



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Yoğuşmalı ısı geri kazanım cihazlarının tasarımına çığlenme noktası sıcaklıklarının etkisinin yakıt tiplerine göre araştırılması

## *Investigation of effect of dew point temperatures on design of condensing heat recovery units according to fuel types*

*Yazar(lar) (Author(s)): Meryem TERHAN*

*ORCID: 0000-0001-7556-9240*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Terhan M., “Yoğuşmalı ısı geri kazanım cihazlarının tasarımına çığlenme noktası sıcaklıklarının etkisinin yakıt tipine göre araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 24(1): 31-38, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI: 10.2339/politeknik.627262**

# Yoğuşmalı Isı Geri Kazanım Cihazlarının Tasarımına Çiğlenme Noktası Sıcaklıklarının Etkisinin Yakıt Tiplerine Göre Araştırılması

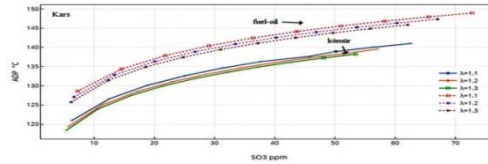
## Investigation of Effect of Dew Point Temperatures on Design of Condensing Heat Recovery Units According of Fuel Types

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Türkiye'deki farklı şehirler ve tüm yakıt tipleri için nemli hava ile yanma analizi yapılmıştır./Combustion analysis with moist air is conducted for all fuel types and some cities in Turkey.
- ❖ Baca gazındaki su buharı ve sülfürik asit çiğlenme noktası sıcaklıkları ve etkileri araştırılmıştır./Dew point temperatures and effects of water and sulphuric acid vapour in flue gas are investigated.
- ❖ Çiğlenme noktası sıcaklıklarının belirlenmesi için yoğuşmalı ekonomizer tasarımı yapılmıştır./A condensing economizer is designed for determining dew point temperatures.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Baca gazındaki sülfürik asit (ADT) ve su buharı (WDT) çiğlenme noktası sıcaklıkları ve etkileri, tüm yakıt tiplerine göre incelenmiştir.



Şekil 3. Kars ili için dönüşüm oranına göre ADT'nin değişimi /Figure 3. Change of ADT according to conversion rate for Kars city

### Amaç (Aim)

Baca gazından ısı geri kazanım uygulamalarında tasarım analizinin başlıca amacı, ısı değiştirici yüzeylerindeki korozyon riski için limitleri ve engelleyici durumları belirlemektir./ The principal aim of design analysis is determined the limits and obstacles to avoid the corrosion risk on the heat exchanger surfaces in the heat recovery applications from flue gas.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Yoğuşmalı ekonomizer tasarım hesaplarında Sonlu Farklar Metodu kullanılmıştır. Baca gazı sıcaklıkları, baca gazındaki % O<sub>2</sub> ve % CO<sub>2</sub> oranları, ortam sıcaklıkları TESTO 340 cihazıyla ölçülmüştür. /In design calculations of condensing economizer was used Finite Difference Method. Flue gas and indoor temperatures and O<sub>2</sub>% and CO<sub>2</sub>% ratios in flue gas were measured by using TESTO 340.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışma tüm yakıt tipleri için baca gazındaki su ve sülfürik asit çiğlenme noktası sıcaklıklarının her ikisini birden araştırması bakımından özgünlük değeri yüksek bir çalışmadır./This study has a high originality value in terms of investigating both water and sulfuric acid dew point temperatures in the flue gas for all fuel types.

### Bulgular (Findings)

Su buharı çiğlenme noktası sıcaklıkları (WDT) kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz ve LPG için sırasıyla 30-40 °C, 40-50 °C, 37-50 °C, 44-60 °C ve 41-56°C aralığında değişmektedir./ The water dew point temperature changes for coal, wood, fuel oil, natural gas and LPG, over the range 30-40 °C, 40-50 °C, 37-50 °C, 44-60 °C and 41-56 °C, respectively.

### Sonuç (Conclusion)

Kömür, fuel-oil gibi kükürt içeren yakıtlar için ısı geri kazanım uygulamalarında yoğuşma sıvısının ısı değiştiricinin boru malzemesi için çok asidik olmasından dolayı, baca gazı sıcaklığı, ADT'nin altına düşürülmemelidir./ In heat recovery applications for fuels containing sulfur such as coal and fuel-oil, since the condensate liquid is very acidic for the pipe material of the heat exchanger, flue gas temperature should not be cooled below ADT.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler./The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Yoğuşmalı Isı Geri Kazanım Cihazlarının Tasarımına Çiğlenme Noktası Sıcaklıklarının Etkisinin Yakıt Tiplerine Göre Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Meryem TERHAN\***

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.09.2019 ; Kabul/Accepted : 09.02.2020)

## ÖZ

Bu çalışmada Türkiye'deki farklı şehirler ile kömür, fuel-oil, doğalgaz, LPG ve odun gibi yakıt tipleri için baca gazındaki su ve sülfürik asit buharlarının çiğlenme noktası sıcaklıkları incelenmiştir. Baca gazındaki su ve sülfürik asit buharının mol oranları ve çiğlenme noktası sıcaklıklarını etkileyen hava fazlalık katsayısı, bağıl nem oranı, şehrin rakımı gibi faktörler araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; su buharı çiğlenme noktası sıcaklıkları kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz ve LPG için sırasıyla 30-40°C, 40-50°C, 37-50°C, 44-60°C ve 41-56°C aralıklarında; asit çiğlenme noktası sıcaklıkları ise kömür tipleri için 140 °C'den 125°C'ye; fuel-oil tipleri için 145°C'den 131°C'ye değişim göstermektedir. Yoğuşmanın başlayacağı bölgeyi kurulum öncesinde belirleyebilmek için bir ısıtma sistemindeki doğalgaz yakıtlı kazan için Sonlu Farklar Metodu kullanılarak bir yoğuşmalı ekonomizer tasarımı yapılmıştır. U-dönüştürücü ve karşıt akımlı boru demetlerinden oluşan yoğuşmalı ekonomizerin akış boyunca ilk 100 m'sinde herhangi bir yoğuşma yokken; sadece 10 m'lik kısmında yoğuşma gözlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıtlar, çiğlenme noktası sıcaklığı, yoğuşmalı ısı geri kazanım üniteleri, yoğuşmalı ekonomizer.

