



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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

## Kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanması: Sayısal bir çalışma

### *Oxygen enriched combustion of coke oven gas and generator gas: A numerical study*

*Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa ILBAS<sup>1</sup>, Esat YANIK<sup>2</sup>, Serhat KARYEYEN<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6668-1484*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9312-8921*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-8383-5518*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ilbas M., Yanık E. ve Karyeyen S., “Kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanması: Sayısal bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 21(1): 93-100, (2018).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.385918

# Kok Fırını Gazı ve Jeneratör Gazının Oksijence Zenginleştirilmiş Yanması: Sayısal Bir Çalışma

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mustafa ILBAS<sup>1</sup>, Esat YANIK<sup>2</sup>, Serhat KARYEYEN<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 06.01.2017 ; Kabul/Accepted : 14.02.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, kok fırını ve jeneratör gazları, hava ve farklı oranlardaki oksijence zenginleştirilmiş hava şartlarında yakılmış ve havanın içerisinde bulunan oksijen miktarının yanma ve emisyon parametrelerine olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda, PDF/karışım oranı yanma modeli ile yanma modellenmiş, bu modelleme için standard k-ε türbülans modeli ile P-1 radyasyon modelleri kullanılmıştır. Havanın bünyesinde hacimce % 21 seviyelerinde bulunan O<sub>2</sub> miktarı artırılarak, % 30, % 40 ve % 50'ye çıkarılmıştır. Yapılan tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, her iki gazın yanma şartları için de, oksijence zenginleştirilmiş yanma ile birlikte, alev sıcaklıklarının yükseldiği rahatlıkla söylenebilir. Böylece oksijence zenginleştirilmiş yanma ile kok fırını gazı ve jeneratör gazının yanma performanslarının arttığı görülmüştür. Sonuçlar, emisyon bakımından değerlendirecek olursak, hava, oksijence zenginleştirildikçe, yanma sonu CO emisyonlarının azaldığı, CO<sub>2</sub> emisyonlarının da arttığı belirlenmiştir. Son olarak, NOX emisyonları da araştırılmış ve havada bulunan oksijen miktarı arttırıldıkça alev sıcaklıklarının yükselmesine bağlı olarak NOX emisyonlarında da artış olduğu saptanmıştır. Hacimce % 50 O<sub>2</sub> içeren hava şartları için gerçekleştirilen yanma neticesinde en yüksek sıcaklık seviyeleri 2200 K'lere ulaşırken en yüksek NOX seviyeleri de 1500 ppm dolaylarına yükselmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Oksijence zenginleştirilmiş yanma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemesi, emisyon, sentetik yakıt.

# Oxygen Enriched Combustion of Coke Oven Gas and Generator Gas: A Numerical Study

## ABSTRACT

The amount of oxygen in air has been changed and the effect of oxygen amount has been numerically investigated on combustion and emission parameters of coke oven and generator gases in a model combustor. A CFD code has been used to perform numerical analysis. Combustion has been modelled by using the PDF/Mixture Fraction combustion model, standard k-ε turbulence model as turbulence model and P-1 radiation model as radiation model. The amount of oxygen in the air has been changed from 21 % to 30 %, 40 % and 50 %. According to the predictions, it can be readily said that the flame temperatures of the coke oven and the town gases increases under oxygen-enriched combustion conditions. Therefore, it is demonstrated that the combustion performances of the coke oven and town gases have been improved under oxygen-enriched combustion. When the results are evaluated in terms of emissions, it has been determined that CO emissions decrease while CO<sub>2</sub> emissions increase as the air is enriched with oxygen. It has been also concluded that NOX emission levels increase under oxygen-enriched combustion conditions due to increases in flame temperatures of the coke oven and the town gases. The maximum flame temperature level has been predicted as of almost 2200 K under % O<sub>2</sub>-included air conditions just as the maximum NOX level has been also predicted as about 1500 ppm under the same conditions.

**Keywords:** Oxygen-enriched combustion, CFD modelling, combustion, synthetic gas

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, alternatif enerji kaynaklarına olan eğilim artıyor olsa bile enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar hala önemli bir yere sahip olmaya devam etmektedir. Bilinen fosil yakıt türleri kömür, petrol ve doğalgaz olup bunlardan kömür ülkemiz için daha bol bulunabilen yerli bir kaynak iken petrol ve doğalgaz, kömüre göre daha fazla ithal edilmektedir. Bu yüzden kömürün kullanımını yaygınlaştırmak, ülkemizin dışa olan bağımlılığını

azaltmada önemli bir yere sahiptir. Ancak kömür, ihtiva ettiği elementler nedeniyle yandığı zaman çevreyi aşırı kirletmekte ve ısı değerinin çok yüksek olmamasından dolayı da diğer fosil yakıtlara nazaran ciddi bir enerji kaynağı olamamaktadır. Kömüre ilişkin bahsedilebilecek diğer bir olumsuz özellik de katı yakıt olması ve yakma teknolojilerinin oldukça zor olmasıdır. Tüm bu nedenler dikkate alındığında, kömürleri gazlaştırmak ya da koklaştırma yapılırken açığa çıkan gaz karışımlarını değerlendirmek oldukça önem arz etmektedir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : serhatkaryeyen@gazi.edu.tr

