



Oksitleyiciye su buharı ilavesinin kok fırını gazı yanma davranışlarına olan etkisinin sayısal olarak incelenmesi

Serhat KARYEYEN¹, Mustafa İLBAŞ^{1*}

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışma kapsamında, oksitleyiciye su buharı ilavesinin kok fırını gazı yanma davranışlarına olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Ansys Fluent yazılımı kullanılmıştır. Oksitleyici olarak kuru havanın kullanıldığı tahmin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları trend ve değerler bakımından belirlenmiştir. k- ϵ standard türbülans modeli, türbülans modeli olarak seçilmiş olup, üç boyutlu sayısal modellemeler için PDF / Mixture Fraction yanma modeli ve P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır. Yapılan tahmin sonuçlarına göre, oksitleyici bünyesine ilave edilen su buharının kok fırını gazı için elde edilen sıcaklık değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Sonuçlar emisyon bakımından değerlendirildiğinde, yapılan su buharı ilavesi ile birlikte NOX emisyonlarının önemli derecede, CO₂ emisyonlarının ise bir miktar azaldığı tespit edilirken CO emisyonlarının ise bir miktar arttığı ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, alternatif bir yakıt olarak kok fırını gazı kullanımının yol açtığı yüksek NOX probleminin oksitleyici bünyesine su buharı ilavesi ile büyük ölçüde aşılabildiği sonucuna varılmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 10/11/2017
Düzeltilme: 13/12/2017
Kabul: 26/12/2017

Anahtar Kelimeler

Yanma
Kok fırını gazı
Su buharı
HAD

Keywords

Combustion
Coke oven gas
Steam
CFD

Numerical investigation of steam addition into the oxidizer on combustion behaviours of coke oven gas

Abstract

The effects of steam addition into the oxidizer on combustion behaviours of coke oven gas has been numerically investigated within the present study. Ansys Fluent that is a commercial computational fluid dynamics code has been used in the study. The predictions in which air have been used as oxidizer have been compared with the experimental results and it has been determined that the predicted results are in good agreement with them in terms of trends and values. k- ϵ standard turbulence model has been selected as turbulence model, the PDF/Mixture Fraction combustion model and P-1 radiation model have been used for three-dimensional modellings. According to the predicted results, it has been revealed that steam addition into the oxidizer has decreased the predicted temperature values of coke oven gas. When the results are evaluated in terms of emissions, it has been found out that steam addition into the oxidizer has increased CO emissions somewhat while it has decreased NOX emissions considerably and CO₂ emissions somewhat. Therefore, it has been concluded that high NOX problem caused by the use of coke oven gas being an alternative fuel can be overcome via steam addition into the oxidizer.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, günümüzün en önemli araştırma konuları arasında yer almaya devam etmektedir. Çünkü enerji, insanoğlunun varoluşundan günümüze kadar her zaman bir ihtiyaç olmuştur. Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç da giderek artmakta olup bu durum da enerji kaynaklarının kullanımına olan yönelimi arttırmakta, bu nedenle de mevcut fosil enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Doğalgaz ve petrol gibi fosil enerji kaynakları için bilim adamları tarafından öngörülen tükenme süreleri yüzyılı aşmamaktadır. Ayrıca, bu fosil enerji kaynaklarının Dünya üzerindeki dağılımı, başka sosyo-ekonomik ve siyasal problemleri de beraberinde getirmektedir. Ancak kömür için durum biraz daha farklıdır. Kömür, Dünya üzerinde nispeten daha adil bir şekilde yayılmıştır. Üstelik, kömür için öngörülen

*İletişim yazarı, e-mail: ilbas@gazi.edu.tr

tükenme süresi en az 200 yıl olarak tahmin edilmektedir. Bu durumun da, kömürü orta vadede daha önemli bir enerji kaynağı haline getireceği düşünülmektedir [1].

Fosil yakıtlar, ihtiva ettikleri yüksek miktardaki enerjileri ile günümüzün en önemli enerji kaynakları olmaya devam etmektedirler (yaklaşık % 85'ten fazla). Fosil yakıtların yakılması neticesinde açığa çıkan ısı enerjisi, bazı uygulamalar için doğrudan bazı uygulamalar içinse bir çevrim yardımı ile elektrik enerjisine çevrilerek kullanılmaktadır. Ancak, fosil yakıtların yakılması ile beraber, çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyecek CO, CO₂, NO_x, SO_x vb. bazı emisyonlar açığa çıkmaktadır. Özellikle kömürün yanması neticesinde yüksek seviyelerde CO, NO_x ve SO_x salınımı gerçekleşmektedir. Dünya'daki bir çok ülke, bahsi geçen bu kirleticilerin seviyelerini azaltabilmek için bazı kısıtlamalara gitmekte, bu durum da bilim adamlarını daha temiz ve daha verimli yakıt eldesi sağlamaya ve yakma sistemlerini geliştirmeye itmektedir. Bunlardan birisi de, kömürün içerisindeki kirleticilerden kurtulmasını ve yüksek oranda karbon içeren kok eldesi için gerçekleştirilen koklaştırma işlemidir.

