havası sağlayan turbo köruklerde harcanan enerjinin %26'sının geri kazanımının yapılabildiği belirlenmiştir.
- TBT giriş gaz debisinin tek başına TBT üretimine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre giriş gaz debisinin TBT güç üretimiyle orta güçte pozitif bir ilişkisi olduğu görülmüştür.
- TBT giriş gaz basıncının tek başına TBT üretimine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre giriş gaz basıncının TBT güç üretimiyle orta güçte pozitif bir ilişkisi olduğu görülmüştür.
- TBT giriş gaz sıcaklığının tek başına TBT üretimine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre giriş gaz sıcaklığının TBT güç üretimiyle zayıf bir ilişkisi olduğu görülmüştür.
- TBT çıkış gaz sıcaklığının tek başına TBT üretimine olan etkisi incelenmiştir. Buna göre çıkış gaz sıcaklığının TBT güç üretimiyle zayıf bir ilişkisi olduğu görülmüştür.
- Giriş gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin arttığı gözlemlenmektedir. Gaz debisinin 100000 m³/saat artışı aynı gaz basıncına göre 2,6 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır.
- Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminin az miktarda arttığı gözlemlenmektedir. 20K'lik gaz sıcaklığı artışının 0,6-0,7 MW civarında bir artışa sebep olurken aynı gaz sıcaklığında gaz debisinin 100.000 m³/saat artışı 2,9 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır.

- Çıkış gaz basıncının artmasıyla TBT üretimi azalmış olup ve aynı türbin çıkış basıncında, gaz debisinin 100.000 m³/saat artışı 2,8 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır.
- Giriş basıncının 100 kPa artmasıyla, TBT üretiminin yaklaşık 3,6 MW arttığı hesaplanmıştır.
- Gaz debisinin 100.000 m³/saat artışı elektrik üretimini 2,6 MW arttırmakta, TBT çıkış basıncının artması durumunda aynı gaz debilerinde daha düşük üretim değerleri gerçekleşmiştir.
- Gaz debisinin 100.000 Nm³/saat artışı elektrik üretimini 2,6 MW arttırmaktadır
- Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminde az miktarda bir artış olduğu görülmektedir.
- Aynı giriş gaz sıcaklık değerinde 10 kPa'lık giriş basıncının artışı, TBT üretiminin 0,3 MW artmasına neden olmaktadır.
- TBT giriş basıncı ile çıkış basıncı arasındaki farkın azalmasıyla TBT üretimi azalmakta, aradaki farkın artmasıyla TBT üretimi artmaktadır.
- TBT çıkış gücü gözlem değerleri ile Ampirik ve ÇLR modellerinin tahminleri arasında performans değerleri incelendiğinde ÇLR modeli 0,9205 değeri ile daha yüksek tahmin yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.
- TBT sisteminin kurulmasıyla karbon emisyonunun azaltılabildiği görülmüştür. TBT ile stabil yüksek fırın çalışma koşullarında yılda 88368 MW elektrik üretimi yapılabildiği hesaplanmıştır. Türkiye için hesaplanmış olan emisyon faktörü değeri ile yapılan hesaplamada karbon emisyonunun 53020 ton/yıl azaltılabildiği hesaplanmıştır.