Kömürler, farklı sıcaklık ve basınçlarda ve farklı tip reaktörlerde gazlaştırma işlemine tabi tutulurlar. Kömürlerin gazlaştırılma işleminde eğer hava kullanılırsa, gazlaştırma sonucunda elde edilecek sentetik yakıt jeneratör gazı olarak bilinir ve yüksek oranda azot içerir. Koklaştırma işlemi ile sentetik yakıt elde edilmek istenirse, koklaştırma yan ürünü olarak açığa çıkan kok fırını gazı değerlendirilmelidir. Bu gaz, yüksek oranda hidrojen içermesinin yanı sıra yanabilir bileşen olarak metan da bulundurmasından dolayı ısı değer bakımından oldukça iyi durumdadır. Dolayısıyla bu sentetik yakıtlar, gaz yakıt olarak kullanılabilen ve doğalgaza alternatif teşkil edebilmektedirler. Ancak yine de, ısı değer bakımından doğalgazın uzağında olmaları, yanma performanslarının daha düşük olmasına neden olmaktadır [1]. Bahsi geçen bu sentetik yakıtlar, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları ile yakıldığında ise durumun farklı olacağı düşünülmektedir. Çünkü havanın bünyesinde bulunan yüksek miktardaki N<sub>2</sub>, yanma sonu açığa çıkan ısı enerjisinin bir bölümünü absorbe etmektedir. Bu miktarın azaltılması ile bu yakıtların yanma performansları artırılmış olacaktır. Aşağıda bu konuya ilişkin daha önce yapılmış bazı çalışmalar sunulmuştur.

Bordbar ve ark. fosil yakıtlı cam eritme tanklarında oksijence zenginleştirilmiş yanmayı analiz ederek gerçekleştirmiştir. Cam eritme tanklarında oksijence zenginleştirilmiş yanmanın enerji analizi, azalan yakıt girdisini de dikkate alarak, yanma ürünleri ve azot miktarında ki düşüşe bağlı olarak atık gazlar tarafından taşınan ısı miktarında da belirgin bir azalma olduğunu ortaya çıkarmıştır. [2]. Normann ve ark. yaptıkları bir çalışmada oksî-yakıt yanmada azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) yüksek sıcaklıktaki azaltılma ihtimali incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, saf oksijen kullanılmış ve yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonunun ana kaynağı havadaki N<sub>2</sub> olmadığından yanma sonu NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılması başarılıdır [3]. Kez ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ise 20 atm basınç altında, 2 farklı durum için, farklı gri olmayan radyasyon modellerinin etkileri oksijence zengin yanma şartları için araştırılmıştır [4]. Li ve ark. oksî-yakıt yanmasında, saflaştırma prosesine kirleticilerin etkilerini araştırmışlardır [5]. Sonuçlar, kirleticilerin artması ile saflaştırma için gerekli enerji tüketiminin arttığını göstermektedir. Buhre ve ark., kömür yakan sistemlerde oksî-yakıt kullanılmasına dair bir literatür çalışması gerçekleştirmişler ve böylece kömürün oksî-yakıt yanma şartlarına ilişkin detaylı bir analiz sunmuşlardır [6]. Benzer şekilde, Toftegaard ve ark., katı yakıtların oksî-yakıt şartlarında yakılması ile ilgili genel bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir [7]. Zannis ve Hountalas, dizel bir motorun yanma ve emisyon parametrelerini oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, oksijence zenginleştirme yapıldığında yanmanın daha erken başladığı ve en yüksek yanma basıncında bir miktar artış olduğu saptanmıştır [8]. Ditaranto ve Hals, ani genişlemeli bir sistemde oksijence zenginleştirilmiş

yanma şartları ile metanı yakmışlar ve yanma kararsızlıklarını araştırmışlardır. Yapılan çalışmaya göre, yanma kararsızlıklarının oksijen konsantrasyonuna ve Reynolds sayısına bağlı olduğu belirlenmiştir [9]. Chen ve ark. pülverize kömürün oksî-yakıt yanma şartları için, karakterizasyon, stabilizasyon ve modellemeye dair genel bir literatür çalışması gerçekleştirmişlerdir [10]. Yoshiie ve ark. oksî-yakıt yanma şartlarında, kömürün yanması sonucu ortaya çıkan NO<sub>x</sub> emisyonlarına, baca gazı yeniden dolaşımının ve azot miktarının etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, resirküle edilen NO<sub>x</sub>'un NO<sub>x</sub> emisyonlarına olan katkısının oldukça az olduğu görülmektedir [11].

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar değerlendirildiğinde, oksî-yakıt yanma şartları için daha çok katı ve sıvı yakıtlara yönelik araştırmalar yapıldığı, gaz yakıtlara yönelik yapılan araştırmaların da daha çok bilinen yakıtları kapsadığı anlaşılmaktadır. Özellikle kok fırını gazı ve jeneratör gazı gibi kömür gazlarının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için gerçekleştirilmiş önemli bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, bu iki gazın oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için yanma ve emisyon parametreleri sayısal olarak araştırılmıştır.

## 2. MODELLEME ÇALIŞMALARI (MODELLING STUDIES)

Eksenel simetrik bir akış için silindirik koordinatlarda genel form aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial x} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

Burada  $\Phi$  bağımlı değişkenleri temsil etmekte  $\Gamma$  ise  $\Phi$  için taşıyıcı eşitliğinin kaynak terimini ifade eden  $S_{\Phi}$  ve  $\Phi$  değişkenleri için taşıyıcı sabiti göstermektedir [12].

Çalışmada kullanılan PDF/karışım oranı yanma modeli skaler korunumlu tek bir karışım için taşıyıcı eşitliklerin çözümlenmeden meydana gelir [13]. Bu yanma modelinde ayrı ayrı türler için taşıyıcı eşitlikler çözülmez. Onun yerine, ilgili tür için tek tek bileşim konsantrasyonu, karışım oran dağılımı tahmin edilen formda türetilmiştir. Kimya ve türbülansın etkileşimi, imkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonunun yardımı ile açıklanabilir [13].