Kömürün koklaştırılması işlemi ile kok üretilirken aynı işlem neticesinde bir gaz da üretilir. Bu gaz, yoğunlaşabilir, aşındırıcı ya da ekonomik olarak değişken bileşenleri ayrıştırıldıktan sonra temiz bir gaz yakıt olarak elde edilebilmesi için ürün fabrikasında işlenir. Kok fırını gazı bünyesinde bir çok farklı bileşik bulunmakta olup hacimce % bileşenleri şöyle sıralanabilir [2]:

Hidrojen (H ₂)	48-55
Metan (CH ₄)	28-30
Karbonmonoksit (CO)	5,0-7,5
Karbondioksit (CO ₂)	1,5-2,5
Nitrojen (N ₂)	1,0-3,0
Yüksek Parafinler ve Doymamış Hidrokarbonlar	2,5-4,0
Oksijen	0,0-0,5

Kok fırını gazı, bünyesinden ihtiva ettiği bileşenler bakımından değerlendirildiğinde, özellikle hidrojen ve metan gibi yanabilir bileşenler toplamının % 80'e yakın olması nedeniyle oldukça kaliteli bir gaz yakıt olduğunu anlaşılmaktadır. Ayrıca, kömürlerin gazlaştırılması ile elde edilen sentetik yakıtlara, içerikleri bakımından bazı farklılıklar gösterse de 5 ana bileşen (H₂, CH₄, CO, CO₂ ve N₂) bakımından da yakınlık göstermektedir [3]. Bu nedenle, bu çalışma için gerçekleştirilen literatür araştırmasında tüm gaz yakıtlar dikkate alınmış ve yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Asai vd. [4] tarafından yapılan bir çalışmada hidrojen zengin yakıtların yanma esnasında meydana gelen dalgalanmaları kontrol altına alabilmek için çoklu-enjeksiyonlu bir yakıcı kullanılmış ve bu yakıtların yanma karakteristikleri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan dışbükey yakıcının bu yakıtların yakılmasında meydana gelen yanma kararsızlıklarını azalttığı sonucuna varılmıştır. Lee vd. [5] kömür-kaynaklı sentetik yakıtların yanma karakteristiklerini gerçekleştirdikleri bir deneysel çalışma ile araştırmışlardır. Bu çalışmada, azot ile seyreltme yapılarak NO_x emisyonlarının azaltılması hedeflenmiş ve yaklaşık 5 ppm'nin altına kadar da indirilebilmiştir. Lee vd. [6] tarafından gerçekleştirilen diğer başka bir çalışmada ise farklı içeriklere sahip sentetik yakıtların gaz türbini yanma şartlarında yanma ve emisyon karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Lee vd. [7] bir başka çalışmalarında da bir önceki [6] çalışmalarında kullandıkları aynı gaz türbinini kullanarak farklı seyrelticilerin emisyonlara olan etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre en iyi seyreltmenin su buharı ile yapıldığı sonucuna varmışlardır. Habib vd. [8] tarafından gerçekleştirilen sayısal bir çalışmada ise paket tipi bir kazanda farklı içeriklere sahip sentetik yakıtların yanma ve emisyon karakteristikleri araştırılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde hidrojen oranı daha yüksek olan sentetik yakıtın alevinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır. Göke vd. [9] ön-karışımli bir yakıcıda doğalgaz-hidrojen karışımli bir yakıtı

kuru ve buharla seyreltilmiş oksitleyici koşullarında yakmışlardır. Elde edilen bulgulara göre, buharla seyreltmenin NO_x emisyonlarının azaltılmasına önemli derecede katkı sağladığı belirlenmiştir. Tian vd. [10] ön-karışimsız bir yakıcıda yalnızca hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksitten karışımından oluşan bir sentetik yakıtı, nemli hava şartlarında yakmışlar ve nemli havanın yanma karakteristiklerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışma ile birlikte, hava içerisindeki nem oranı arttırıldıkça NO_x emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. Li vd. [11] gerçekleştirdikleri sayısal bir çalışma ile birlikte kısmi ön-karışimli yanma şartlarında sentetik yakıtları CO₂ ve H₂O ile seyreltmışler ve bu seyreltmenin yanma ve emisyon karakteristiklerine olan etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan modellemede LES (Large Eddy Simulation) tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre CO₂'nin alev yapısını daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır.

Yukarıda, konuyla alakalı bazı çalışmalar sunulmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, oksitleyicinin su buharı ile seyreltildiği ve bu seyreltmenin kok fırını gazının yanma ve emisyon parametrelerine olan etkilerinin araştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Karışım içeriği sonraki bölümlerde sunulacak olan kok fırını gazı, kuru hava şartlarında İlbas ve Karyeyen [12] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada deneysel ve sayısal olarak yakılmış ve yanma ve emisyon parametreleri tarafından araştırılmıştır. Yapılan bu sayısal çalışmada ise, bu yakıt, 10 kW ısı gücü ve 0,83 eşdeğerlilik oranı için gerekli minimum O₂ miktarı değiştirilmeden, oksitleyici, bünyesinde hacimsel olarak % 10, % 20 ve % 30 su buharı olacak şekilde seyreltilmiş ve bu seyreltmenin kok fırını gazı yanma karakteristiklerine olan etkisi sayısal olarak araştırılmıştır.

2. SAYISAL MODELLEME (NUMERICAL MODELLING)

Gaz karışımı yakıt yakma işlemi için tanımlanan matematiksel modellemeler, kararlı durum koşulu, üç-boyutlu olarak süreklilik, momentum, enerji ve tür denklemlerine dayanmaktadır. Taşıma denkleminin genel formu şöyledir [13]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial x} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (2.1)$$

Burada Φ bağımlı değişkenleri temsil eder. Γ , Φ değişkeni için taşıma katsayısını, S_{Φ} ise Φ için taşıma denkleminin kaynak terimini belirtir.

Bu çalışmada, yanma modeli olarak Mixture Fraction / PDF Modeli kullanılmıştır. Bu yanma modelinde, her bir tür için taşıma denklemleri çözülmez. Onun yerine ilgili her bir türün konsantrasyonu, tahmin edilen karışım oranı alanlarından türetilir. Türbülans ve kimyanın etkileşimi, olasılıklı yoğunluk fonksiyonuyla (PDF) hesaplanır [14].