Bu sonuçların ışığında TBT'lerde enerji verimliliğinin artırılabilmesi için gaz temizleme sistemlerinde YFG basıncı kayıplarının minimize edilmesi, YFG'nin minimum ısı kaybı ile TBT'ye ulaştırılması konularına yoğunlaşmak gerektiği görülmektedir. Bu konularda yapılacak iyileştirme çalışmaları sonrasında daha yüksek enerji geri kazanım oranına ulaşmak ve karbon emisyonunu daha da azaltmak mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aksu, N. (2016). Referans evapotranspirasyonun zaman, konum, bağıl nem ve rüzgâr hızı girdileri kullanılarak yapay sinir ağlarıyla tahmin edilmesi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 30(1), 75-87.
- Aktaş, C. (2011). Türkiye'nin turizm gelirini etkileyen değişkenler için en uygun regresyon denkleminin belirlenmesi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6(2), 163-174.
- Alkan, E. ve Iğın, M,A. (2018). Bir elektronik firmasının montaj hatlarının ergonomik analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*,7(1), 149-158.
- An, J., Yang, J., Wu, M. ve Wan, X. (2016) A modeling and closed-loop identification method based on RLS for top pressure in blast furnace. *35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chinese, 2223-2228.
- Bayraç, H,N. ve Çildir, M. (2017). AB yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik büyüme üzerindeki etkisi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, ICMEB17 Özel Sayısı, 201-212.
- BP Statistical Review of World Energy, (2019), 2-8.
- Cai, L., Xiao, J., Wang, S., Gao, S., Duan, J. ve Mao, J. (2017). Gas-particle flows and erosion characteristic of large capacity dry top gas pressure recovery türbine. *Energy*, 120, 498 – 506.
- Caillat, S. (2017). Burners in the steel industry: Utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing lines. *Energy Procedia*, 120, 20-27.
- Dekarz, K. (2016). The way of improving energy efficiency in steel industry TRT turbines. *Contemporary Problems of Power Engineering and Environmental Protection*, 145-148. doi:10.1109/appeec.2010.5449228
- Donk, H., Li, J., Guo, N., Zhang, H., Mao, H., Liu, W. ve Cai, J. (2010). Grade Recovery and Cascade Utilization of Residual Heat in Sinter Cogeneration System. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*.
- Dulkadiroğlu, H. (2018). Türkiye’de elektrik üretiminin sera gazı emisyonları açısından incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (1), 67-74.
- Errera, M,R. ve Milanese, L,F. (2000). Thermodynamic analysis of a coke dry quenching unit. *Energy Conversion & Management*,41, 109-127.

- Gao, C., Gao, W., Song, K., Na, H., Tian, F. ve Zhang, F. (2019). Comprehensive evaluation on energy-water saving effects in iron and steel industry. *Science of the Total Environment*, 670, 346-360.
- Guo, Z.C. ve Fu, Z, X. (2010). Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. *Energy*, 35, 4356–4360.
- He, K. ve Wang L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022–1039.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], (2014). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change, 124.
- International Energy Agency, (2019a). Global Energy and CO₂ Status Report, s: 4.
- International Energy Agency, (2019b). Energy Efficiency, 14, s: 55.
- İnternet, Geerdes, M., Toxopeus, H. ve Vliet, C. (2015). Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction, 3. <https://docplayer.net/50786147-Modern-blast-furnace-ironmaking-an-introduction.html>, Son Erişim Tarihi: 05.01.2020.
- İnternet, IMI Critical Engineering - Top-Gas Recovery Turbine (TRT). http://www.imi-critical.com/products/PublishingImages/Pages/Product-Top-Gas-Recovery-Turbine-Expander/IMI_Z+J_TRT.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.01.2020.
- İnternet, MITSUI E&S - Top Pressure Recovery Turbine (TRT) Generating System. <https://www.mes.co.jp/english/business/infra/industrial/detail804.html>, Son Erişim Tarihi: 05.01.2020.
- İnternet, REP Holding – Tepe Basıncı Türbin Sistemi. <http://www.reph.ru/en/production/type/349/1448/> Son Erişim Tarihi: 13.01.2020
- İnternet, SİNOSTEEL – Tepe Basıncı Türbin Sistemi. http://mecc.sinosteel.com/service_content.aspx?id=3349, Son Erişim Tarihi:05.01.2020.
- İnternet, TAPC – Kuru Tip Gaz Temizleme Elektrostatik Filtreleri. <https://tapc.com.au/our-products/electrostatic-precipitators/> Son Erişim Tarihi: 13.01.2020
- İnternet, Türkiye Çelik Üreticileri Derneği – Demir Çelik ve Enerji Verimliliği. <http://celik.org.tr/cemtas-celik-makina-sanayi-ve-ticaret-a-s>, Son Erişim Tarihi: 06.12.2019.
- Jian, L., Gao, C. ve Xia Z. (2012). Constructing multiple kernel learning framework for blast furnace automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4),763-777.

