

# Yüksek fırınlarda ıslak tip tepe-basınç geri kazanım türbini ile elektrik üretimi

## Electricity production by wet type top-pressure recovery turbine in blast furnaces

İlker MERT<sup>1</sup>, Cuma KARAKUŞ<sup>2\*</sup>, Ali GENÇOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Bölümü, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye.  
ilkermert@dr.com

<sup>2</sup>Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye.  
cuma.karakus@iste.edu.tr

<sup>3</sup>İskenderun Demir ve Çelik AŞ. Hatay, Türkiye.  
eng.aligencoglu@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 21.08.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 30.11.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.11.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.17702  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Demir-çelik sektörü günümüzde enerji tüketimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Demir-çelik üretim sürecinin yüksek enerji ihtiyacı, beraberinde yüksek maliyetleri de getirmektedir. Bu durum, sektörde ürün kalitesini koruyarak enerji ihtiyacının azaltılması ve enerji tasarrufu yapılması stratejileri geliştirme ihtiyacını doğurmaktadır. Bu çalışmada; demir çelik sektörünün önemli enerji tasarruf yöntemlerinin bir tanesi olan Yüksek Fırın Tepe-Basıncı Türbin sistemi (TBT) incelenmiştir. TBT sisteminin önemi, işletme koşulları, işletme parametreleri ve enerji geri kazanımını etkileyen faktörler ele alınmış olup, örnek bir TBT için işletme parametrelerinin enerji geri kazanımına etkisi araştırılmıştır. Ampirik formüller ile hesaplanan elektrik üretimi değerleri ve parametrelere dayalı çoklu lineer ilişkiyi gösteren bir model ile tahmin edilen üretim değerleri, sistem gözlem değerleri karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek fırın, Enerji geri kazanımı, Tepe-Basınç geri kazanım türbini.

### Abstract

Today, the iron and steel industry is critical to energy consumption. The high energy demand of the iron and steel production process brings along high costs. This leads to the need to reduce energy demand and develop energy saving strategies while maintaining product quality in the sector. In this study; Blast Furnace Top Pressure Turbine system (TRT) which is one of the most important energy saving methods of iron and steel sector has been examined. The importance of TRT system, operating conditions, operating parameters and the factors affecting energy recovery are discussed and the effect of operating parameters on energy recovery is investigated for a sample TRT. A model showing multiple linear relations based on parameters and electrical generation values obtained by empirical formulas, and observation values were compared.

**Keywords:** Blast furnace, Energy recovery, Top-Pressure recovery turbine.

## 1 Giriş

Enerji sektörü tüm dünyada Endüstri 4.0 yaklaşımı ekseninde önemli bir dönüşüm geçirmekte olup enerji tasarrufu ve enerjinin verimli tüketimi konusu daha önemli hale gelmiştir. Enerji tasarrufu gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde önceliği yüksek bir politika alanıdır. Başta ABD, Japonya ve AB ülkeleri olmak üzere, bu konuda yasal düzenlemeler yapılması için adımlar atılmakta, ulusal ve sektörel hedefler belirlenmektedir. 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 [1]. Diğer yandan elektrik üretimi talebi, toplumların gelişmesini ve kalkınmasını sağlayan her yeni sanayi tesisi ile hızla artmaktadır. Üstelik ihtiyaç 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 Demir-Çelik endüstrisi ülke ekonomilerinde ciddi bir paya sahip olup en fazla enerji ihtiyacı duyan sektörler arasında bulunmaktadır. 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, yerel yönetimler tarafından yapılan araştırmalar neticesinde fabrikalarda uygulanan enerji tasarrufu çalışmalarının sonucunda ciddi bir tasarruf potansiyeli fırsatının bulunduğu değerlendirilmektedir [2]. Entegre Demir Çelik Fabrikalarında (EDÇF) enerjiyi en yoğun kullanan ünite yüksek fırınlardır [3]. Bu sebeple fabrikalarda bulunan yüksek fırınlarda tüketilen enerjinin geri kazanımına yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalardan biri de Yüksek

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

Fırın Tepe Basıncı Türbin sistemi olup bu sistem Yüksek Fırınlar tepe basıncı geri kazanımı sağlayan bir türbin sistemidir. Yüksek fırın gazının basıncı ile türbin giriş ve çıkışı arasında oluşturulan basınç farkı ( $\Delta P$ ) sayesinde gaz basınçlı ortamdan daha düşük basınçlı ortama geçerken türbin rotorunu döndürmekte ve türbin-jeneratör sistemi elektrik enerjisi üretmektedir. Uygulanan yeni projeler ile dışarıdan satın alınan elektriğin satın alma maliyetinden önemli oranda tasarruf sağlanmaktadır.