PDF model yaklaşımı türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici bir sistem için, karışım oranı, yerel yakıt kütle oranı bakımından şöyle yazılabilir [13]:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \quad (2)$$

Burada  $m_F$  ve  $m_O$ , yakıt ve havanın kütle oranlarını göstermektedir. Karışım oranı,  $f$ , türbülanslı akış alanının zaman ortalamalı değeri için korunum denklemlerinin çözüldüğü akış alanındaki her noktada korunan bir nicelik değeridir [13].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (3)$$

Burada  $S_m$ , sıvı yakıt damlacığından gaz fazına, yalnızca zamanı gelmiş kütle transferinin kaynak terimidir.

Ortalama karışım oranı için çözüme ek olarak, bir korunum denklemi karışım oranı değişimi için çözümler.  $\overline{f'^2}$ , türbülans-kimya etkileşimini tanımlayan kapama modelinde kullanılır [13].

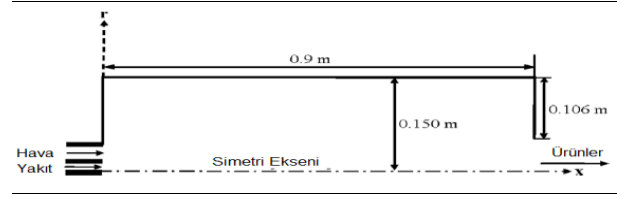
$$\frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \overline{f'^2})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left( \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (4)$$

burada  $\sigma_t$ ,  $C_g$  ve  $C_d$  Mixture Fraction/PDF modelinde kullanılan sabitlerdir.

Radyasyonla ısı transferi yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Yanma odalarındaki gaz alevi sıcaklığı, özellikle de stokiyometrik yanma şartlarında 1000-1600 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Bunun sonucunda girdaplı yanma odalarından olan ısı transferi belirlidir. Sonuç olarak, yanma odalarındaki sıcaklık dağılımlarını daha iyi belirleyebilmek için radyasyon modelini kullanmaya ihtiyaç vardır [13].

Gaz karışımli yakıtların yakılmasında kullanılan matematiksel modelleme bazı öngörüler üzerine gerçekleştirilmektedir. Akış, kararlı durumda değerlendirilmekte olup, 2-D aksel simetrik

referans alınmış olup, bahsi geçen çalışmadaki yanma odasına ait özellikler Şekil 1'de gösterilmiş, bu yanma odasının ölçüleri ise Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Yanma odası (The combustor)

Çalışmanın yanma şartları 20 kW ısı güç ve 0.83 eşdeğerlilik oranında olacak şekilde belirlenmiş, hava ve yakıtın sıcaklıkları 293 K olarak alınmıştır. Modellemeler, öncelikle % 21 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilmiş, ardından havanın içerisindeki O<sub>2</sub> seviyesi hacimce % 30, % 40 ve % 50 olacak şekilde artırılmış ve modellemeler tekrarlanarak oksijence zenginleştirilmiş yanmanın sayısal modellemeleri yapılmıştır. Modellemelerde kullanılan yakıtlar ise yüksek ve düşük kalorili kok fırını gazı ve jeneratör gazı olup bunlara ait özellikler de Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yanma Odasının Özellikleri (Properties of the combustor)

Yakıt Girişi	r=0 mm'den	r=6 mm'ye
Hava Girişi	r=16,5 mm'den	r=27,5 mm'ye
Yanma Odası Çapı	150 mm	
Yanma Odası Uzunluğu	900 mm	

Çizelge 2. Kullanılan Kömür Gazlarının Özellikleri (Properties of the coal gases used)

	%	%	%	%	%	Alt Isıl Değer (kcal/m <sup>3</sup> )	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
Kok Fırını Gazı	55	27	6	2	10	3678	0,45
Jeneratör Gazı	12	0,5	28	5	54,5	1124	1,07

çözümleme yapılmış, süreklilik, momentum, enerji ve türlerin korunumu öngörülmüştür. Çalışmada k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Yanma modeli olarak önkarişimsiz yanma modellerinden PDF/karışım oranı yanma modeli tercih edilmiştir. Ayrıca çalışmada radyasyon modeli de kullanılarak çözüme gidilmiş ve burada literatürde yapılan başka çalışmalar da göz önüne alınarak P-1 radyasyon modeli tercih edilmiştir [13].

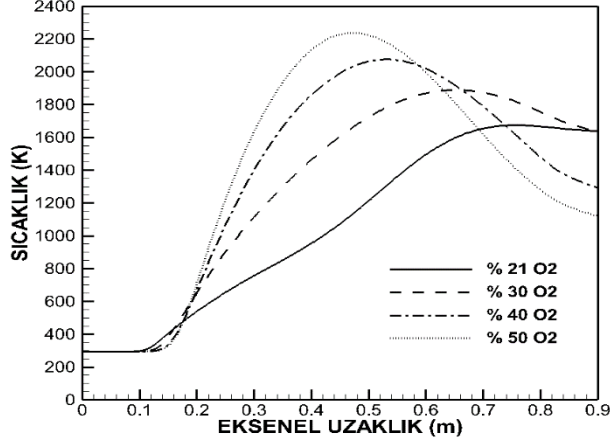
### 2.1. Kullanılan Yanma Odası ve Özellikleri (Combustor used in this study and its properties)

Bu çalışma kapsamında, oksijence zenginleştirilmiş yanmanın gerçekleştirilmesinde Yılmaz [14] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada kullanılan yanma odası