- Johansson, M.T. ve Söderström, M. (2011). Options for the Swedish steel industry e energy efficiency measures and fuel conversion. *Energy*, 36, 191-198.
- Kanoğlu, M., Çengel, Y., Dinçer, İ. (2012). *Efficiency Evaluation of Energy System*. Springer, 36-41.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirmesi. *Engineer and Machinery*, 59 (692), 86-114.
- Konyalı, İ. (2019). *Türkiye için mevcut enerji üretimine alternatif yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının seçimi*, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kumar, N.M. ve Kumar, G,H,K. (2015). Power generation using green technology in iron and steel industry. *9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*.
- Kumar, N.M, Subathra, M.S.P. ve Cota, O.D. (2015). Waste Energy Recovery In Iron And Steel Industries For CO₂ Emission Reduction: A Case Study. *Journal of Environmental Research And Development*, 10(1), 149-156.
- Kuşoğlu, S. (2017). *Yüksek fırın tepe basıncı türbini (TBT) kullanılarak enerji geri kazanımı*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Lanzerstorfer, C., Preitschopf, W., Neuhold, R. ve Feilmayr, C. (2019). *ISIJ International*, 59 (3), 590–595.
- Liu, JX. (2008). Energy saving analysis by comparing turbo-driven BF blast system with electro-driven one. *Iron Steel Technology*, 5,53–54.
- Liu, X. ve Gao, X. (2016). A survey analysis of low carbon technology diffusion in China's iron & steel industry. *Journal of cleaner production*, 129, 88-101.
- Liu, X., Chen, L., Qin, X. ve Sun, F. (2015). Exergy loss minimization for a blast furnace with comparative analyses for energy flows and exergy flows. *Energy*, 93, 10-19.
- Luzin, Y. P, Kazyuta, V. I, Mozharenko N. M, ve Zen’kovich, A. L. (2012). Removal of cyanides from last furnace gas and wastewater. *Steel in Translation*, 42, 606.
- Minitab® 18 Support. “Perform stepwise regression for Fit Regression Model”. <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/perform-the-analysis/perform-stepwise-regression> (07.08.2019).

- Mutlu, V., Özgür, C. ve Bekaroğlu Ş,Ş. (2018). Kauçuk Endüstrisinde Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2): 139-146.
- Oda, J., Akimoto, K., Sano, F. ve Tomoda, T. (2007). Diffusion of energy efficient technologies and CO₂ emission reductions in iron and steel sector. *Energy Economics*, 29, 868–888.
- Odabaş, M., Çay, Y. ve Kılınç, E. (2014). Yüksek Fırınlarda Enerji Verimliliği Analizi: Kardemir A.Ş. Örneği. *ISITES*, 1807-1820.
- Pinto, R,G,D., Szklo, A,S. ve Rathmann, R. (2018). CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects. *Energy Policy*, 114, 380-393.
- Priya, S,S. ve Patil, R,G. (2014). BF gas utilization and power generation in steel plant using trt. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, ISSN: 2320-2092.
- Qi, Z., Gao, C., Na, H. ve Ye, Z. (2018). Using forest area for carbon footprint analysis of typical steel enterprises in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 132, 352-360.
- Quader, M.A., Ahmed, S., Ghazilla, R.A.R., Ahmed, S. ve Dahari, M. (2015). A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough Technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 594-614.
- Rosado, D.J.M., Chaves, S.B.R., Gutierrez, J.A., Araujo, F.H.M., Carhalvo Jr, J.A. ve Mendiburu, A.Z. (2020). Energetic analysis of reheating furnaces in the combustion of coke oven gas, linz-donawitz gas and blast furnace gas in the steel industry. *Applied Thermal Engineering*, 169.
- Rudramuni, G. ve Nataraj, S.C.N. (2016). Enhancement of steam generation in CDQ power plant. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(5), 1441-1445.
- Schoenberger, H. (2000). BREF on the Production of Iron and Steel. *European Conference on "The Sevilla Process: A Driver for Environmental Performance in Industry"*, 101-109.
- Silva, R,R., Mathias, F,R,C. ve Bajay, S,V. (2018). Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. *Energy*, 153, 816-824.