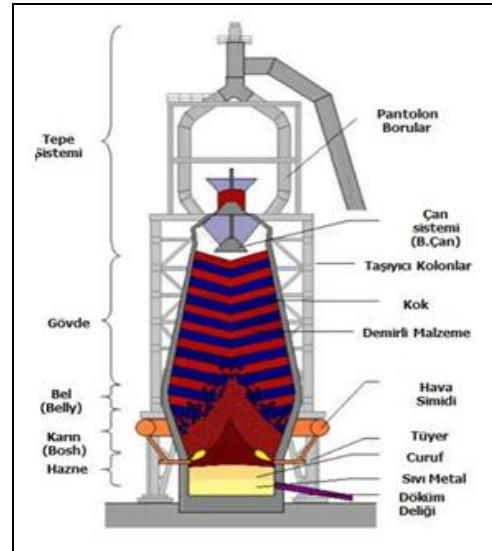
Yüksek Fırın Tepe Basıncı Türbin Sistemi (TBT), yüksek fırınlarda proses gereği yan ürün olarak elde edilen yüksek fırın gazının genleştirilerek basıncın düşürülmesi yerine, gazın basınç enerjisinden yararlanılarak herhangi bir ilave yakıt tüketmeden elektrik enerjisi üretilmesi esasına dayanan türbin-jeneratör sistemidir. TBT sistemi hakkında yapılan çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Wu ve Yang (2011) yapmış oldukları çalışmada, Yüksek Fırınlardaki bu basınç enerjisinin geri kazanılması için kullanılmakta olan Yüksek Fırın tepe basıncı türbin sistemi Yüksek Fırınların enerji tüketiminin %20'sinin geri kazanımını sağlanabildiği ve hacmi 1000 m<sup>3</sup>'ten büyük olan her Yüksek Fırında kurulabilen bir sistem olduğunu ifade etmişlerdir [4]. Jian ve diğ. (2012), 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 [5]. Priya ve Patil (2014) 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 [6]. Jianqi ve diğ. (2016) bir çalışmada, yüksek basınç ve TBT öncesi basıncın dinamik matematiksel modeli, yüksek fırın üst 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 [7]. Deneysel çalışmalarda, sonuçları etkileyen ve ölçümü gerçekleştirilen bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasındaki bağlantı, değişkenlerin sayısı artmasıyla daha iyi anlaşılabilir. Ancak değişken sayısının artırılması daha fazla ölçüm gerektirdiğinden maliyetli ve zahmetli bir gayrettir. Bu nedenle değişimi minimum sayıda değişkenle açıklamak için istatistik çalışmalarda sıklıkla kullanılan Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR) modelleri kullanılmaktadır [8]. Bu çalışmada 2500 m<sup>3</sup> 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. 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 ( $R^2$ ) değerleri ekseninde kıyaslanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

Endüstride enerji verimliliği küresel rekabet gücü için çok önemlidir. Bu nedenle enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik spesifik yöntemlerin geliştirilmesi kaçınılmazdır. Bu doğrultuda yüksek verim sağlayan aydınlatma sistemlerinin kullanılması, yüksek verimli motorların kullanılması, yüksek verimli soğutma sistemlerinin tasarlanması, hat izolasyonlarının 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 Tepe Basıncı Türbin sistemi olup kısaca Yüksek Fırınlar tepe basıncı geri kazanımını sağlayan bir türbin sistemi olarak tanımlanabilir.

Kireç taşı ve kok ile demir içerikli hammaddelerin birlikte ergitilmesi için tasarlanan 30-90 m arasında değişen yüksekliği sahip dikey ergitme fırınları yüksek fırın olarak adlandırılabilir. Sıvı pik elde edimi için demir içeren hammaddeler (cevher, pelet, sinter gibi), cüruf elde edimi ve sonrasında elde edilen maddenin özelliklerinin ayarlanabilmesi için oksit bazlı hammaddeler (kireçtaşı, flux malzemeleri ve dolomit gibi), ısı elde edimi için karbon bazlı hammaddeler (kömür, kok, fuel oil ve katran gibi) ters ve sürekli akım presibiyle çalışan yüksek fırınlar içerisinde işleme tabi tutulmaktadır. Sistemde aşağıdan 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 içeren hammadde aşağı iner. Yüksek fırının ana ürünleri yüksek oranda Fe içeren ham demir (As, C, Cr, Cu, Mn, Ni, P, S, Si), cüruf ve baca gazlarıdır [9]. Yüksek Fırınlar Sistemi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Yüksek fırınlar sistemi [9].

Figure 1. Blast furnaces system [9].

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. Gaz içerisindeki bu malzemeler yani gaz temizleme sistemleri ile ayrıştırılan ve temizlenen ürün, yüksek

fırın gazı olarak adlandırılır. Tipik bir yüksek fırında 1 ton sıvı ham demir başına 1200-2000 m<sup>3</sup> yüksek fırın gazı üretilebilir. Yan ürün gaz olarak bilinen yüksek fırın gazı (YFG), yakıt olarak kullanılabilir. Yüksek fırın gazının ısı değeri 2720-3770 kJ/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada örnek olarak seçilen TBT sisteminin prosesleri boyunca Tablo 1’de verilen parametreler gözlenmiş ve dakika bazında kayıt altına alınmıştır.

Tablo 1. TBT sisteminde takip edilen parametreler.  
Table 1. Parameters followed in the TRT system.