## Investigation of Effect of Dew Point Temperatures on Design of Condensing Heat Recovery Units According to Fuel Types

### ABSTRACT

In this study, dew point temperatures of water and sulphuric acid vapour in flue gas are predicted as theoretical for fuels types such as coal, fuel oil, natural gas, LPG, wood with the different cities in Turkey. The factors like the excess air coefficient, relative humidity rate and the altitude of the city affected by the dew point temperatures and the mole ratios of water and sulphuric acid vapour in flue gas are studied. According to the results of the study, while the water dew point temperature changes for coal, wood, fuel oil, natural gas and LPG, over the range 30-40 °C, 40-50 °C, 37-50 °C, 44-60 °C and 41-56 °C, respectively; the acid dew point temperature waves to 125 °C from 140 °C for coal types and to 131 °C from 145 °C for fuel oil types in Turkey. To predict the condensing zone, a condensing economizer for a natural gas-fired boiler in a heating system is designed with Finite difference method. According to the results of the design, while the first 100 m of the heat exchanger tube is non-condensing zone, the only 10 m is the condensing zone.

**Keywords:** Fuels, acid dew point temperature, heat recovery units, condensing economizer.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yakıtın bir kazanda fazla hava ile tam yanması sonucunda ortaya çıkan baca gazı içeriğinde H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> mevcuttur. Baca gazından ısı geri kazanım uygulamalarında, baca gazındaki sülfürdioksit su buharıyla reaksiyona girerek sülfürik asiti açığa çıkarır. Baca gazı içerisindeki su ve sülfürik asit buharı, ısı değiştiricisindeki soğuk yüzeylere temas ettiği zaman sıcaklıkları, çiğ noktası sıcaklıkları altına düşerse su ve sülfürik asit buharları yoğuşmaya başlar. Yoğuşan çözelti oldukça asidik olduğundan ısı değiştirici yüzeyleri üzerinde düşük sıcaklık korozyonu denilen korozyon tipine neden olur [1-2].

Bu nedenle su ve sülfürik asit buharının çiğlenme noktalarının önceden bilinmesi, gizli ısı geri kazanım ünitelerinin tasarımında çok önemlidir. Kazanlar için gizli ısı geri kazanım üniteleri tasarım hesaplarında üç önemli konunun detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Bunlar; yakıt içeriğindeki sülfür miktarı, hava fazlalık katsayısı ve giriş besleme suyunun sıcaklığıdır [3].

Yanma sonucunda baca gazı içerisinde SO<sub>2</sub>'nin % 1-5'i, SO<sub>3</sub>'e ve baca gazı çıkış sıcaklığı 176 °C'den düşük olduğunda ise baca gazındaki tüm SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'e dönüşür. Baca gazı içerisinde sülfürik asit miktarı, 5-50 ppm gibi düşük bir oranda olsa bile asit çiğlenme noktası için çok önemlidir [1].

Baca gazı sıcaklığı çiğlenme noktası sıcaklığına ulaştığı zaman ısı değiştirici içerisindeki boru demetleri üzerinde

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : meryem.terhan@gumushane.edu.tr

su ve sülfürik asit buharı yoğuşur. Sülfürik asidin çığlenme noktası, su buharının çığlenme noktasından daha yüksektir. Dolayısıyla, baca gazındaki sülfürik asit buharı su buharından daha önce yoğuşur. Yoğuşmalı ısı değiştirici tasarım hesaplarında yoğuşmanın meydana geleceği alanı önceden belirlemek için boruların dış duvar sıcaklıklarındaki değişimler hesaplanmalıdır. Isı değiştirici içerisindeki borunun dış duvar sıcaklığı, çığlenme noktası sıcaklığına ulaştığında yoğuşma başlar. Yoğuşma, ısı değiştirici boru demetlerinin dış yüzeyinde hızlı bir şekilde korozyona sebep olur; bu da boru malzemesinde ciddi bir bozulma yaratır. Bu sebepten ötürü, özellikle endüstriyel alanlar için çığ noktasının önceden bilinmesi daha önemli olmaktadır [4]. Atık ısı değiştiricileri, kimya sanayi, petrol, ilaç sanayi ve güç santralleri gibi endüstriyel alanlarda baca gazından atık ısıyı geri kazanarak yakıt tasarrufu sağladıkları için önemli bir rol oynamaktadır. Isı değiştirici boruları üzerinde meydana gelen korozyonlardan biri de, baca gazındaki soğuma sonucu yoğuşmanın neden olduğu düşük sıcaklık korozyonudur [5].

Literatürde konu ile ilgili bazı çalışmalar özetlenirse; Wei vd. [1] kömür yakıtlı bir güç santrali için ısı geri kazanım ünitelerindeki asit çığlenme noktasının teorik olarak önceden tahmin edilmesini incelemişlerdir. Xiang vd. [2] asit çığlenme noktası sıcaklığını önceden belirlemek için bir model içeren bir çalışma yürütmüşlerdir. Daha önce yapılan çalışmaları kullanarak asit çığlenme noktası tahmini üzerine yeni bir formül üretmişlerdir. Blanco ve Pena [3] bir güç santralinden alınan verileri kullanarak ısı geri kazanım ünitesinin asit çığlenme noktası sıcaklığını önceden belirlenmesi ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında, yakıt tiplerine göre asit çığlenme noktasını incelemişlerdir. Yine, Pena ve Blanco [4] farklı bir çalışmada da bir ekonomizer içerisindeki çığlenme noktasını önceden belirlemek için bir metod geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, doğalgaz içerisinde hemen hemen ölçülemeyecek miktarda sülfür içeriğinden dolayı sadece su buharı çığlenme noktasının tahmini yapılmıştır. Ding vd. [5] çalışmalarında bir firma için kazanın ekonomizer boruları üzerindeki çığlenme noktası korozyonunu (düşük sıcaklık korozyonu) analiz etmişlerdir. Analiz sonucunda firmaya ağır korozyona uğramış eski boruların 304 paslanmaz çelik borularla yenilenmesi, sülfürik asit yoğuşmasını yok etmek için kazana bir desülfürizasyon ünitesi eklenmesinin gerektiği, baca gazındaki sülfür ve nem içeriğinin izlenmesi, düşük sıcaklık korozyonundan kaçınmak için baca gazı sıcaklığının yükseltilmesi gibi tavsiyelerde bulunmuşlardır. Han vd. [6] ısı geri kazanım ünitelerinde boru malzemesinin yüzeyinde asit yoğuşma hızını önceden tahmin etmek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre baca gazının sıcaklığını artırmak yoğuşma hızını azaltarak korozyon hasarını azaltmaktadır. Vainio vd. [7] çeşitli yakıtlar için düşük korozyon sıcaklığı ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Bir kazandaki yoğuşmanın neden olduğu düşük sıcaklık korozyonunun sebebini araştırmışlardır. Zarenezhad ve