PDF model yaklaşımı, özellikle türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici sistemi için, karışım oranı f , yerel yakıt kütle oranı olarak şöyle ifade edilebilir:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \quad (2.2)$$

Burada m_F ve m_O , yakıt ve oksitleyici kütle oranlarını göstermektedir.

Karışım oranı f , akış alanındaki her noktadaki değeri, türbülanslı akış alanının ortalama zaman değeri için aşağıdaki koruma denkleminin çözümü ile hesaplanan ve korunan bir miktardır [14].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (2.3)$$

Burada S_m , yalnızca kütle, sıvı yakıt damlacıklarından gaz fazına transferi ile ilgili bir kaynak terimidir.

Ortalama karışım oranı için çözüme ek olarak, karışım oranı değişkeni için bir koruma denklemi çözülür. \bar{f}'^2 türbülans-kimya etkileşimlerini tanımlayan kapanma modelinde kullanılır.

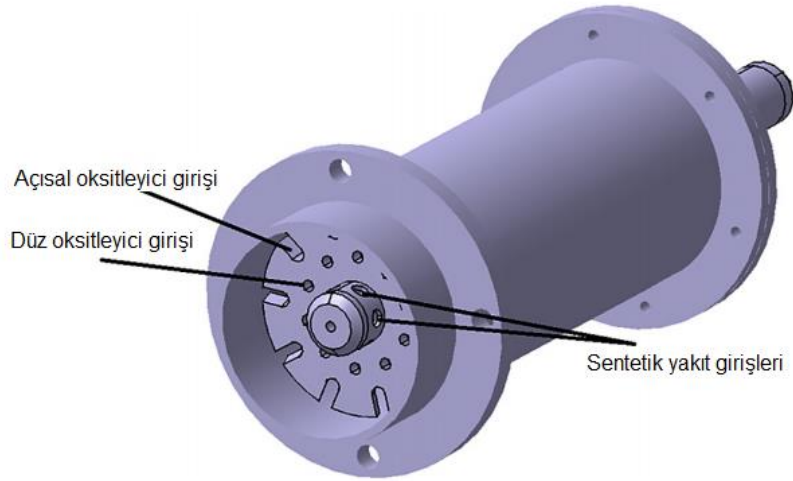
$$\frac{\partial(\rho\bar{f}'^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f}'^2)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}'^2}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}'^2}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}'^2 \quad (2.4)$$

burada σ_t , C_g ve C_d Mixture Fraction/PDF modelinde kullanılan sabitlerdir.

Radyasyonla ısı transferi yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Yanma odalarındaki, alev sıcaklığı, stokiyometrik yanma koşullarında genellikle yüksektir (1000-1600 °C). Bundan dolayı, yanma işlemleri için radyasyon modelinin dahil edilmesi sıcaklık dağılımlarının daha doğru ve iyi tahmin edilebilmesine olanak sağlar [14]. P-1 modeli, daha genel P-N modelinin en basit örneğidir ve diğer radyasyon modellerine göre bazı avantajları vardır. Örneğin; P-1 modeli ile daha az bilgisayarlı işlemi ile daha etkin sonuçlar elde edilebilir. P-1 modeli, eğrisel koordinatlar içeren karmaşık geometrilere kolayca uygulanabilir [15]. Bu nedenle, bu çalışmada kok fırını gazının sayısal modellenmesi ile yapılan sıcaklık ve emisyon tahmininin daha doğru sonuç vermesi için P-1 radyasyon modeli tercih edilmiştir.

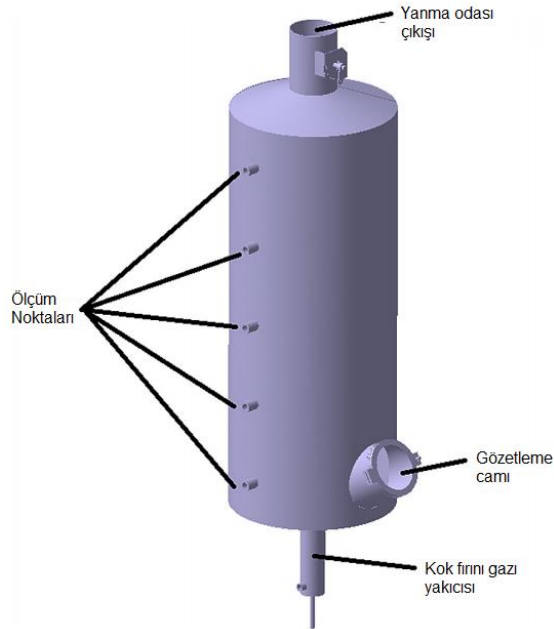
3. ÇALIŞMADA KULLANILAN YAKICININ ve YANMA ODASININ ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF THE BURNER and THE COMBUSTOR USED IN THE STUDY)

Bu çalışmada kok fırını gazı yakılmasında kullanılan oksitleyici su buharı ile seyreltilmiş ve bu seyreltmenin kok fırını gazı yanma ve emisyon karakteristiklerine olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada, İlbas ve Karyeyen tarafından daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada geliştirilen kok fırını gazı yakıcısı kullanılmış ve Şekil 1'de gösterilmiştir [12]. Bu yakıcı, ön-karışimsız bir yakıcı tipidir. Yakıcıda, yakıt ve oksitleyici eş merkezli olsa bile yakıt, yanma bölgesine aksel olarak değil radyal olarak girmektedir. Yakıcının bu özelliği, yakıt ve oksitleyicinin daha iyi karışmasına ve daha kararlı alev oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Yakıcıda 2 farklı oksitleyici girişi bulunmaktadır. Bunlarda birisi, Şekil 1'de de gösterildiği gibi, oksitleyicinin 15°'lik bir eğimle yanma bölgesine dahil olmasını ve teğetsel hız etkisiyle daha kararlı bir alev oluşturmasını sağlamaktadır. Diğer oksitleyici girişi ise herhangi bir açı ile oluşturulmamış olup oksitleyici bu giriş ile yanma bölgesine yalnızca aksel hız oluşturarak girmektedir.