No	Parametreler	Birim	Minimum	Dizayn	Maksimum
1	Türbin Gaz Giriş Debisi	m <sup>3</sup> /h	250 000	400 000	500 000
2	Türbin Gaz Giriş Basıncı	kPa (mutlak)	180	290	330
3	Türbin Gaz Giriş Sıcaklığı	K	315	325	340
4	Türbin Gaz Çıkış Sıcaklığı	K	285	295	310
5	Türbin Girişi Bağlı Nem Oranı	%	100	100	100
6	Türbin Gaz Çıkış Basıncı	kPa (mutlak)	107	108	110
7	Atmosfer Basıncı	kPa		101.3	
8	Türbin Girişi YFG Toz İçeriği	mg/m <sup>3</sup>	< 10	< 10	< 10
9	Türbin Çıkış Gücü	kW	850	11690	14600
10	Türbin Dönme Hızı	Devir/dk.	3000	3000	3000
11	Türbin Kanat Açıklığı	%	0	-	100

## 2.1 Yüksek fırın tepe-basıncı türbin sistemi (TBT)

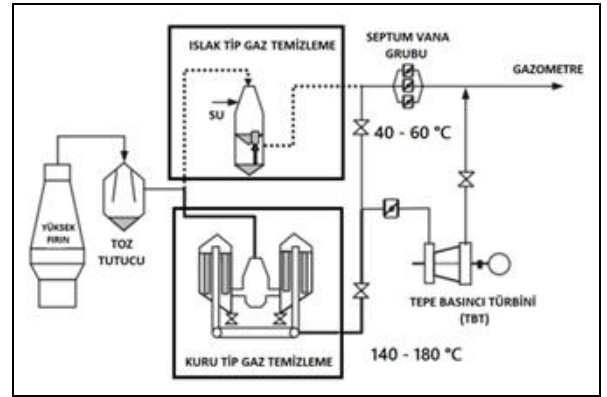
Yüksek Fırın Tepe-Basıncı Türbin Sistemi (TBT), yüksek fırınlarda proses gereği yan ürün olarak elde edilen yüksek fırın gazının genişletilerek basıncın düşürülmesi yerine, gazın basınç enerjisinden yararlanılarak herhangi bir ilave yakıt tüketmeden elektrik enerjisi üretilmesi esasına dayanan türbin-jeneratör sistemidir. 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. Japonya ve Kore’deki entegre tesislerin %100’ünde, Çin’deki çalışmakta olan entegre demir çelik tesislerin ise 560 adedinde Yüksek Fırın Tepe-Basıncı türbin sistemi bulunmaktadır [10]. Temsili TBT Şekil 2’de görülmektedir [11].

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 Türbin; elektrofiltreler vasıtasıyla susuz temizlik yapılan gaz temizleme ünitelerinin devamına kurulan TBT ise Kuru Tip Tepe-Basıncı Türbin

olarak isimlendirilir. Gaz Temizleme Metoduna Göre TBT Sistemi şematik olarak Şekil 3’te görülmektedir.

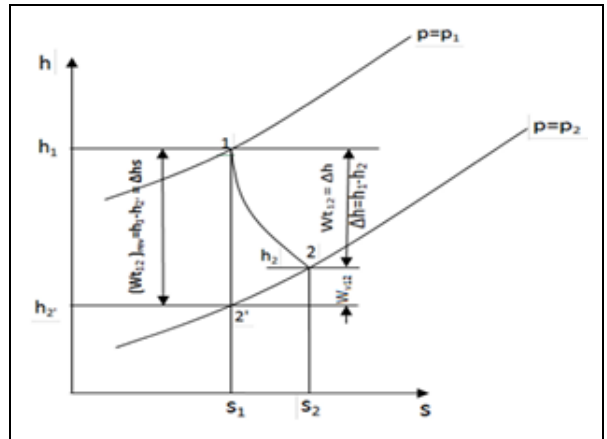


Şekil 2. Temsili TBT (Tepe-Basıncı Geri Kazanım Türbin).  
Figure 2. Representative TRT (Top-Pressure Recovery Turbine).



Şekil 3. Gaz temizleme metoduna göre TBT sistemleri [11].  
Figure 3. TRT systems according to the gas cleaning method [11].

Türbin içerisinde, akışkan geçerken mil üzerine yerleştirilmiş kanatçıklara karşı iş yapmaktadır. Böylece mil dönmek suretiyle türbin iş yapar. Türbinde iş, akışkan tarafından yapıldığından pozitiftir. 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 4’te görülmektedir. Burada; Tersinir İzentropik Genişleme: 1-----2’ ve Tersinmez Adyabatik Genişleme: 1-----2’dir.



Şekil 4. Türbindeki adyabatik genişleme (11).  
Figure 4. Adiabatic expansion in the turbine (11).

TBT sisteminde;

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

$$(W_{t12'}) = h_1 - h_2' = \Delta h_s \quad (1)$$

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

$$(W_{t12}) = h_1 - h_2 = \Delta h \quad (2)$$

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

$$W_{v12} = (W_{t12'}) - W_{t12} = h_2 - h_2' \quad (3)$$

İzentropik türbin verimi;

$$\eta_{ST} = \frac{W_{t12}}{(W_{t12'})} = \frac{W_{t12}}{W_{t12} + W_{v12}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2')} = \Delta h / \Delta h_s \quad (4)$$

İzentropik türbin gücü (kW);

$$P_{12} = \dot{m}(W_{t12'})\eta_{ST} = \dot{m}W_{t12} \quad (5)$$

Şaft üzerindeki türbin gücü(kW);

$$P_{w12} = \dot{m} W_{t12}\eta_T = P_{12}\eta_T \quad (6)$$

Jeneratör terminal gücü(kW);

$$P_{G12} = P_{w12}\eta_G = \dot{m}W_{t12}\eta_T\eta_G \quad (7)$$

ile verilebilir [13].