Aminian [8] asit çığlenme noktalarını tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Asit çığlenme noktasının baca gazındaki SO<sub>3</sub> oranına önemli ölçüde bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Li vd. [9] baca gazındaki asit çığlenme noktası sıcaklığını belirlemek için bir formül ortaya koymuşlardır. Shi vd. [10] kömür yakıtlı bir kazandaki ısı geri kazanım ünitelerindeki boru malzemesinin yüzeyindeki düşük sıcaklık korozyonunu araştırırken; Chantana ve Kumar [11] ise doğalgaz yakıtlı bir kazan için baca gazındaki su buharının yoğuşmasını önceden belirlemek için çalışmalar yürütmüşlerdir. Chen vd. [12] 40 MW kapasiteli bölgesel ısıtma sistemi için bir ısı geri kazanım ünitesi tasarımı yapmışlardır.

Bu çalışmada Türkiye'deki farklı şehirler ile kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz, LPG gibi çeşitli yakıtlar için nemli hava ile yanma analizi yapılmıştır. Yanma etkileri, yakıt tipleri için farklı hava fazlalık katsayısı kullanarak incelenmiştir. Baca gazındaki sülfürik asit (ADT) ve su buharı (WDT) çığlenme noktası sıcaklıkları, Türkiye'deki farklı şehirler ve çeşitli yakıt tiplerine göre belirlenmiştir. Çığlenme noktasına ve baca gazındaki su ve sülfürik asit buhar konsantrasyonuna etki eden hava fazlalık katsayısı, bağıl nem oranı ve şehrin rakımı gibi çeşitli faktörler araştırılmıştır. Yoğuşmanın başlayacağı bölgeyi kurulum öncesinde belirleyebilmek için 2.500.000 kcal/h kapasiteli doğalgaz yakıtlı bir kazan için Sonlu Farklar Metodu kullanılarak bir yoğuşmalı ekonomizer tasarımı yapılmıştır. U-dönümlü ve karşıt akımlı boru demetlerinden oluşan yoğuşmalı ekonomizerin giriş boyunca akış doğrultusunda tek boyutlu olarak 500 hücreye ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan her hücredeki ısı transfer hızları, baca gazı ve boru duvar sıcaklıkları, baca gazındaki su buharı ve diğer gazların mol oranları hesaplanmıştır.

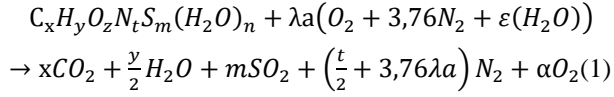
## 2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada aşağıda verilen varsayımlar yapılmıştır.

- Kütle ve enerji denklemleri, sürekli akışlı açık sistem için elde edilmiş olup potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Kazandan çıkan baca gazları ideal gaz olarak ele alınmıştır.
- Yanma analizinde kazandaki yanma reaksiyonu, nemli hava ile tam yanmadır.
- Yoğuşmalı ekonomizerdeki akış, bir boyutlu sürekli karşıt akıştır.
- Baca gazları tarafında iki fazlı akış ve soğuk su tarafında tek fazlı akış mevcuttur.
- Isı değiştirici boru duvar yüzeyinde film yoğuşma mevcuttur.
- Doğalgaz yakıtlı kazandan çıkan baca gazında H<sub>2</sub>O(g), O<sub>2</sub>(g), CO<sub>2</sub>(g), N<sub>2</sub>(g) vardır. Kükürt mevcut değildir.

## 2.1. Bir Kazandaki Yakıt Tiplerine Göre Yanma Analizi (Combustion Analysis In A Boiler According To Fuel Types)

Kazanlarda yakıt olarak kullanılan fuel-oil; hidrokarbonlar, kükürt, oksijen, azot ve nem içerir. Bir kazanda fuel-oil'in yakıt olarak nemli hava ile ve tam yanma reaksiyonu aşağıda verilmiştir:



$$a = x + \frac{y}{4} - \frac{n}{2} + m - z \quad (2)$$

$$x = \frac{\%C}{100xMa_C} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (3)$$

$$y = \frac{\%H}{100xMa_H} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (4)$$

$$z = \frac{\%O}{100xMa_O} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (5)$$

$$t = \frac{\%N}{100xMa_N} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (6)$$

$$m = \frac{\%S}{100xMa_S} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (7)$$

$$n = \frac{\%H_2O}{100xMa_{H_2O}} \left( \frac{kmol}{kg \text{ yakıt}} \right) \quad (8)$$

Yukarıda verilen formüllerde, Ma fuel-oil içerisindeki karbon, hidrojen, azot, kükürt ve nemin mol kütlelerini göstermektedir. (1) No'lu eşitlikte verilen,  $\lambda$  ise hava fazlalık katsayısıdır. Baca gazı yani yanma ürünleri ideal gaz olarak alındığından  $\varepsilon$  ve  $\alpha$  aşağıdaki gibi hesaplanabilir [16].

$$\alpha = \frac{z}{2} + \frac{n}{2} + \lambda + a + \left( \frac{\lambda a \varepsilon}{2} \right) - x - \frac{y}{4} - m \quad (9)$$

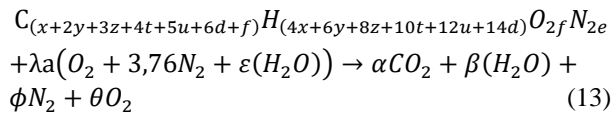
$$\varepsilon = N_{s,hava} = \frac{P_{s,hava}}{P_{atm}} x N_{bg} \quad (10)$$