- Stalinskii, D.V, Kanenko, G. M, Alkhasova, V. V, Bol'shakov, V. I. ve Golubykh, G. N. (2008). Purification of blast-furnace gas and energy conservation. *Steel in Translation*, 38 (6), 499-504.
- Sun, Q., Li, H., Xu, B., Cheng, L. ve Wennersten, R. (2016). Analysis of secondary energy in China's iron and steel industry – An approach of industrial metabolism. *International Journal of Green Energy*, 13 (8), 793–802.
- Wang, H. (2019). Development trends of energy saving technologies in Chinese steel industry. *Materials Science and Engineering*, 562.
- Worrell, E. ve Carreon, J.R. (2017). Energy demand for materials in an international context. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 375, 20160377
- Worrell, E., Martin, N. ve Price, L. (1999). Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. iron and steel sector. *Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division*, 10-28.
- Wu, P. ve Yang, J. (2012). Identification and control of blast furnace gas top pressure recovery turbine. *Unit ISIJ International*, 52 (1), 96–100.
- Wu, S., Xu, A., Zhang, Q. ve Li, J. (2020). Study on the relationship between process reconstruction and energy saving of iron an steel manufacturing process in China. *The minerals, metals & materials society 2020*, 133-146.
- Xu, C. ve Cang, D. (2010). A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. *Journal of Iron And Steel Research*, 17(3), 01-07.
- Zhang, Q., Zhao, X., Lu, H., Ni, T. ve Li, Y. (2017). Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry. *Applied Energy*, 191, 502 – 520.
- Zhang, S., Worrell, E., Crijns-Graus, W. ve Cofala, F,W,J. (2014). Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry. *Energy*, 78, 333-345.
- Zhang, S., Yi, B.W., Worrell, E., Wagner, F., Crijns Graus, W., Purohit, P., Wada, Y. ve Varis, O. (2019). Integrated assessment of resource-energy-environment nexus in China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 232, 235-249.
- Zheng, Y., Yao, Z., Zhou, H., Yang, C., Zhang, H., Li, M. ve Fan, L. (2018). Power Generation Forecast of Top Gas Recovery Turbine Unit Based on Elman Model. *37th Chinese Control Conference*, 7498-7501.
- Zhou, R., Zeng, J. ve Tang, C. (2017). Automatic Control System of Blast Furnace TRT. *29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 4499-4503.

Ziebig, A. ve Stanek, W. (2006). Energy and exergy system analysis of thermal improvements of blast-furnace plants. *International Journal Of Energy Research*, 30: 101–11.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : GENÇOĞLU, Ali
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.10.1990, Cidde/SA
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (539) 649 31 38
 e-mail : eng.aligencoglu@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2017 - Devam
Lisans	İstanbul Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2013
Lise	Selim Nevzat Şahin Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2013	KRM Kalıp San. Tic. Ltd. Şti.	Makine Mühendisi
2013-2014	Doğuş Kalıp Metal ve Form Ltd. Şti.	Makine Mühendisi
2015- Devam	İskenderun Demir ve Çelik A.Ş.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Arapça

Yayınlar

Mert, İ., Karakuş, C., ve Gençoğlu, A. (2019). Yüksek Fırınlarda Islak Tıp Tepe-Basınç Geri Kazanım Türbini İle Elektrik Üretimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, doi: 10.5505/pajes.2019.17702.

Kuşoğlu, S., Karakuş, C., Gençoğlu, A., ve Akyol, A.S. (2017). Energy Saving By Using Blast Furnace Top Pressure Recovery Turbine (Trt) System. *3rd International Iron Steel Symposium*, 3-5 Nisan 2017, Karabük.

Hobiler

Tenis, Futbol, Yüzme, Doğa Gezileri

DİZİN

A

Adyabatik Genişleme	39
Atık enerji	6
Atık ısı	5, 6, 7, 15

Ç

Çoklu Lineer Regresyon	iv, xiii, 14
------------------------	--------------

D

Demir-Çelik endüstrisi	5
------------------------	---

E

EDÇF	iv, x, xiii, 5, 6, 7, 9, 15
Enerji tüketimi	x, 1, 3
Enerji verimliliği	x, 2, 3, 4, 11, 13, 15

G

Gaz temizleme	x, xi, 14, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 61, 62
---------------	---

I

Islak tip tepe basıncı türbinleri	23
-----------------------------------	----

K

Karbon emisyonu	ix, 9, 14, 60, 61
Korelasyon	xiii, 14, 38, 39

O

Ortalama karesel hata	iv, 14
Ortalama mutlak yüzdesel hata	iv, 14

T

Tepe basıncı enerji geri kazanım türbini	6
--	---

V

Varyans	iv, 14
---------	--------

Y

Yenilenebilir enerji	ix, 1, 2, 63
Yüksek fırın gazı	iv, x, 5, 6, 17, 18, 19, 23, 28, 29, 33, 37, 44, 49
Yüksek Fırınlr	9, 17



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