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),  $\Delta h_s$ , tersinir genişlemedeki izentropik entalpi eğrisi(kJ/kg),  $\Delta h$ , tersinmez genişlemedeki izentropik entalpi eğrisi (kJ/kg),  $\eta_{ST}$ , izentropik türbin verimi,  $\eta_m$ , yatak sürtünme mekanik verimi,  $\eta_G$  : Jeneratör verimi,  $\dot{m}$ , kütleli gaz debisi(kg/s),  $P_{12}$ , izentropik türbin gücü (kW),  $P_{w12}$ , şaft üzerindeki türbin gücü(kW),  $P_{G12}$ , jeneratör terminal gücü (kW) olarak ifade edilmiştir.

## 2.2 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.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j + \varepsilon \quad (8)$$

Denklem 8'de  $Y$ ,  $X'$  e bağlı değişkeni gösterirken  $\beta_0$  doğrunun y-eksenini kestiği yeri,  $\beta_1$  regresyon katsayısını (doğrunun eğimi),  $\beta_j$  j'nci parametreyi ifade ederken  $\varepsilon$  ise şansa bağlı hata değerini ifade etmektedir.  $\beta_0$  ve  $\beta_{1-j}$  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 [12].

## 2.3 Hata değerlendirme kriterleri

TBT'ye ait gerçek üretim değerleri ve model tahminlerinin karşılaştırılabilmesi için Belirlilik Katsayısı ( $R^2$ ), Ortalama Karesele hata (MSE), ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) kriterleri kullanılmıştır [13].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (9)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100 \quad (11)$$

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

## 3 Bulgular ve değerlendirme

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 en önemli göreve sahiptir [14]. Turbo körüklerde tüketilen enerjinin %25-%30 kadarı geri kazanılabilir. 1 ton sıvı ham demir (SHD) üretimi için 150 kWh/ton enerji gereksinimi vardır. Çalışma yapılan 2500 m<sup>3</sup> hacimli yüksek fırının günlük SHD üretimi 6600 Ton/gün olduğuna göre enerji ihtiyacı: 150x6600=990 000 kWh=990 MWh olarak hesaplanabilir.

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

Eğer türbinden geçen gaz sabit özgül ısıya sahip ideal bir gaz olarak modellenebilirse, izentropik iş Eşitlik 12 ile hesaplanabilir [15].

$$W_{izentropik} = [(kRT_1)/(k-1)] \times [1 - (P_2/P_1)^{(k-1)/k}] \quad (12)$$

Eşitlik 7 ve eşitlik 12'nin birlikte çözümü sonucunda TBT çıkış gücü hesaplanabilir.

$$P = \frac{(kRT_1)}{(k-1)} \times (1 - (P_2/P_1)^{(k-1)/k}) \dot{m} \eta_T \eta_G \quad (13)$$

Burada,  $R$  evrensel gaz sabitidir ve değeri 7.82x10<sup>-5</sup> kWh/kgK olarak alınabilir [16]. Adyabatik indis ya da özgül sıcaklık oranı olarak da adlandırılan ısı kapasitesi katsayısı ( $k$ ), sabit basıncıdaki ısı kapasitesinin sabit hacimdeki ısı kapasitesine oranıdır.  $P$  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  $\dot{m}$  : 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/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Örnek TBT sisteminde  $\eta_T$ ,  $\eta_G$  çarpımı 0.86 olarak hesaplanmıştır.  $\eta_T$ ,  $\eta_G$  ise türbin verimi ile jeneratör veriminin çarpımıdır. Yüksek fırının sürekli koşullarda çalıştığı

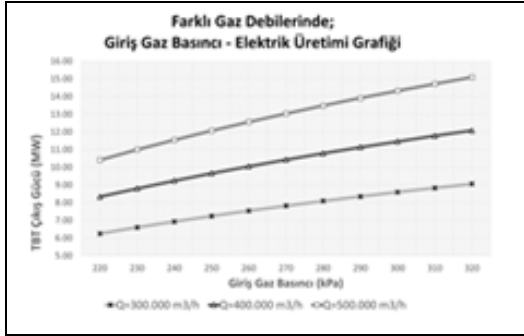


durumlara göre ortalama güç üretimi, türbin giriş basıncı, türbin giriş gaz sıcaklığı ve yüksek fırın gazı debisi aşağıda verilmiştir: TBT üretimi ortalaması, 10.52 MW/h, TBT giriş basıncı, 297 kPa (mutlak basınç), TBT Giriş Sıcaklığı, 325,5 K ve Gaz Debisi ise 395 000 m<sup>3</sup>/h'tir.

Bu veriler ışığında TBT ile günlük geri kazanımı yapılabilecek enerji miktarı: 10.52 x 24=252.48 MWh (yüzdesele olarak (252.48/990)x100≈%26) olarak hesaplanabilir.