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

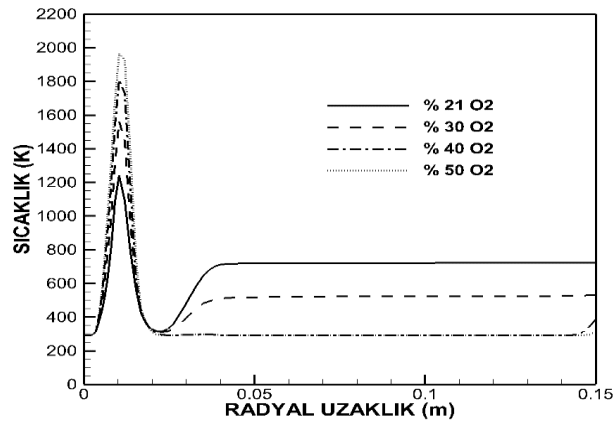
Kok fırını gazı ve jeneratör gazı yanmasında kullanılan havanın, farklı oranlardaki oksijen ile zenginleştirilmesinin yanma ve emisyon parametrelerine etkileri çalışmanın bu bölümünde sunulmuştur. Şekil 2'de kok fırını gazı için oksijence zenginleştirilmiş yanma sonucu elde edilen aksel sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen miktarı arttırıldıkça alev sıcaklığı yükselmiş ve % 50 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilen yanmada en yüksek alev sıcaklığı seviyesine yaklaşık 2200 K ile ulaşmıştır.

Ayrıca, havanın bünyesindeki oksijen miktarı arttırıldıkça, kok fırını gazının yüksek sıcaklık bölgeleri, yanma odası çıkışından yanma odasının ortalarına doğru hareket etmiştir. Bunun temel nedeninin oksijenin yanmayı hızlandırması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için aksel sıcaklık dağılımı (Axial temperature distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

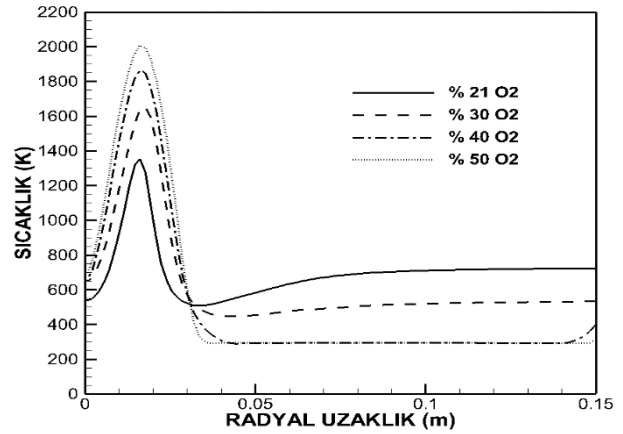
Şekil 3'te ise oksijence zenginleştirilmiş kok fırını gazı için 0,04 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Eksenden duvara doğru gidildikçe, oksijence yapılan zenginleştirmenin radyal sıcaklıkları belli bir seviyede yükselttiği, ardından ise düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,04 m aksel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,04 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

Benzer durum Şekil 4'te gösterilen ve 0,2 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımlarında da ortaya çıkmaktadır. Yanma odası merkezinden duvarında doğru gidildikçe, öncelikle sıcaklık seviyelerinde önemli derecede artış olmuş, ardından, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durum, kok fırını gazının yüksek

oranda hidrojen içermesi ile açıklanabilir. Hidrojenin reaktivitesi oldukça yüksek olup yoğunluğu da oldukça düşüktür. Ayrıca, yakıtın, yanma odasının merkezinden beslendiği düşünülecek olursa, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında meydana gelen yüksek alev sıcaklıklarının da yanma odası merkezinde olması kaçınılmazdır. Üstelik yapılan modellemelerde girdap sayısının da 0 olması nedeni ile havanın herhangi bir şekilde teğetsel hıza maruz kalmaması ve bu nedenle de yanma odası içerisinde fazlaca dağılmaması oldukça normaldir. Yine de buna rağmen yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisinde ilerlemesi neticesinde elde edilen dağılımlara da bakılmalıdır.

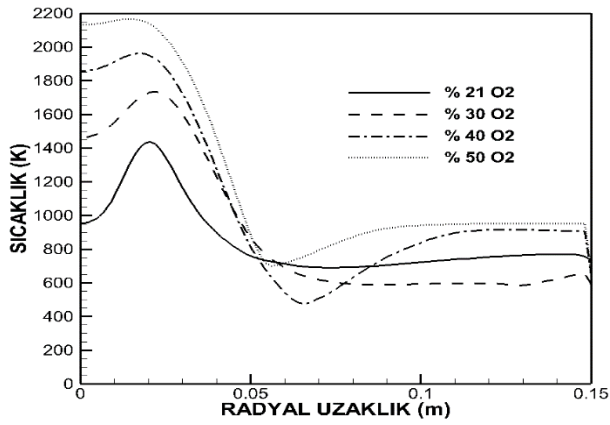


Şekil 4. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,2 m aksel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,2 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