Şekil 1. Kok fırını gazı yakıcısı

Şekil 2’de ise bu çalışmada kullanılan yanma odasının katı modeli sunulmuştur. Bu yanma odası, Ilbas ve Karyeyen [12] tarafından daha önce gerçekleştirilen çalışmada deneysel olarak da kullanılmıştır. Bahsi geçen çalışmada elde edilen veriler ayrıca, bu çalışmada deneysel doğrulama için de kullanılmıştır. Yanma odasının üzerinde 5 adet ölçüm noktası bulunmaktadır. Bu çalışmada da bu ölçüm noktaları için elde edilen sayısal tahminler sunulmuştur. Yanma odasının dış yarı çapı 20 cm, iç yarı çapı 19,8 cm, uzunluğu ise 1 m’dir.



Şekil 2. Yanma odası

4. SINIR ŞARTLARI (BOUNDARY CONDITIONS)

Çalışmada kullanılan kok fırını gazının özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Kok fırını gazının sıcaklığı 293 K olarak belirlenmiştir. Oksitleyici sıcaklığı ise su buharı ilavesinden dolayı 400 K olarak ayarlanmıştır. Kok fırını gazı ve oksitleyici basınçları ise atmosferik olarak belirlenmiştir. Ilbas ve

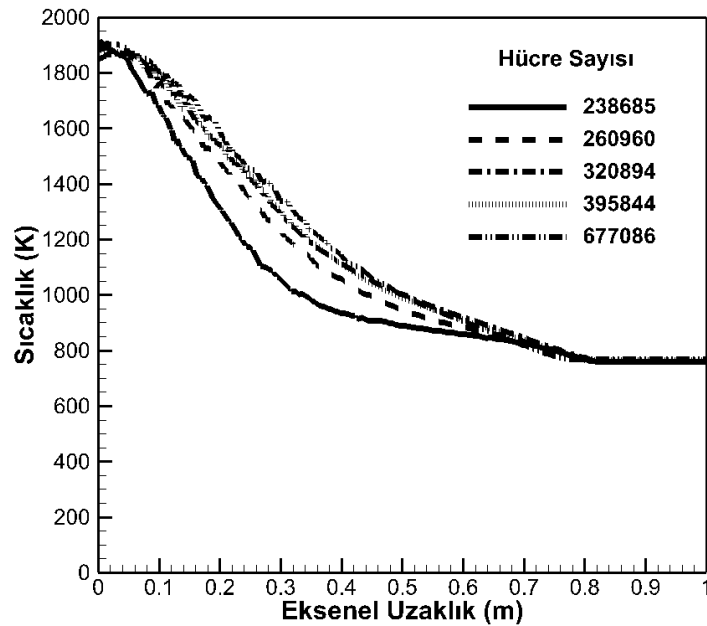
Karyeyen [12] tarafından daha önce gerçekleştirilen ve kuru hava ile yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerin bu çalışmanın doğrulanmasında kullanılabilmesi için tüm sayısal modellemelerde yanma odası dış duvarının 25°C'lik bir ortamda olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 1. Kok fırını gazının özellikleri

Kok Fırını Gazı	% Hacimce
CH ₄	27
H ₂	55
N ₂	10
CO ₂	2
CO	6

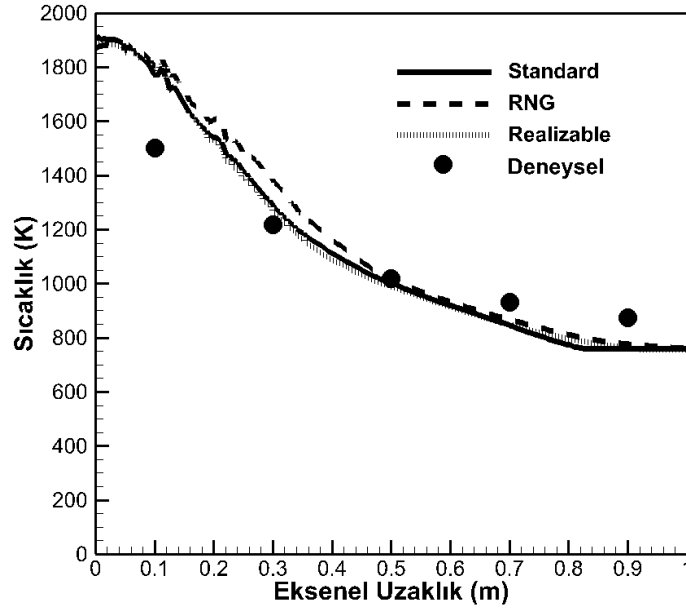
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Sayısal çalışmalarda kullanılan akış hacminin hücrelere bölünmesi bilinmektedir. Bu çalışmada da yanma odası içerisindeki akış hacmi hücrelere ayrılmıştır. Ancak, sayısal çalışmalarda bilgisayarların çözüm zamanından kazanmak ve daha kısa sürede doğru sonuçlara ulaşmak için hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi yapılmasında fayda vardır. Bu nedenle, kok fırını gazının yanma modellemelerine geçilmeden önce farklı hücre sayıları için modellemeler gerçekleştirilmiş ve bu modellemeler neticesinde elde edilen aksel sıcaklık dağılımları Şekil 3'te gösterilmiştir. 238685 ve 260960 hücre sayılı modellemeler ile elde edilen aksel sıcaklık dağılımlarında diğer hücre sayılı modellemeler neticesinde elde edilen aksel sıcaklık dağılımlarından daha farklı birer profil ortaya çıktığı Şekil 3'ten anlaşılmaktadır. Ancak, 320894, 395844 ve 677086 hücre sayılı modellemelerde elde edilen aksel sıcaklık dağılımları birbirine benzer sonuçlar olarak tahmin edilmiştir. 320894 hücre sayılı ağ yapısından daha fazla hücre sayısı içeren ağ yapılarını kullanmak bilgisayar çözümleme süresini uzatacağından ve anlamsız olacağından 320894 hücre sayısı içeren ağ yapısı, kok fırını gazının sonraki modellemelerinde kullanılmak üzere seçilmiştir.