Türbin işletme değişkenlerinin değiştirilmesiyle TBT üretiminin nasıl değişeceği incelenmiştir.

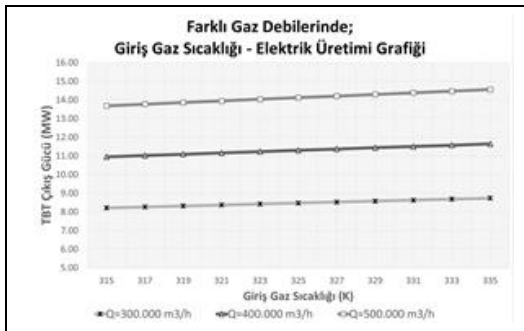
Farklı Gaz Debilerine Göre; Yüksek fırın gazı debisinin 300 000 m<sup>3</sup>/h, 400 000 m<sup>3</sup>/h ve 500 000 m<sup>3</sup>/h olduğu durumlara göre Giriş Basıncı-Elektrik Üretimi, Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi, Çıkış Basıncı-Elektrik Üretimi bu bölümde grafiklerle verilmiştir. Giriş gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin arttığı gözlemlenmektedir. Giriş gaz basıncıyla TBT üretiminin doğru orantılı artışı artan gaz debilerinde de aynı şekilde kendini göstermektedir. Gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h artışı aynı gaz basıncına göre 2.6 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır. Bu durum Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Farklı gaz debilerine göre giriş basıncı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 5. Inlet pressure-electricity production graph according to different gas flow rates.

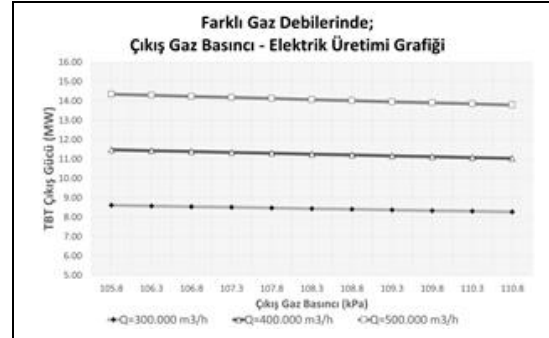
Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminin az miktarda arttığı gözlemlenmektedir. 20K'lık gaz sıcaklığı artışının 0.6-0.7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı gaz sıcaklığında gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h artışı aynı gaz basıncına göre 2.9 MW daha fazla güç üretimine neden olmaktadır. Burada 14.55 MW ile en yüksek üretim değeri gözlemlenmiştir. Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi Grafiği Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Farklı gaz debilerine göre giriş gaz sıcaklığı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 6. Graph of inlet gas temperature-electricity production according to different gas flow rates.

Çıkış gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin azaldığı, aralarında ters orantı olduğu gözlemlenmektedir. Aynı türbin çıkış basıncında, gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h artışı 2.8 MW daha fazla güç üretimine neden olduğu Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Farklı gaz debilerine göre çıkış gaz basıncı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 7. Output gas pressure-electricity production graph according to different gas flow rates.

Farklı Çıkış Gaz Basıncına Göre; 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. 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 Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz basıncı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 8. Graph of inlet gas pressure-electricity generation according to different outlet pressures.

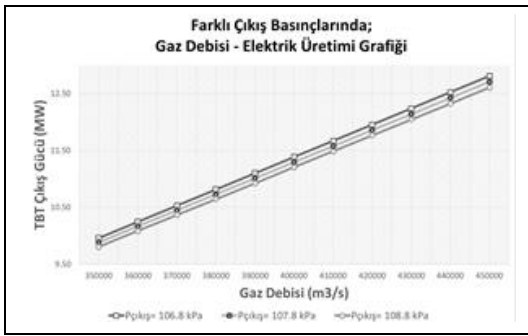
Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminde az miktarda bir artış olduğu gözlemlenmektedir. 20K'lık gaz sıcaklığı artışının 0.6-0.7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bununla birlikte türbin çıkış basıncındaki artışın, elektrik üretimini az miktarlarda da olsa azalttığı görülmüştür. Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi Grafiği Şekil 9'de verilmektedir.

Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h artışı elektrik üretimini 2.6 MW arttırmakta, TBT çıkış basıncının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha düşük üretim değerleri elde edildiği Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 9. Farklı çıkış basınçlarına göre giriş gaz sıcaklığı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 9. Graph of inlet gas temperature-electricity generation according to different outlet pressures.

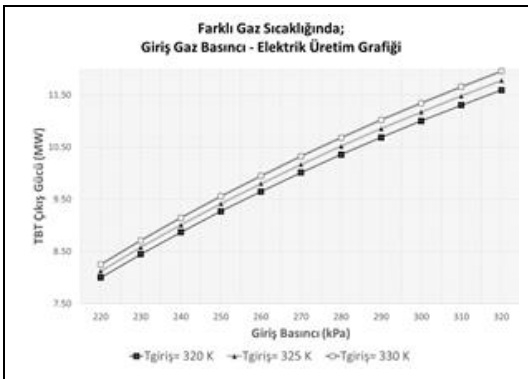


Şekil 10. Farklı çıkış basınçlarına göre gaz debisi-elektrik üretimi grafiği.