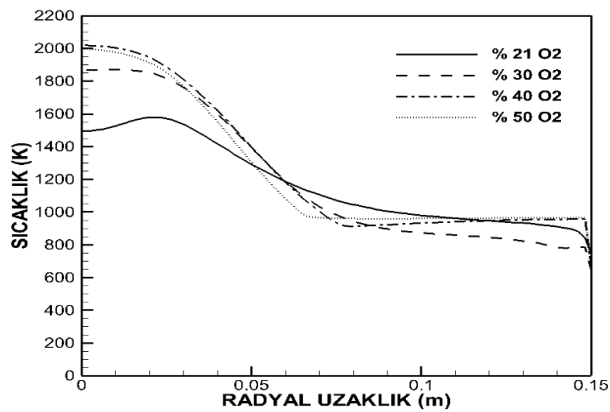
Şekil 5'te gösterilen ve 0,4 m aksel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık dağılımlarına bakılacak olursa, yanma odasının radyal bölgelerinde de oksijence zenginleştirilmiş yanmanın etkileri daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise, kok fırını gazı alevinin artık yanma odası içerisine daha etkin bir şekilde yayıldığını ve yanmanın neredeyse tamamlandığını göstermektedir. Benzer şekilde Şekil 6'da incelenecek olursa, sıcaklık seviyelerinin oldukça yükseldiği, yanma odası merkezi ile duvarı arasında sıcaklık seviyeleri arasındaki farkların daha da azaldığı rahatlıkla söylenebilir.

Şekil 7'de oksijence zenginleştirilmiş farklı yanma şartları için yanma odasının merkezinden alınan aksel NOX dağılımları gösterilmiştir. Bilindiği gibi, NOX oluşum mekanizmalarından ısıl NOX oluşum mekanizması oldukça baskın bir mekanizma olup, alev sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak üstel olarak NOX seviyelerini arttırmaktadır. Bu çalışmada da, havanın oksijence zenginleştirilmesi neticesinde kok fırını gazının alev sıcaklığı yükselmekte ve buna bağlı olarak NOX seviyelerinde ciddi artışlar meydana gelmektedir. Her ne kadar havanın oksijenle zenginleştirilmesi ile yanma odasına beslenen azot miktarı azalmış olsa da, alev sıcaklığının yükselmesi, bu duruma göre daha baskın bir rol oynamış ve böylece, kok

fırını gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için en yüksek NOx seviyelerini 1500 ppm'lerin üzerine kadar yükseltmiştir.

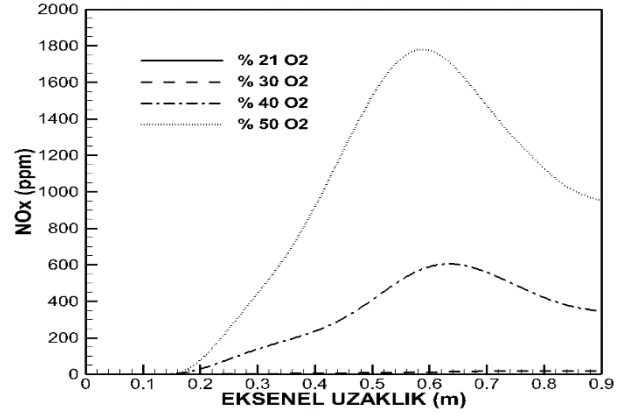


Şekil 5. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,4 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,4 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

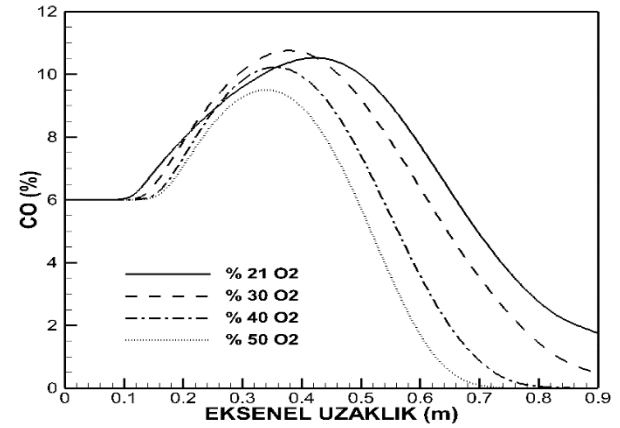


Şekil 6. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için 0,6 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,6 m axial distance for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

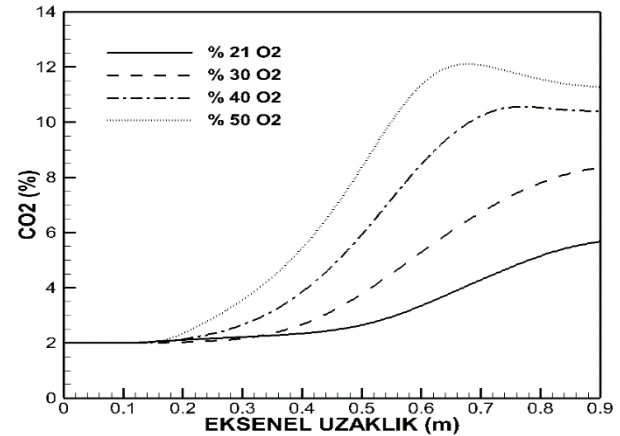
Şekil 8'de ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için eksen boyunca kok fırını gazının CO yanma sonu ürünleri verilmiştir. Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen seviyesi artırıldıkça, yanma sonu CO ürünlerinde bir miktar azalma olmuş ve böylece yanma iyileştirilmiştir. Bu durum, eksenel sıcaklık dağılımlarında da ortaya konulmuştur. Ayrıca kok fırını gazının yakılması için kullanılan havanın bünyesindeki oksijen seviyelerinin artırılması ile en yüksek CO seviyelerinin olduğu bölgeler, yanma odası çıkışına yakın bölgelerden yakıcıya daha yakın bölgelere doğru yaklaşmıştır.