(9) ve (10) numaralı eşitliklerdeki,  $\varepsilon$  hava içerisindeki nemin mol sayısıdır.  $N_{bg}$  (baca gazının mol sayısı) aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilir. Nemli havanın kısmi basıncını bulmak için, havanın doyma sıcaklığını ve bağıl nem oranını bilmek gerekir.

$$N_{bg} = x + \frac{y}{2} + m + \left( \frac{t}{2} + 3,76 \cdot \lambda \cdot a \right) + \alpha \quad (11)$$

$$P_{s,hava} = \phi_{hava} x P_{doy} \quad (12)$$

Kazanda doğalgazın yakıt olarak nemli hava ile tam yanma reaksiyonu aşağıda gösterilmiştir.



$$a = 2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d \quad (14)$$

$$\alpha = N_{CO_2} = x + 2y + 3z + 4t + 5u + 6d + f \quad (15)$$

$$\beta = N_{H_2O} = 2x + 3y + 4z + 5t + 6u + 7d + (\varepsilon \cdot a \cdot \lambda) \quad (16)$$

$$\phi = N_{N_2} = e + (a \cdot \lambda) \quad (17)$$

$$\theta = N_{O_2} = (a \cdot \lambda) - a \quad (18)$$

$$N_{bg} = N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{N_2} + N_{O_2} \quad (19)$$

## 2.2. Sülfürik Asit ve Su Buharı Çiğlenme Noktası Sıcaklıkları (Dew Point Temperatures of Sulphuric Acid And Water Vapour)

Baca gazı ideal gaz olarak varsayıldığı için su buharının çiğlenme noktası sıcaklığı (WDP) ve su buharının kısmi basıncı aşağıda verilen eşitlik ve ampirik formülle bulunabilir [17].

$$P_{H_2O} = \frac{N_{H_2O}}{N_{bg}} x P_{atm} \quad (20)$$

$$T_{WDP} = 0,0011733333(P_{H_2O})^3 - 0,0942(P_{H_2O})^2 + 3,429666667(P_{H_2O}) + 19,76 \quad (21)$$

Yanma sonucunda baca gazı içerisinde  $SO_2$ 'nin % 1-5'i  $SO_3$ 'e ve baca gazı sıcaklığı  $176^\circ C$ 'den düşük olduğunda ise baca gazındaki tüm  $SO_3$ ,  $H_2SO_4$ 'e dönüşür. Asit çiğlenme noktasını (ADP) belirlemek için Okkes-B'nin eşitliği kullanılmış olup (23) numaralı eşitlikte verilmiştir [2].



$$T_{ADP} = 203,25 + 27,6 \cdot \lg P_{H_2O} + 10,83 \cdot \lg P_{H_2O} + 1,06 \cdot (\lg P_{SO_3} + 8)^{2,19} \quad (23)$$

(23) numaralı eşitlikte verilen formülde basınç birimi atm'dir. Odun, doğalgaz ve LPG içeriğinde kükürt eser miktarda olduğundan dolayı yanma sonucunda sülfürik asit buharı oluşmaz.

## 3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada Türkiye'deki farklı şehirler ile kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz, LPG gibi çeşitli yakıtlar için nemli hava ile yanma analizi yapılmıştır. Yanma etkileri, yakıt tipleri için farklı hava fazlalık katsayısı kullanarak incelenmiştir. Baca gazındaki sülfürik asit (ADT) ve su buharı (WDT) çiğlenme noktası sıcaklıkları, Türkiye'deki farklı şehirler ve çeşitli yakıt tiplerine göre belirlenmiştir. Çiğlenme noktasına ve baca gazındaki su ve sülfürik asit buharı konsantrasyonuna etki eden hava fazlalık katsayısı, bağıl nem oranı ve şehrin rakımı gibi çeşitli faktörler araştırılmıştır. Ayrıca, Kafkas Üniversitesi Paşacayır kampüsünün bölgesel ısıtma sisteminin kazanları için tasarlanan yoğuşmalı ekonomizerde baca gazındaki su ve sülfürik asit buharının çiğlenme noktalarının belirlenmesi incelenmiştir. Paşacayır kampüsünün ısıtma ihtiyacını 2.500.000 kcal/h kapasiteli 3 adet doğalgaz yakıtlı kazan karşılamaktadır. Sistemin yıllık yakıt tüketimi 885.460,1 m<sup>3</sup> civarındadır. Yanma analizi için doğalgazın kimyasal bileşim ölçüm verileri bölgesel doğalgaz şirketinden temin edilmiştir.

Kazandan çıkan baca gazındaki su buharının çiğlenme noktası sıcaklığını belirlemek için bir yoğuşmalı ekonomizer tasarlanmıştır. Kazandan çıkan baca gazı sıcaklıkları, baca gazındaki %  $O_2$  ve %  $CO_2$  oranları, ortam sıcaklıkları TESTO 340 cihazıyla ölçülmüştür. Bu cihazla entegre kullanılabilen Pitot tüpüyle ölçülen basınç farkından baca gazının hızı hesaplanmıştır.

Yoğuşmalı ekonomizerin tasarım hesaplarında Sonlu Farklar Metodu kullanılmıştır. Boru boyunca ayrıştırılan hücrelerde analiz yapılarak ekonomizerdeki yoğuşmalı ve yoğuşmasız bölge belirlenmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESULTS)

Fuel-oil yanma analizinde, Türkiye’de kullanılan fuel-oil tiplerine göre Çizelge 1’de kütleli olarak verilen kimyasal bileşim oranları kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Türkiye’de kullanılan fuel-oillerin kimyasal bileşimleri (The chemical composition of the fuel oil used in Turkey)

Tip	% C	% H	% O	% N	% S
1 nolu Fuel oil (41,5° API)	86,4	13,6	0	0	0
2 nolu Fuel oil (33° API)	87,2	12,58	0	0	0,22
4 nolu Fuel oil (23,2° API)	86,62	11,54	0,27	0,24	1,33
Çok kükürtlü 6 nolu Fuel oil (12,8° API)	87,69	10,54	0,64	0,28	0,85
Az kükürtlü 6 nolu Fuel oil (15,5° API)	84,48	11	0,38	0,18	3,96

Nemli hava ile yanma analizinde nemli havanın mol oranı, bağıl nem oranıyla değişmektedir. Çizelge 2’de analiz için seçilen farklı şehirlerin atmosfer basınçları, rakımları ve ortalama bağıl nem oranları verimştir.