Figure 10. Gas flow-electricity production graph according to different outlet pressures.

Farklı Gaz Sıcaklığına Göre: TBT gaz giriş sıcaklığının 5° 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.

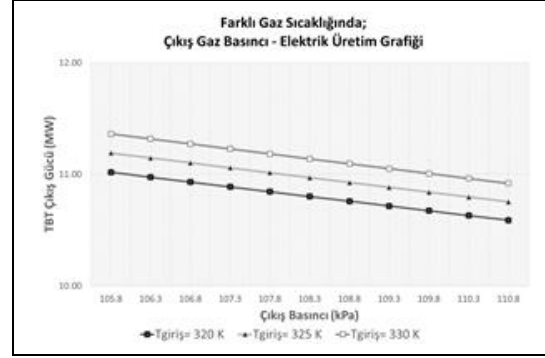
Giriş gaz basıncının artmasının TBT üretimine ciddi bir katkısının olduğu görülmektedir. Giriş basıncının 100 kPa artmasıyla, TBT üretiminin yaklaşık 3.6 MW arttığı hesaplanmıştır. Bununla birlikte gaz sıcaklığındaki artışın, elektrik üretimini az miktarlarda da olsa arttırdığı Şekil 11'de görülmüştür.



Şekil 11. Farklı gaz sıcaklıklarına göre giriş gaz basıncı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 11. Graph of input gas pressure-electricity production according to different gas temperatures.

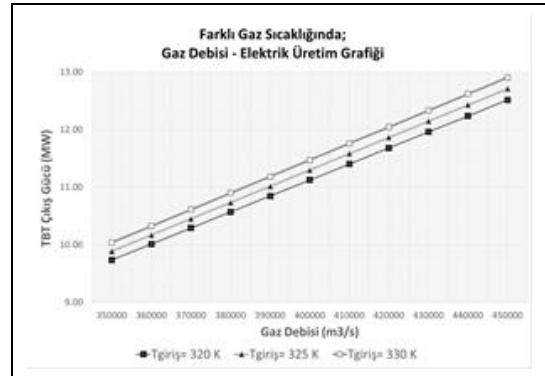
Çıkış Basıncının TBT üretimiyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretimi artış gösterse de farklı gaz sıcaklıklarında çıkış basıncı-TBT üretim ilişkisi benzerlik göstermektedir. Çıkış Gaz Basıncı-Elektrik Üretimi Grafiği Şekil 12'te verilmiştir.



Şekil 12. Farklı gaz sıcaklıklarına göre çıkış gaz basıncı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 12. Output gas pressure-electricity production graph according to different gas temperatures.

Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h artışı elektrik üretimini 2.6 MW arttırmakta, gaz sıcaklığının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha yüksek üretim değerleri elde edildiği Şekil 13'te görülmektedir.

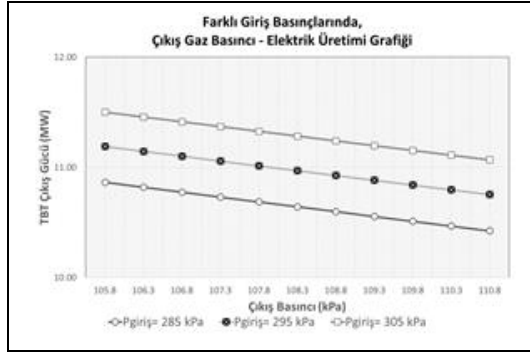


Şekil 13. Farklı gaz sıcaklıklarına göre gaz debisi-elektrik üretimi grafiği.

Figure 13. Gas flow-electricity production graph according to different gas temperatures.

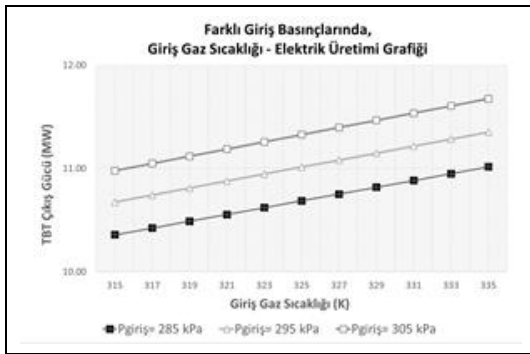
Farklı Giriş Basıncına Göre; TBT giriş basıncının 285 kPa, 295 kPa ve 305 kPa olduğu durumlara göre Çıkış Basıncı-Elektrik Üretimi, Giriş Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi, Gaz Debisi-Elektrik Üretimleri ele alınmıştır. Çıkış Basıncının TBT üretimiyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Gaz giriş basıncının artmasıyla TBT üretimi artış gösterse de farklı gaz sıcaklıklarında Çıkış basıncı-TBT üretim ilişkisi benzerlik Şekil 14'te gösterilmektedir.

Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla TBT üretiminde az miktarda bir artış olduğu görülmektedir. 20<sup>K</sup>'lık gaz sıcaklığı artışının 0.6-0.7 MW civarında bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bununla birlikte türbin giriş basıncındaki artışın, elektrik üretimini arttırdığı görülmüştür. Aynı sıcaklık değerinde 10 kPa'lık giriş basıncının artışı, TBT üretiminin 0.3 MW artmasına neden olmaktadır. Gaz Sıcaklığı-Elektrik Üretimi Grafiği Şekil 15'te görülmektedir.



Şekil 14. Farklı giriş basınçlarına göre çıkış basıncı-elektrik üretimi grafiği.

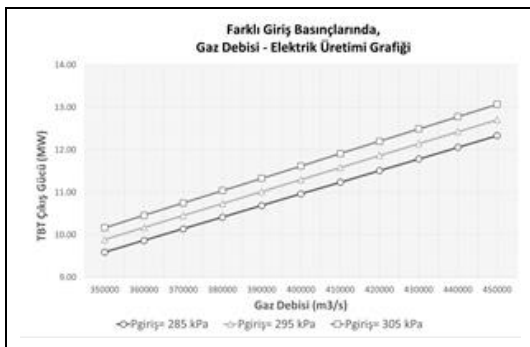
Figure 14. Output pressure-electricity production graph according to different inlet pressures.



Şekil 15. Farklı giriş basınçlarına göre gaz sıcaklığı-elektrik üretimi grafiği.

Figure 15. Gas temperature-electricity generation graph according to different inlet pressures.

Gaz debisinin artmasıyla TBT üretimindeki artışın doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h. artışı elektrik üretimini 2.6 MW arttırmakta, giriş gaz basıncının artmasıyla aynı gaz debilerinde daha yüksek üretim değerleri elde edildiği Şekil 16'da görülmektedir.

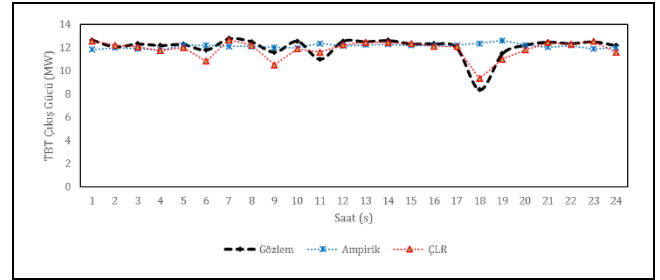


Şekil 16. Farklı giriş basınçlarına göre gaz debisi-elektrik üretimi grafiği.

Figure 16. Gas flow-electricity production graph according to different inlet pressures.

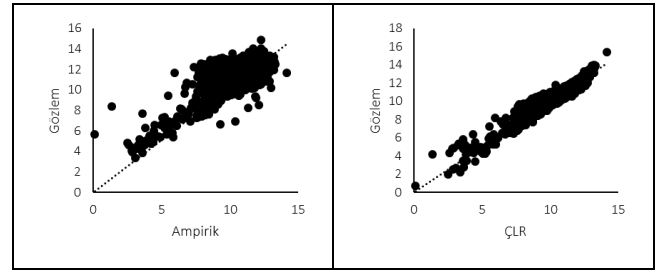
Bu çalışmada kayıt altına alınan TBT çıkış gücü ölçümleri ampirik olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber baz alınan parametrelere bağlı olarak ÇLR modeli ile ayrıca TBT çıkış gücü hesaplanmıştır. Model olarak ÇLR, ampirik modele göre daha yüksek uyum göstererek gerçek değerleri tahmin etmede daha başarılı olmuştur. Gün bazında TBT çıkış gücü: Gözlem, Ampirik

ve ÇLR modellerinin karşılaştırılması Şekil 17'de görülmektedir. TBT çıkış gücü: Gözlem, Ampirik ve ÇLR modellerinin saçılım grafikleri ise Şekil 18'de verilmektedir.



Şekil 17. Gün bazında TBT çıkış gücü: Gözlem, Ampirik ve ÇLR modellerinin karşılaştırılması.

Figure 17. TRT output power on a daily basis: Comparison of Observation, Empirical and MLR models.



Şekil 18. TBT çıkış gücü: Tüm veri için Gözlem, Ampirik ve ÇLR modellerinin saçılım grafikleri.

Figure 18. TRT output power: Scatter plots of Observation, Empirical and MLR models for all data.

TBT çıkış gücü gözlem değerleri ile Ampirik ve ÇLR modellerinin tahminleri arasında performans değerleri incelendiğinde ÇLR model 0.9205 değeri ile daha yüksek R<sup>2</sup> değerine ulaştığı bu durumun MSE değerleri ile uyumlu olduğu Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. TBT çıkış gücü için Ampirik ve ÇLR modellerinin performans değerleri.

Table 2. Performance values of Empirical and MLR models for TRT output power.