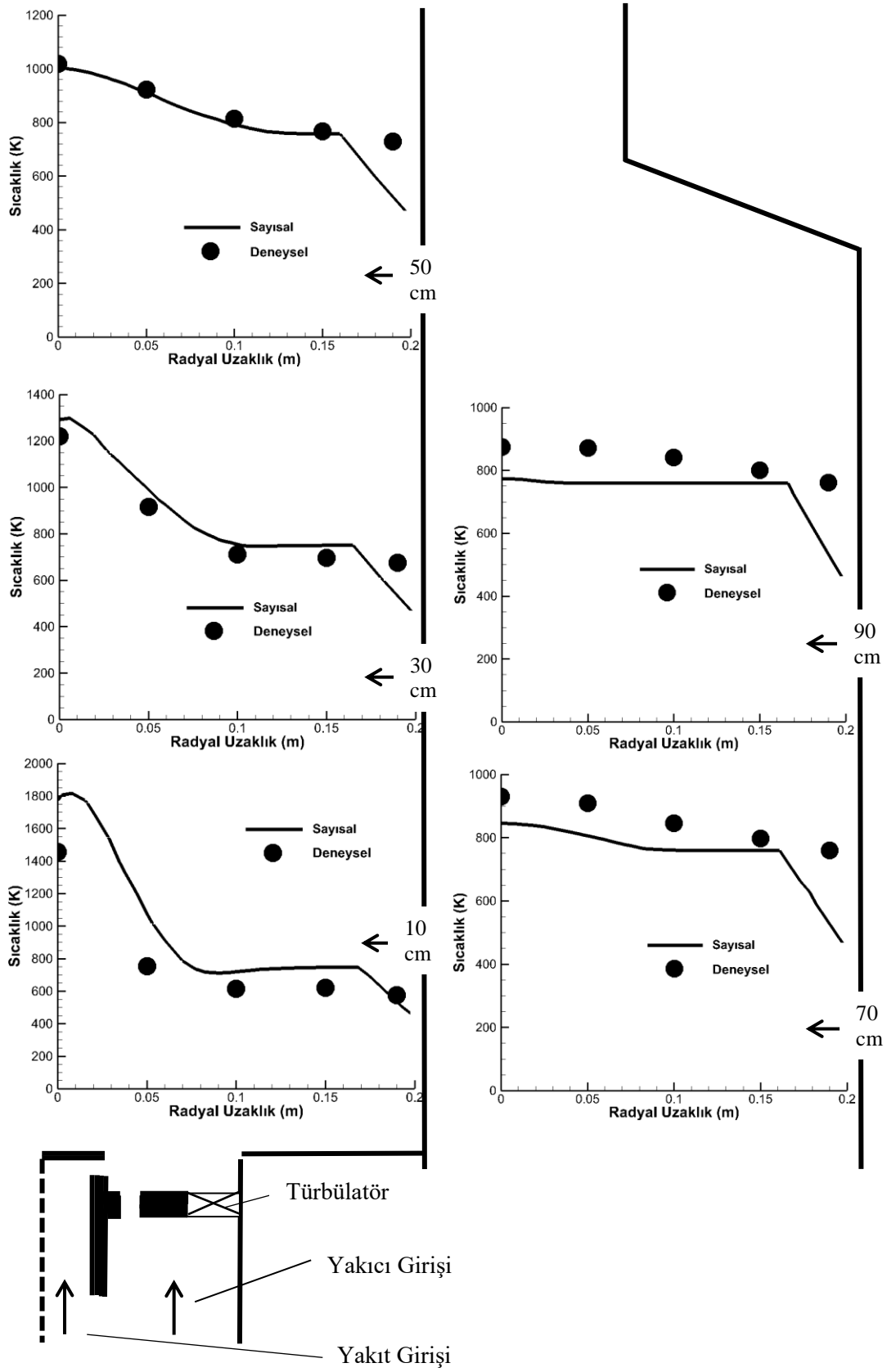


Şekil 3. Farklı hücre sayıları için aksel sıcaklık dağılımları

Şekil 4'te ise farklı türbülans modelleri için yapılan sayısal tahminler neticesinde elde edilen aksel sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Yapılan tahminler, İlbas ve Karyeyen [12] tarafından kuru hava şartlarında gerçekleştirilen deneysel aksel sıcaklık dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4 değerlendirildiğinde, 3 farklı türbülans modeli için de benzer aksel sıcaklık dağılımlarının tahmin edildiği anlaşılmaktadır. Ancak yine de bazı ölçüm noktalarında k- ϵ standard türbülans modeli ile yapılan tahminlerin deneysel verilerle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, uygun türbülans modeli olarak k- ϵ standard türbülans modeli seçilmiş ve sonraki modellemelerde bu türbülans modeli kullanılmıştır.