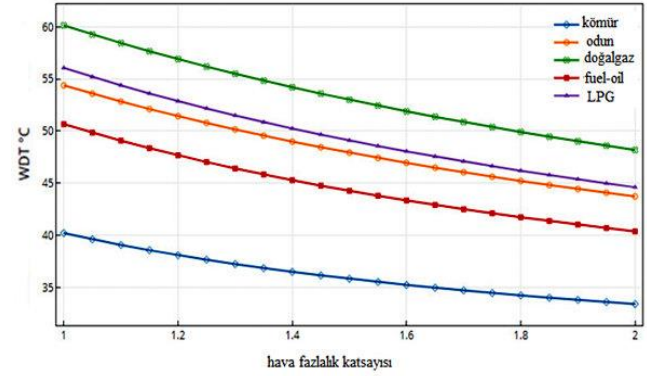
**Çizelge 2.** Analizde kullanılan şehirlerin özellikleri (Characteristics of cities used in analysis)

Şehir	Trabzon	Bursa	Ankara	Kayseri	Kars
Bağıl nem %	69,41	70,34	59,95	61,62	73,48
Rakım (m)	0	201	938	1054	1768
Atmosfer basıncı (kPa)	101,325	98,93	90,56	89,29	81,81

Hava fazlalık katsayısı arttığı zaman baca gazındaki O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve N<sub>2</sub> yüzdeleri yükselirken; CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> yüzdeleri azalır. Baca gazındaki su buharının mol kesri, su buharının çığlenme noktası sıcaklığını belirlemek için önemli bir rol oynar. Baca gazındaki çığlenme noktası sıcaklığı, şehrin rakımı ve hava fazlalık katsayısı ile değişmektedir. Şehrin rakımı arttığı zaman atmosfer basıncı düşer. Daha düşük atmosfer basıncı, daha düşük kısmi basınca ve daha düşük su buharı çığlenme noktası anlamına gelir. Su buharı çığlenme noktası sıcaklığı (WDT), rakımı en düşük olan Trabzon şehri için en

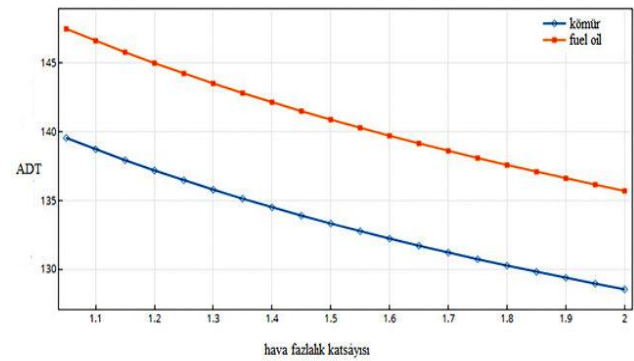
yüksek değerdedir. Ayrıca, WDT hava fazlalık katsayısının artmasıyla azalmaktadır. Asit çığlenme noktası sıcaklığı (ADT) da aynı etkilere sahiptir.

Analiz sonuçlarına göre, WDT fuel-oil tipleri için 37-50 °C, kömür tipleri için 30-40 °C aralığında değişmektedir. Şekil 1 ile Şekil 2’de şehrin rakımına göre çalışmada kullanılan tüm yakıt tipleri için WDT and ADT değişimleri verilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi, WDT doğalgazda en yüksek değerindedir.



**Şekil 1.** Tüm yakıt tipleri için WDT’nin hava fazlalık katsayısıyla değişimleri (Changes of WDT with air excess coefficient for all fuel types)

Kömür, fuel-oil gibi kükürt içeren yakıtlar için ısı geri kazanım uygulamalarında WDT’den ziyade ADT’nin önceden tahmini daha önemlidir. Baca gazı sıcaklığı ADT’den aşağıya düştüğünde baca gazındaki sülfirik asit buharı yoğuşmaya başlar. Yoğuşma sıvısının pH’ı 3 civarındadır ve ısı değiştiricinin boru malzemesi için çok asidiktir [4]. Bu nedenden ötürü, yoğuşmalı ısı değiştiricilerinde korozyona daha dirençli boru malzemesi kullanılmalı ya da baca gazı sıcaklığı, ADT’nin altına düşürülmemelidir.



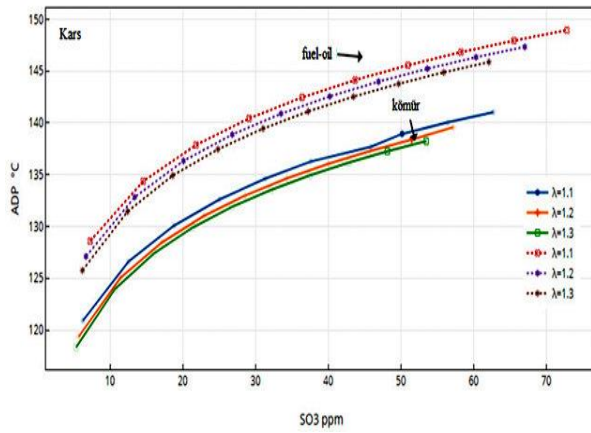
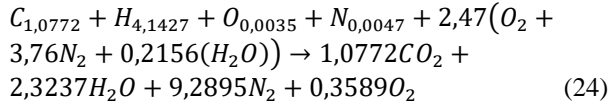
**Şekil 2.** Kükürt içeren yakıt tipleri için ADT’nin hava fazlalık katsayısıyla değişimleri (Changes of ADT with air excess coefficient for sulfur-containing fuel types)

Baca gazındaki SO<sub>2</sub>’nin SO<sub>3</sub>’e % 1-10 arasındaki dönüşüm oranına bağlı olarak ADT değeri yükselir. Kars ili için baca gazındaki SO<sub>3</sub> miktarını (ppm) ve hava fazlalık katsayısıyla ADT’nin değişimi, Şekil 3’te kömür ve fuel-oil gibi yakıt tipleri için gösterilmiştir.