Model	Performans Ölçütü		
	MSE	MAPE	R <sup>2</sup>
Ampirik	0.6038	% 3.65	0.9168
ÇLR	0.1807	% 3.62	0.9205

#### 4 Sonuçlar

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. 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 ÇLR modelinin tahmin ettiği değerleri hata değerlendirme kriterleri kıyaslanmıştır. Bu çalışmada örnek bir işletmede bulunan Yüksek Fırın Tepe-Basıncı Türbin Sistemi (TBT) tarafından gerçekleştirilen elektrik enerjisi üretimi incelenmiş olup aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Giriş gaz basıncının artmasıyla TBT üretiminin arttığı gözlemlenmektedir. Gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h. 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'lık gaz sıcaklığı artışının 0.6-0.7 MW civarında bir artışa sebep olurken aynı gaz sıcaklığında gaz debisinin 100 000 m<sup>3</sup>/h. 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 m<sup>3</sup>/h 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 m<sup>3</sup>/h artışı elektrik üretimini 2.6 MW arttırmakta, TBT çıkış basıncının artması durumunda aynı gaz debilerinde daha düşük üretim değerleri gerçekleşmiştir, 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 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.

## 5 Conclusions

In this study, in the blast furnace top pressure recovery turbine system (TRT) process in a sample plant, the TRT system was investigated by using the data of a blast furnace-gas cleaning system and a TRT system connected to it. The production values of this TRT system were calculated empirically and an MLR model was estimated. Finally, system observation values, empirical values and values predicted by the MLR model were compared.

In this study, the production of electrical energy produced by TRT in an exemplary facility was examined and the results given below were obtained.

- It is observed that TRT production increases with increasing inlet gas pressure. An increase in gas flow rate of 100 000 m<sup>3</sup>/h results in 2.6 MW more power generation than the same gas pressure,
- It is observed that TRT production increases slightly with increasing inlet gas temperature. While the increase in gas temperature of 20 K causes an increase of around 0.6-0.7 MW, an increase of 100 000 Nm<sup>3</sup>/hour of gas flow at the same gas temperature causes 2.9 MW more power production,
- As the output gas pressure increases, TRT production is reduced and at the same turbine outlet pressure, an increase of 100 000 m<sup>3</sup>/h of gas flow causes 2.8 MW more power generation,

- It was calculated that TRT production increased by approximately 3.6 MW with an increase in inlet pressure of 100 kPa,
- The increase in gas flow by 100.000 m<sup>3</sup>/h increases the electricity production by 2.6 MW, and when the output pressure of the TRT increases, the same gas flows have lower production values. There is a slight increase in TRT production as the inlet gas temperature increases,
- An increase in the inlet pressure of 10 kPa at the same inlet gas temperature leads to an increase of 0.3 MW in TRT production,
- When the performance values between the TRT output power observation values and the estimations of the Empirical and MLR models were examined, the MLR model was found to have higher estimation capability with 0.9205 value.

## 6 Kaynaklar

- [1] Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. "Demir Çelik ve Enerji Verimliliği". <http://celik.org.tr/cemtas-celik-makina-sanayi-ve-ticaret-a-s> (27.07.2019).
- [2] TMMOB Makina Mühendisleri Odası. "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Verimliliği Oda Raporu". Ankara, Türkiye, 10-30, 2008.
- [3] Odabaş M, Çay Y, Kılınç E. "Yüksek Fırınlarda Enerji Verimliliği Analizi: Kardemir AŞ. Örneği". *ISITES*, Karabük, Türkiye, 18-20 Haziran 2014.
- [4] Wu P, Yang J. "Identification and control of blast furnace gas top pressure recovery turbine". *Unit ISIJ International*, 52(1), 96-100, 2012.
- [5] Jian L, Gao C, Xia Z. "Constructing multiple kernel learning framework for blast furnace automation". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4),763-777, 2012.
- [6] Priya SS, Patil R.G. "BF gas utilization and power generation in steel plant using Trt". *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 2(7), 79-82, 2014.
- [7] Jianqi A, Junyiu Y, Min W, Xiongbo W. "A modeling and closed-loop identification method based on RLS for top pressure in blast furnace". *35<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, Chinese, 27-29 July 2016.
- [8] Aktaş C. "Türkiye'nin turizm gelirini etkileyen değişkenler için en uygun regresyon denkleminin belirlenmesi". *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6(2), 163-174, 2011.
- [9] Özdemir Ö, Özaraç U. "Demir-Çelik Metalürjisi". Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, Ders Notu, 60, 2019.
- [10] Liu, X, Gao X. "A survey analysis of low carbon technology diffusion in China's iron & steel industry". *Journal of cleaner production*, 129, 88-101, 2016.
- [11] Kuşoğlu S. "Yüksek Fırın Tepe Basıncı Türbini (tbt) Kullanılarak Enerji Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2017.
- [12] 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).



- [13] Aksu N. "Referans evapotranspirasyonun zaman, konum, bağıl nem ve rüzgâr hızı girdileri kullanılarak yapay sinir ağlarıyla tahmin edilmesi". *Uludađ Üniversitesi Ziraat Fakóltesi Dergisi*, 30(1), 75-87, 2016.
- [14] Liu JX. "Energy saving analysis by comparing tubo-driven BF blast system with electro-driven one". *Iron Steel Technology*, 5, 53-54, 2008.
- [15] Kanođlu M, Çengel Y, Dinçer İ. *Efficiency Evaluation of Energy System*. 1<sup>nd</sup> ed. New York, USA, Springer, 2012.
- [16] The Industrial Efficiency Technology Database (IETD), "Top Pressure Recovery Turbines". <http://ietd.iipnetwork.org/content/top-pressure-recovery-turbines> (23.04.2018).