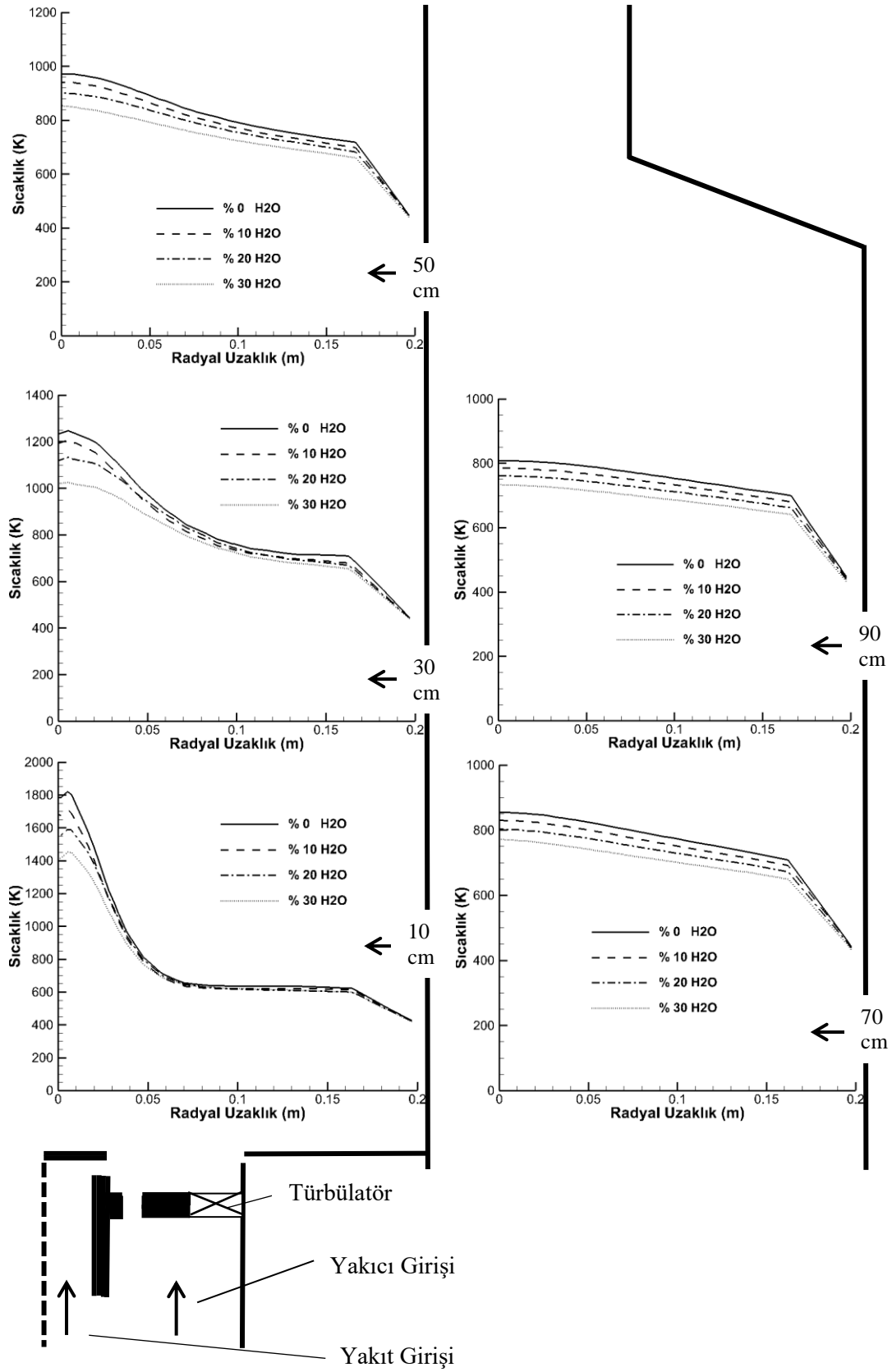
Şekil 4. Farklı türbülans modelleri ile gerçekleştirilen modellemeler için aksel sıcaklık dağılımları



Şekil 5. Kok fırını gazı için elde edilen deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

Kok fırını gazının yakılmasında kullanılan oksitleyiciye buhar ilavesinin yanma karakteristiklerini olan etkilerinin araştırıldığı modelleme sonuçlarına geçilmeden önce, yapılacak modellemelerin doğruluğunun ortaya konulması gerekmektedir. Bu nedenle, Ilbas ve Karyeyen [12] tarafından elde edilmiş deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Bu deneylerde kok fırını gazı, oksitleyici olarak kuru hava kullanılarak aynı yakıcı, yanma odası ve sınır şartlarında yakılmıştır. Elde edilen radyal sıcaklık dağılımları, bu çalışma kapsamında, oksitleyici olarak kuru havanın kullanıldığı modelleme tahminleri ile karşılaştırılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'ten de anlaşılacağı gibi, yanma odası boyunca yapılan radyal sıcaklık tahminlerinin elde edilen deneysel verilerle dağılım, trend ve değer bakımından büyük ölçüde uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Yanmanın modellenmesi birçok denklemin çözümünü gerektiren oldukça karmaşık bir işlemdir. Ayrıca, tahmini yapılan sıcaklık seviyelerinin de oldukça yüksek olması nedeniyle yapılan modelleme sonuçlarının deneysel verilerle tam bir uyum içerisinde olması da her zaman beklenmemektedir. Şekil 5'te gösterilen karşılaştırmalarda kabul edilebilir hataların olduğu da açıktır. Ancak yine de trend uyumunun büyük ölçüde sağlanmış olması sonraki modellemelerin de doğru olarak kabul edilebilmesi yeterlidir.