Kars ili için ADT, SO<sub>2</sub>’nin SO<sub>3</sub>’e dönüşüm oranına bağlı olarak kömür için 118-141 °C arasında; fuel-oil için 125-

148 °C arasında değişmektedir. ADT değeri, sabit hava fazlalık katsayısı için SO<sub>2</sub>'nin dönüşüm oranının artmasıyla yükselmektedir.

Doğalgazın yanma analizinde, Çizelge 3'te verilen hacimsel oranda doğalgazın kimyasal içeriği kullanılmıştır. Bu veriler yerel gaz dağıtım firmasından temin edilmiştir. Çizelge 4'te gösterilen sistemden alınan ölçümlere göre doğalgazın kapalı formülü C<sub>1,0772</sub>H<sub>4,1427</sub>N<sub>0,0047</sub>O<sub>0,0035</sub> olarak hesaplanmıştır. Nemli hava ile doğalgazın tam yanma reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



**Şekil 3.** Kars ili için dönüşüm oranına göre ADT'nin değişimi (Change of ADT according to conversion rate for Kars city)

Hava fazlalık katsayısı ve şehrin rakımına bağlı olarak, doğalgaz için çığlenme noktası sıcaklığı 41-60 °C arasında değişmektedir. WDT değeri, hava fazlalık katsayısının artmasıyla azalmaktadır. Trabzon ili deniz seviyesinde olduğu için bu il için WDT, en yüksek değerdedir. Çizelge 5'te seçilen şehirlere göre yakıt tipleri için çığlenme noktası sıcaklıklarının sonuçları özet halinde sunulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, su buharı çığlenme noktası sıcaklıkları (WDT) kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz ve LPG için sırasıyla 30-40 °C, 40-50 °C, 37-50 °C, 44-60 °C ve 41-56°C aralığında değişirken; asit çığlenme noktası sıcaklıkları (ADT) kömür için 125 °C'den 140 °C'ye ve fuel-oil için 131 °C'den 145 °C'ye kadar değişim göstermektedir.

Kafkas Üniversitesi Paşaçayır kampüsü bölgesel ısıtma sisteminden alınan işletme ölçümleri, sistemdeki 2.500.000 kcal/h kapasiteli doğalgaz yakıtlı kazan için bir yoğuşmalı ekonomizer tasarımında kullanılmıştır. Çizelge 6'da gösterildiği gibi, tasarım için gerekli olan kazandan çıkan baca gazı sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, kazana giren yanma havasının sıcaklığı, baca gazı ve soğuk suyun kütleli debisi gibi parametreler sistemden alınan ölçümlerden elde edilmiştir.

**Çizelge 3.** Doğalgazın kimyasal içeriği (Chemical content of natural gas)

(Hacimsel olarak (by volume))	
% Metan (CH <sub>4</sub> )	94,48740
% Ethan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	3,23944
% Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	1,15664
% Butan (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0,5028
% Pentan (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0,14753
% Hekzan (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0,05966
% Azot (N <sub>2</sub> )	0,23275
% Karbondioksit(CO <sub>2</sub> )	0,17339

Yoğuşmalı ekonomizer, U-dönümlü boru demetli tasarlanmış olup boru malzemesi olarak paslanmaz çelik seçilmiştir. Boru içlerinden su akarken yatay boru demetleri üzerinden yukarıdan aşağıya doğru baca gazı akmaktadır.

**Çizelge 4.** Bölgesel ısıtma sisteminden elde edilen veriler (Data obtained from district heating system)

İşletme ölçüm verileri	
Hava fazlalık katsayısı λ	1,17
Baca gazı sıcaklığı °C	175
Yakıt tüketimi m <sup>3</sup> /yıl	885.460,1
Yanma havasının bağlı nem oranı %	72,3

Yoğuşmanın meydana geleceği kısmı belirlemek için Sonlu Farklar Metodu kullanılmıştır ve boru akış boyunca bir boyutlu olarak hücrelere (mesh) ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan her bir hücrede ısı transfer hızları, baca gazı ve suyun sıcaklıkları, boru duvar sıcaklıkları, baca gazındaki su buharı ve diğer yoğuşmayan gazların mol oranları hesaplanmıştır. Tasarım hesap sonuçlarına göre, yoğuşmalı ekonomizer 20 mm dış çapındaki toplam sıralı 110 adet boru demetinden oluşmaktadır. Yoğuşmalı ekonomizerin ısı transfer alanı 6,91 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Çizelge 6'da ısıtma sisteminden alınan veriler ile tasarım sonuçlarının bir kısmı gösterilmiştir.

Tasarım analizlerinin başlıca amacı, yoğuşmalı ısı geri kazanım uygulamalarında ısı değiştirici yüzeyleri üzerindeki korozyon riski için limitleri ve engelleyici durumları belirleyebilmektir. Bunu yapabilmek için ısı değiştiricinin hangi bölgesinde baca gazı sıcaklığının çığlenme noktası sıcaklığına ulaşacağını önceden bilinmesi gerekir. Boru akışı boyunca baca gazı ve su sıcaklıklarının değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

**Çizelge 5.** Yakıt tipleri ve şehirler için çiğlenme noktası sonuçları  
(Dew point results for fuel types and cities)

	T <sub>WDI</sub> °C					T <sub>ADT</sub> °C*	
	Kömür	Odun	Fuel-oil	Doğalgaz	LPG	Kömür	Fuel-oil
Trabzon	33-40	43-54	40-50	47-59	44-56	128-139	135-147
Bursa	33-39	43-53	40-50	46-57	44-55	128-139	134-147
Ankara	32-38	41-52	38-48	46-57	43-53	126-137	133-145
Kayseri	32-38	41-51	38-48	45-57	42-53	125-136	133-144
Kars	32-37	40-50	37-47	44-56	41-52	125-135	131-143