Şekil 7. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel NOx dağılımı (Axial NOx distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)



Şekil 8. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel CO dağılımı (Axial CO distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

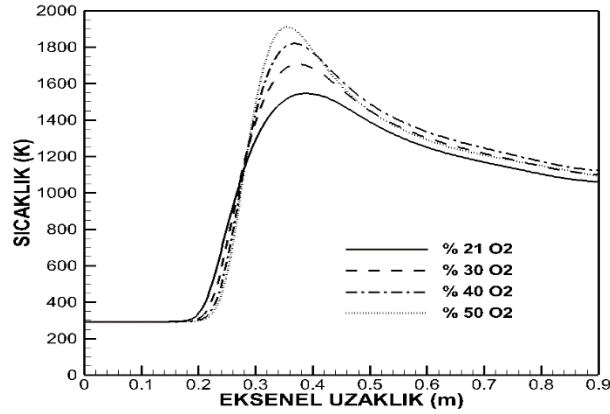


Şekil 9. Oksijence zenginleştirilmiş yanmada kok fırını gazı için eksenel CO2 dağılımı (Axial CO2 distribution for coke oven gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 9'da oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için eksen boyunca tahmin edilen kok fırını gazının CO2 yanma sonu ürünleri sunulmuştur. Şekil 9'dan da anlaşılacağı gibi, havanın içerisindeki oksijen seviyesi artırıldıkça, yanma sonu CO2 ürünlerinde önemli



derecede artış gözlemlenmiş ve bu durum da yanmanın iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca kok fırını gazının yakılması için kullanılan havanın bünyesindeki oksijen seviyelerinin artırılması ile en yüksek CO<sub>2</sub> seviyelerinin olduğu bölgeler, yanma odası çıkışına yakın bölgelerden yanma odasının ortasında doğru kaymıştır.

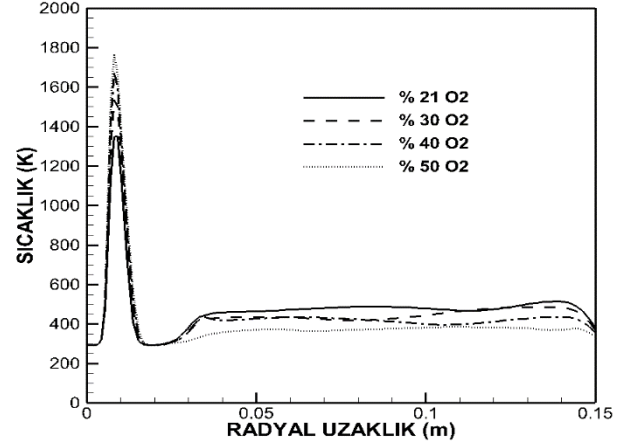


**Şekil 10.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel sıcaklık dağılımı (Axial temperature distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

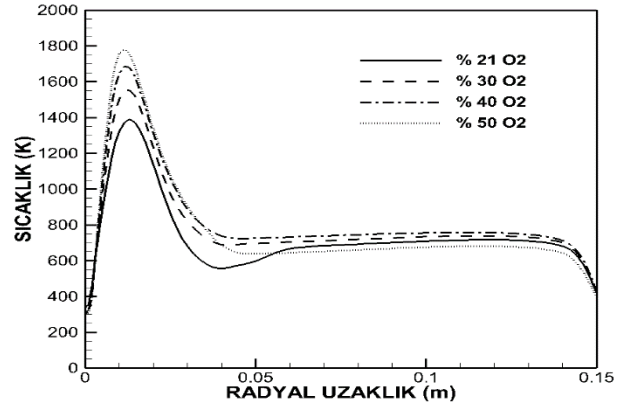
Çalışma kapsamında sayısal modellemesi gerçekleştirilen diğer bir yakıt da jeneratör gazıdır. Jeneratör gazını kok fırını gazından ayıran en önemli özellik yüksek oranda azot içermesi ve buna bağlı olarak da oldukça düşük kalorili bir yakıt olmasıdır. Bu nedenle, bu yakıtın yakılması için kullanılan hava da oksijence zenginleştirilmiş olup, yanma sonucu elde edilen sıcaklık ve emisyon davranışları aşağıda sunulmuştur. Şekil 10'da jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için tahmin edilen eksenel sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Şekil 10'dan da anlaşılacağı gibi, havanın bünyesinde bulunan oksijen miktarı artırıldıkça jeneratör gazının alev sıcaklığı yükselmiş ve % 50 O<sub>2</sub> içeren havanın bulunduğu yanma şartları için 2000 K'e yaklaşmıştır. Sonuç olarak, oksijence zenginleştirilmiş yanmanın jeneratör gazının yanma performansını artırdığı rahatlıkla söylenebilir.

Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te, oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında jeneratör gazı için tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Kok fırını gazının radyal sıcaklık dağılımlarında olduğu gibi, jeneratör gazının radyal sıcaklık dağılımlarında da, oksijence zenginleştirme, yanma odasının merkezinden duvarına doğru gidildikçe, sıcaklık seviyelerinin önce artmasına ardından da azalmasına neden olmuştur. Bu durumun nedeni kok fırını gazı için ortaya koyulan gerekçe ile aynıdır. Gerek yakıtın yanma odasına merkezden beslenmesi gerekse havaya yönelik herhangi bir girdap oluşturulmaması bu durumu açıklamaktadır. Yine de buna rağmen yanma odasında ilerledikçe, alevin yanma odasına doğru yayılmasına bağlı olarak bu durum bir miktar değişmekte ve oksijence zenginleştirilmenin

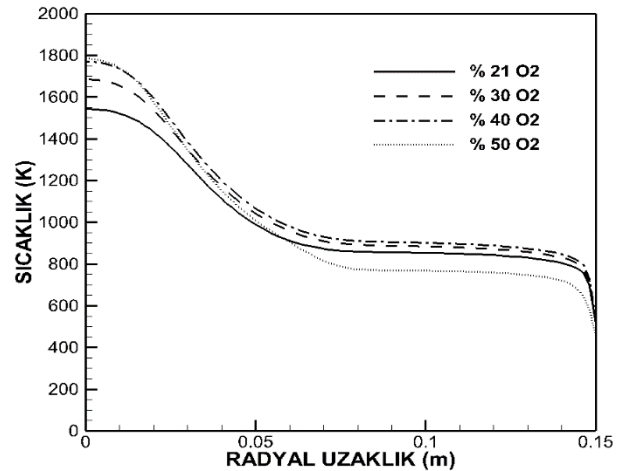
olumlu etkisi radyal sıcaklık dağılımlarında da görülmektedir.