Kok fırını gazı yanmasında kullanılan oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesi neticesinde elde edilen radyal sıcaklık dağılım tahminleri Şekil 6'da gösterilmiştir. İlk olarak, tüm yanma şartları için en yüksek sıcaklık seviyelerine alev bölgesinde ulaşıldığı tespit edilmiştir. Kuru hava şartları için tahmin edilen alev sıcaklığı değeri 1800 K civarında iken, oksitleyici bünyesindeki su buharı seviyesi arttırıldıkça bu değer, sırasıyla 1650 K, 1550 K ve 1400 K dolaylarında tahmin edilmiştir. Ardından, tüm yanma şartları için, ışınlama ve taşınım ile ısı transferi etkileri nedeniyle yanma odası çıkışına doğru gidildikçe sıcaklık seviyelerinde azalmalar olduğu ve yapılan tahminler neticesinde yanma odası çıkışında kuru hava şartları için 800 K dolaylarında tahmin yapılırken diğer yanma şartları için sırasıyla yaklaşık 775 K, 750 K ve 725 K'lik yanma odası çıkış sıcaklığı tahminleri yapılmıştır. Yanma odası boyunca farklı ölçüm noktaları için elde edilen sıcaklık tahminleri değerlendirildiğinde, oksitleyiciye su buharı ilavesinin kok fırını gazı yanma performansını bir miktar düşürdüğü, ancak azalma seviyelerinin 25 K ila 75 K arasında kaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç doğrultusunda, kok fırını gazı yanmasında buhar enjekte edilmiş oksitleyici kullanmanın kok fırını gazı yanma performanslarını önemli derecede azaltmadığı sonucu çıkarılmıştır.