\*SO<sub>2</sub>'nin %5 dönüşüm oranına göre

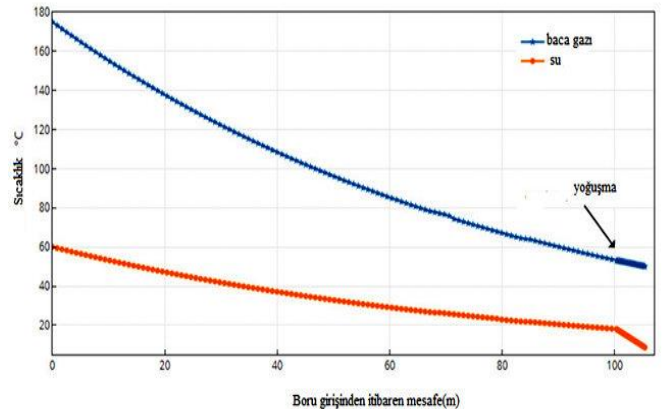
Tasarım hesaplarına göre DWT; 53,36 °C olarak bulunmuştur. Bu sıcaklığın altında baca gazı içindeki su buharı yoğuşmaya başlar, yoğuşmanın başladığı nokta Şekil 4'te işaretlenmiştir. Yoğuşmalı ekonomizerde, boru demetlerinin girişinden itibaren ilk 100 m'de baca gazı sıcaklığı, baca gazındaki su buharının çiğlenme noktası sıcaklığı olan 53,36 °C'ye ulaşmaktadır. Bu mesafeden sonra su buharı yoğuşması başlar.

**Çizelge 6.** Yoğuşmalı ekonomizerin tasarım sonuçları (Design results of the condensing economizer)

Isıtma sisteminden ölçülen veriler ve tasarım sonuçları		
Boru çapı	mm	20
Boru sayısı	-	110
Isı transfer alanı	m <sup>2</sup>	6,91
Su giriş sıcaklığı	°C	8,5
Su çıkış sıcaklığı	°C	60
Baca gazı giriş sıcaklığı	°C	175
Baca gazı çıkış sıcaklığı	°C	50
Suyun kütleli debisi	kg/s	0,21
Baca gazının kütleli debisi	kg/s	0,24

Yoğuşma, ısı değiştirici boru demetleri üzerinde hızlı bir korozyona sebebiyet vereceğinden boru malzemesinin faydalı ekonomik ömrü azalacaktır. Bundan dolayı ısı

değiştirici yoğuşmalı ve yoğuşmasız bölge olmak üzere iki kısma ayrılmalıdır. Analiz sonuçlarına göre, ısı değiştiricinin ilk 100 m'si yoğuşmasız bölge iken; sadece son 10 m'si yoğuşmalı bölgeyi oluşturmaktadır. Bu nedenle, farklı yollar izlenebilir. Büyük ölçekli bir ısı değiştirici yerine, yoğuşmalı ve yoğuşmasız olacak şekilde iki farklı ısı değiştirici kurulabilir. Yoğuşmasız ısı değiştirici boru malzemesi, daha ekonomik bir malzeme seçilebilir, fakat yoğuşmalı ısı değiştiricinin boru malzemesi 310 kalite paslanmaz çelik, teflon, cam ya da platin gibi yoğuşmaya daha dirençli bir malzeme olmalıdır.



**Şekil 4.** Baca gazı ve su sıcaklıklarının boru girişinden itibaren değişimleri (Changes of flue gas and water temperatures by the distance from the inlet pipe)



## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Türkiye'deki farklı şehirlerin nemli hava ile kömür, fuel-oil, odun, doğalgaz ve LPG gibi yakıt tipleri için yanma analizleri yapılmıştır. Yakıt tiplerine göre farklı hava fazlalık katsayıları kullanılarak yanma etkileri incelenmiştir. Su buharı çığlenme noktası sıcaklığı (WDT) ve sülfürik asit çığlenme noktası sıcaklığı (ADT) farklı şehirler ve yakıt tipleri için hesaplanmıştır. Baca gazındaki su ve sülfürik asit buharlarının mol oranına ve çığlenme noktası sıcaklıklarına etki eden şehrin rakımı ve bağıl nemi, hava fazlalık katsayısı gibi çeşitli faktörler araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; su buharı çığlenme noktası sıcaklıkları kömür, odun, fuel-oil, doğalgaz ve LPG için sırasıyla 30-40 °C, 40-50 °C, 37-50 °C, 44-60 °C ve 41-56 °C aralıklarında; asit çığlenme noktası sıcaklıkları ise kömür tipleri için 140 °C'den 125 °C'ye; fuel-oil tipleri için 145 °C'den 131 °C'ye değişim göstermektedir. Blanco ve Pena [3] yaptıkları çalışmada farklı fuel-oil yakıt tipleri için baca gazındaki 5-40 ppm arasındaki SO<sub>3</sub> miktarına göre asit çığlenme noktası sıcaklıkları 125-150 °C arasında değişmektedir. Li vd. [9] 14 farklı kömür çeşidi için elde ettikleri asit çığlenme noktası sıcaklıkları 102-156 °C arasındadır. Shi vd. [10] Çin'de kömür yakıtlı güç santralindeki atık ısı geri kazanım sistemi için yaptıkları çalışmada asit çığlenme noktası sıcaklığı 102,3 °C ve su buharı çığlenme noktası sıcaklığı 39,6 °C olarak hesaplanmıştır. Pena ve Blanco [4] çalışmalarında doğalgaz yakıtlı bir güç santralindeki ekonomizer için su buharı çığlenme noktası sıcaklığı 42,88 °C olarak bulunmuştur.

Ayrıca Kafkas Üniversitesi Paşaçayır kampüsü bölgesel ısıtma sisteminin kazanları için yoğuşmalı ekonomizerde baca gazındaki su ve sülfürik asit buharının çığlenme noktalarının belirlenmesi incelenmiştir. Yoğuşmanın başlayacağı bölgeyi kurulum öncesinde belirleyebilmek için ısıtma sistemindeki 2.500.000 kcal/h kapasiteli bir kazan için Sonlu Farklar Metodu kullanılarak bir yoğuşmalı ekonomizer tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan yoğuşmalı ekonomizerin ısı transfer alanı 6,91 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Kars iline dağıtılan doğalgazın kapalı formülü C<sub>1,0772</sub>H<sub>4,1427</sub>N<sub>0,0047</sub>O<sub>0,0035</sub> ve DWT değeri ise 53,36 °C olarak bulunmuştur. Isı değiştirici borusunun ilk 100 m'lik kısmında yoğuşma gözlenmediğinden bu bölgede herhangi bir korozyon riski mevcut değilken son 10 m'lik kısmında yoğuşma oluşmaktadır. Bu nedenle büyük ölçekli bir ısı değiştirici yerine, yoğuşmalı ve yoğuşmasız olacak şekilde iki farklı ısı değiştirici kurulması önerilmektedir. Yoğuşmalı ısı değiştiricinin boru malzemesi 310 kalite paslanmaz çelik, teflon, cam ya da platin gibi yoğuşmaya daha dirençli bir malzeme olmalıdır.

## KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

M <sub>A</sub>	Mol kütlesi, kg/kmol
N, n	Mol sayısı, kmol
P	Basınç, kPa, atm

T	Sıcaklık, °C
<i>Semboller (Symbols)</i>	

ε	Havadaki nemin mol sayısı, kmol
λ	Hava fazlalık katsayısı
φ	Bağıl nem, %

## *Kimyasal semboller (Chemical symbols)*

C	Karbon
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
CH <sub>4</sub>	Metan
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Bütan
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Pentan
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	Hekzan
H	Hidrojen
H <sub>2</sub> O	Su
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfürik asit
N <sub>2</sub>	Azot
O <sub>2</sub>	Oksijen
SO <sub>2</sub>	Sülfürdioksit
SO <sub>3</sub>	Sülfürtrioksit

## *Alt İndisler (Subscripts)*

a	Coefficient of stoichiometric combustion
ADT	Asit çığlenme noktası sıcaklığı
atm	Atmosfer basıncı
bg	Baca gazı
n	Nem
doym	Doyma
WDT	Su buharı çığlenme noktası sıcaklığı

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI

### (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] W. Wei, F. Sun, Y. Shi, L. Ma, "Theoretical prediction of acid dew point and safe operating temperature of heat exchangers for coal-fired power plants", *Applied Thermal Engineering*, 123: 782-790, (2017).
- [2] B. Xiang, B. Tang, Y. Wu, H. Yang, M. Zhang, J. Lu, "Prediction acid dew point with a semi-empirical model", *Applied Thermal Engineering*, 106: 992-1001, (2016).
- [3] J. M. Blanco, F. Pena, "Increase in the boiler's performance in terms of the acid dew point temperature: Environmental advantages of replacing fuels", *Applied Thermal Engineering*, 28: 777-784, (2008).
- [4] F. Pena, J. M. Blanco, "Evaluation of the physical dew point in the economizer of a combined cycle burning

- natural gas”, *Applied Thermal Engineering*, 27: 2153-2158, (2007).
- [5] Q. Ding, X. F. Tang, Z. G. Yang, “Failure analysis on abnormal corrosion of economizer tubes in a waste heat boiler”, *Engineering Failure Analysis*, 73: 129-138, (2017).
- [6] H. Han, Y. L. He, W. Q. Tao, “A numerical study of the deposition characteristics of sulfuric acid vapor on heat exchanger surfaces”, *Chemical Engineering Science*, 101: 620-630, (2013).
- [7] E. Vainio, H. Kinnunen, T. Lauren, A. Brink, P. Yrjas, N. DeMartini, M. Hupa, “Low-temperature corrosion in co-combustion of biomass and solid recovered fuels”, *Fuel*, 184: 957-965, (2016).
- [8] B. ZareNezhad, A. Aminian, “Accurate prediction of the dew points of acidic combustion gases by using an artificial neural network model”, *Energy Conversion and Management*, 52: 911-916, (2011).
- [9] X. Li, Z. Wu, L. Zhang, X.Liu, X. Zhu, H. Hu, G. Luo, Z. Hu, W. Liu, H. Yao, “An updated acid dew point temperature estimation method for air-firing and oxy-fuel combustion processes”, *Fuel Processing Technology*, 154: 204-209, (2016).
- [10] Y. Shi, C. Dai, Z. Ma, Z. Guo, “Experimental investigation of heat transfer with ash deposition in ultra-low temperature WHRS of coal-fired power plant”, *Applied Thermal Engineering*, 123: 1181-1189, (2017).
- [11] C. Chantana and S. Kumar, “Experimental and theoretical investigation of air-steam condensation in a vertical tube at low inlet steam fractions”, *Applied Thermal Engineering*, 54: 399-412, (2013).
- [12] Q. Chen, K. Finney, H. Li, X. Zhang, J. Zhou, V. Sharifi and J. Swithenbank, “Condensing boiler applications in the process industry”, *Applied Energy*, 89: 30-36, (2012).
- [13] J. D. Li, M. Saraireh and G. Thorpe, “Condensation of vapor in the presence of non-condensable gas in condensers”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 4078- 4089, (2011).
- [14] M. Terhan and K. Comakli, “Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas”, *Applied Thermal Engineering*, 100: 1007-1015, (2016).
- [15] M. Terhan and K. Comakli, “Energy and exergy analyses of natural gas-fired boilers in a district heating system”, *Applied Thermal Engineering*, 121: 380-387, (2017).
- [16] Y. A. Cengel, M.A. Boles, “*Thermodynamics an engineering approach*”, Guven Scientific Press, Izmir, Turkey, (2008).
- [17] M. Terhan, “Doğalgaz yakıtlı bir kazanda baca gazından enerji geri kazanımı ve yoğunlaşma olayının enerji, ekserji ve ekonomik yönden incelenmesi”, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, (2015).
- [18] S. Bilgen, “Bazı yakıtların kimyasal ekserji değerlerinin hesaplanması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, (2000)
- [19] Emre T., Yigit T., “*Elektrik Tüketicisinin Desteklenmesi Projesi (ETÜD) Sonuç Raporu*”, Arena Dijital-ISBN:978-605-69004-0-2, İstanbul, (2018).
- [20] Thomson H., “*EPOV-Addressing energy poverty in the European Union: State of play and action*”, EC:EPOV, (2018).
- [21] OpenExp, “*European Energy Poverty Index (EEPI)*”, OpenExp ISBN:978-2-9564721-5-5, (2019).
- [22] Bouzarovski S., “A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty -fuel poverty binary”, *Energy Research & Social Science*, 10: 31-40, (2015)