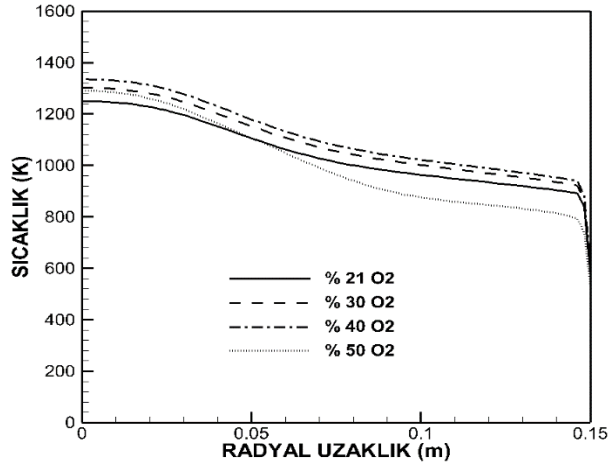
**Şekil 11.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,04 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,04 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)



**Şekil 12.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,2 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,2 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)

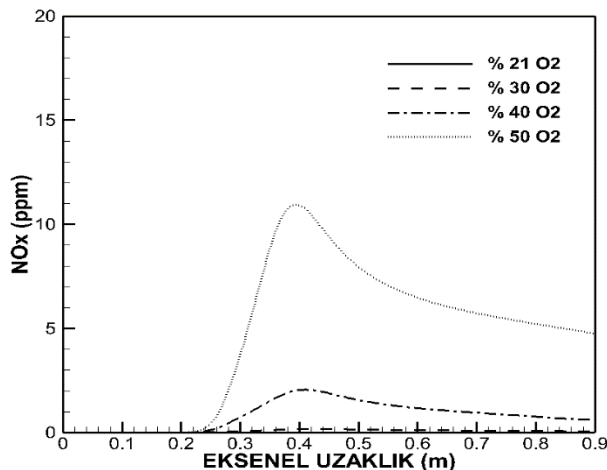


**Şekil 13.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,4 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,4 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)



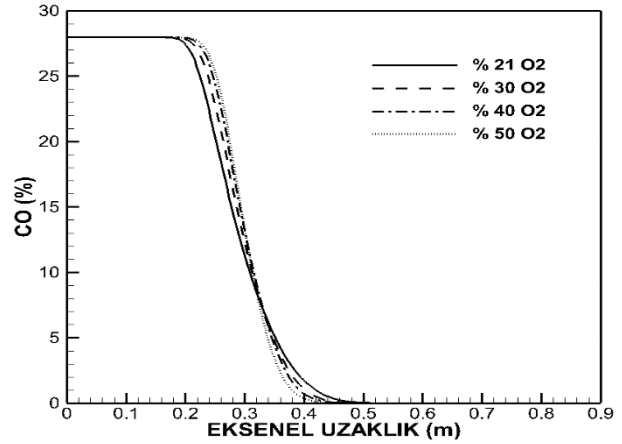
**Şekil 14.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için 0,6 m eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı (Radial temperature distribution at 0,6 m axial distance for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 15'te oksijence zenginleştirilmiş farklı yanma şartlarında jeneratör gazı için yanma odasının merkezinden alınan eksenel NOX dağılımları gösterilmiştir. NOX artışının temel nedenine ısıl NOX mekanizmasının oldukça etkili olduğundan bahsedilmiş olup havanın oksijence zenginleştirilmesi neticesinde jeneratör gazının alev sıcaklığındaki artış ile birlikte NOX seviyelerindeki artışlar da rahatlıkla açıklanabilir. Her ne kadar havanın oksijenle zenginleştirilmesi ile yanma odasına beslenen azot miktarı azalmış olsa da, alev sıcaklığının yükselmesi, bu duruma göre daha baskın bir rol oynamış ve böylece, jeneratör gazının oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için en yüksek NOX seviyeleri 10 ppm dolaylarında tahmin edilmiştir. Bu değer, kok fırını gazı için tahmin edilen en yüksek NOX seviyeleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır.

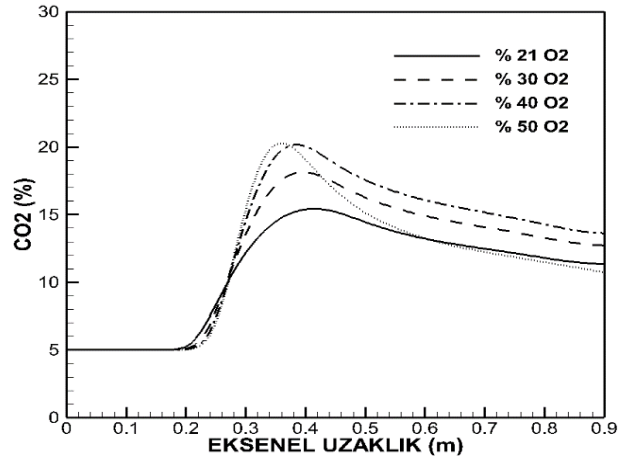


**Şekil 15.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel NOX dağılımı (Axial NOX distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 16'da ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartlarında jeneratör gazının yanması için eksen boyunca tahmin edilen yanma sonu CO ürünleri verilmiştir. Şekil 16'dan da anlaşılacağı gibi havanın içerisindeki oksijen seviyesi arttırıldıkça yanma sonu CO ürünlerinde çok az da olsa azalma gözlemlenmiştir. Bu durum eksenel sıcaklık dağılımlarında da belirtildiği gibi, CO seviyesinin az da olsa değişimi ile yanmanın iyileştirildiği söylenebilir.



**Şekil 16.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel CO dağılımı (Axial CO distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)



**Şekil 17.** Oksijence zenginleştirilmiş yanmada jeneratör gazı için eksenel CO2 dağılımı (Axial CO2 distribution for generator gas under oxy-fuel combustion)

Şekil 17'de ise oksijence zenginleştirilmiş yanma şartları için jeneratör gazının eksenel CO2 tahminleri sunulmuştur. Havanın içerisindeki oksijen miktarının arttırılması ile yanmanın bir miktar iyileştiği ve böylece yanabilir bileşenlerin daha fazlaca CO2'ye dönüştüğü Şekil 17'den anlaşılmaktadır. En yüksek CO2 seviyeleri yüzde 15 seviyelerinden 20 seviyelerine kadar artmıştır.



#### 4.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kok fırını gazı ve jeneratör gazının oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartları için yanma ve emisyon parametreleri sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde kok fırını gazı ve jeneratör gazı, % 21, % 30, % 40 ve % 50 O<sub>2</sub> içeren hava şartlarında sayısal olarak yakılmış, oksijenle zenginleştirilmiş her bir yanma şartı için bu gazların sıcaklık ve emisyon dağılımları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal modellemeler neticesinde elde edilen bazı sonuçlar şöyledir:

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan her iki yakıt için de, havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça alev sıcaklıklarının yükseldiği tespit edilmiştir. Ancak, yine de buna rağmen, yanma odası girişine yakın radyal bölgelerde, oksijenle zenginleştirmenin sıcaklık seviyelerini arttırmadığı, bu duruma da, herhangi bir teğetsel hız bileşeninin bulunmamasının neden olduğu ortaya konulmuştur.

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan kok fırını gazı ve jeneratör gazı için, havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça yanma odasının eksenini boyunca tahmin edilen NOX seviyelerinin yükseldiği belirlenmiş olup özellikle % 50 O<sub>2</sub> içeren hava ile gerçekleştirilen yanmada, kok fırını gazı için bu değerin 1800 ppm dolaylarında olduğu saptanmıştır.

- Oksijenle zenginleştirilmiş yanma şartlarında yakılan her iki kömür gazının yakılması esnasında kullanılan havanın içerisindeki O<sub>2</sub> miktarı arttırıldıkça, yanma odası eksenini boyunca tahmin edilen CO seviyelerinin azaldığı, CO<sub>2</sub> seviyelerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumda da oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın yanma performansını arttırdığı rahatlıkla söylenebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

ANSYS Fluent 18.0 programının kullanımından dolayı yazarlar Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İlbaş, M., Karyeyen, S. "Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor", *International Journal of Energy Research*, 38(9): 1171-1180, (2014)
- [2] Bordbar, M. H., Wecl, G., Hyppänen, G. "A line by line based weighted sum of gray gases model for in homogeneous CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O mixture in oxy-fired combustion", *Combustion and Flame*, 161(9): 2435-2445, (2014).
- [3] Normann, F., Andersson, K., Leckner, B., Johnsson, F. "High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion", *Fuel*, 87(17-18): 3579-3585, (2009).
- [4] Kez, V., Liu, F., Consalvi, J.L., Ströhle, J., Epple, B. "A comprehensive evaluation of different radiative transfer models in a gas turbine combustor under conditions of oxy-fuel combustion with dry recycle", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 172: 121-133, (2016).
- [5] Li, H., Yan, J., Yan, J., Anheden, H. "Impurity impacts on the purification process in oxy-fuel combustion based CO<sub>2</sub> capture and storage system", *Applied Energy*, 86: 202-213, (2009).
- [6] Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P., Wall, T.F. "Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation", *Progress in Energy and Combustion Science*, 31: 283-307, (2005).
- [7] Toftegaard, M.B., Brix, J., Jensen, P.A., Glarborg, P., Jensen A.D. "Oxy-fuel combustion of solid fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 581-625, (2010)
- [8] Zannis, C. T., Hountalas, D.T. "DI diesel engine performance and emissions from the oxygen enrichment of fuels with various aromatic content", *Energy & Fuels*, 18: 659-666, (2004).
- [9] Ditaranto, M., Hals, J. "Combustion instabilities in sudden expansion oxy-fuel flames", *Combustion and Flame*, 146: 493-512, (2006).
- [10] Chen, L., Yong, Z.S., Ghoniem, A.F. "Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling", *Progress in Energy and Combustion Science*, 38: 156-214, (2012).
- [11] Yoshiie, R., Hikosaka, N., Nunome, Y., Ueki, Y., Naruse, I. "Effects of flue gas re-circulation and nitrogen contents in coal on NOX emissions under oxy-fuel coal combustion", *Fuel Processing Technology*, 136: 106-111, (2015).
- [12] İlbaş, M., Yılmaz, I. ve Kaplan, Y., "Investigation of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NOX emission characteristics in a model combustor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 1139-1147, (2005).