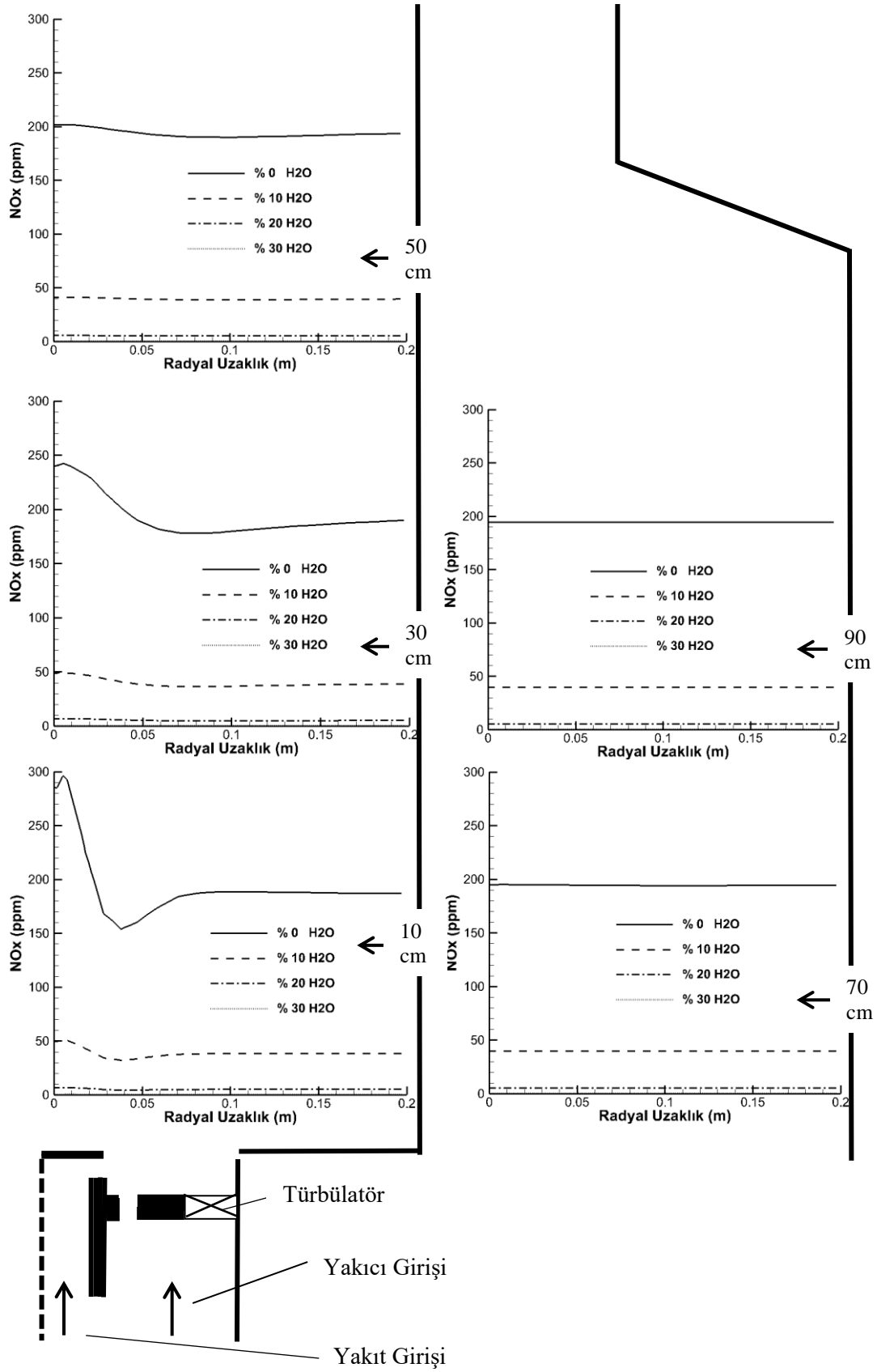


Şekil 6. Yakıcıya su buharı ilavesinin sıcaklık dağılımlarına olan etkisi

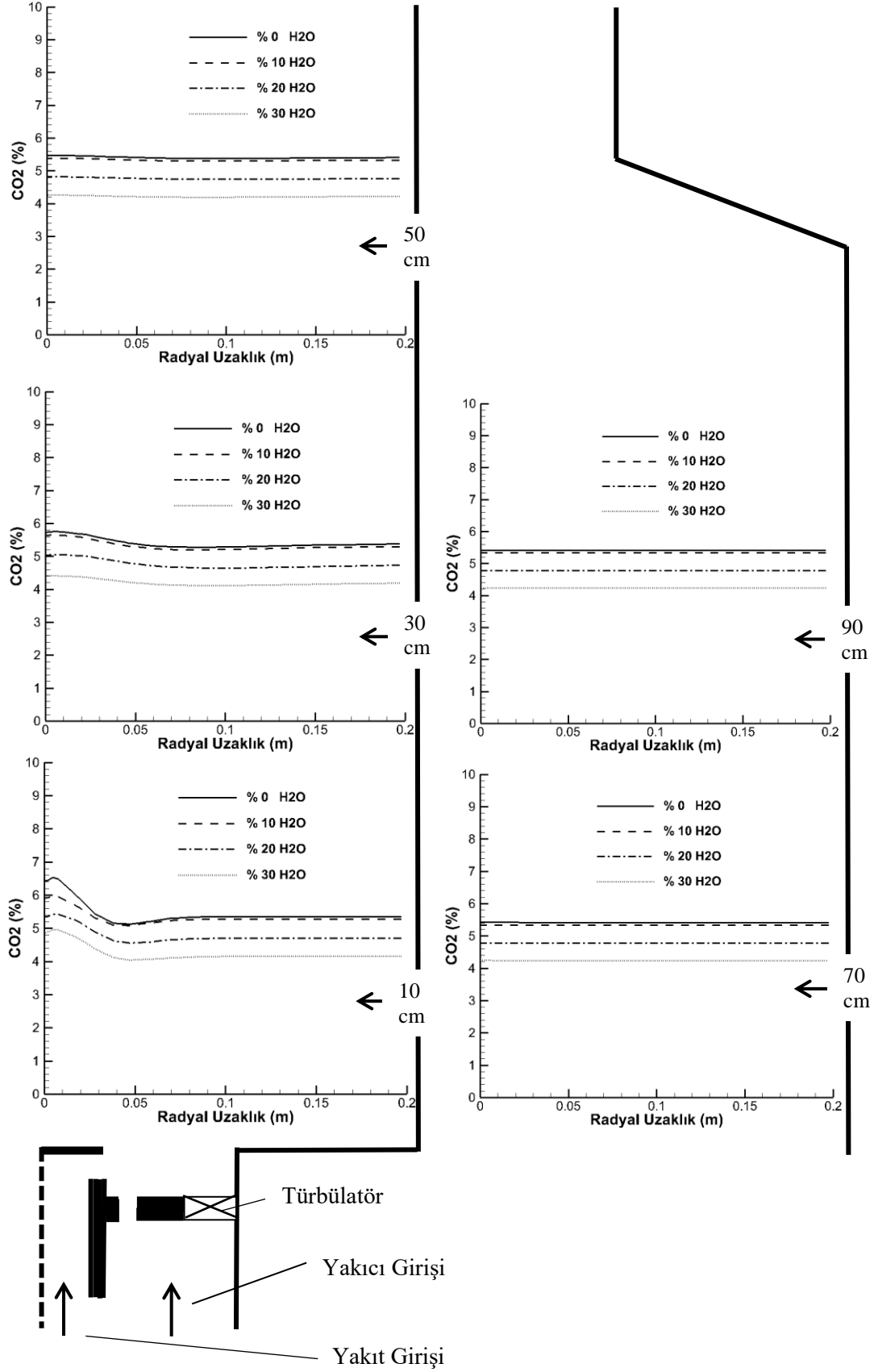
Çalışmanın bu bölümünde ise kok fırını gazı yanmasında kullanılan oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesinin yanma sonu emisyonlarına olan etkileri sunulmuştur. İlk olarak, Şekil 7’de Fluent programının NO_x-son işlemcisi ile tahmini yapılan radyal NO_x dağılımları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kuru hava ile gerçekleştirilen oksitleme işleminde yüksek NO_x oluşumlarının ortaya çıktığı rahatlıkla söylenebilir. Yanma odası çıkışında kuru hava şartları için yaklaşık 200 ppm’lik NO_x seviyesi tahmin edilmiştir. Burada, yakıt bünyesinde serbest olarak bulunan N₂’un, tıpkı havada bulunan N₂ gibi ısı NO_x’a katkı sağlaması önemli derecede rol oynamaktadır. Oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesi ile birlikte NO_x seviyelerinde önemli derecelerde azalmalar olduğu da yine Şekil 7’den anlaşılmaktadır. % 10’luk bir seyreltme ile yanma odası çıkışındaki NO_x seviyesi 50 ppm’nin altına inerken, % 20 ve % 30’luk seyreltmeler ile bu seviyeler yaklaşık 5 ppm ve 1 ppm seviyelerine kadar gerilemiştir. Sonuç olarak, NO_x emisyonları bakımından değerlendirildiğinde kok fırını gazının yakılmasında kullanılan oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesi ile NO_x emisyonu seviyelerinde önemli derecede azalma sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında CO ve CO₂ emisyon tahminleri de yapılmış olup bu tahminlere ilişkin radyal dağılımlar Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9’u birlikte değerlendirmek daha doğru olacaktır. Çünkü CO₂ emisyonlarının azalması CO emisyonlarının artması ile de açıklanabilmektedir. Oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesi neticesinde tüm yanma şartları için CO₂ emisyonları bir miktar azalmış, buna karşın CO emisyonlarında bir miktar artış tespit edilmiştir. Oksitleyici bünyesinde bulunan ve teorik olarak yeterli olan O₂ seviyeleri tüm yanma şartları için aynı olmasına rağmen bu sonuç, oksitleyici bünyesindeki su buharının, yakıttaki yanıcı bileşenlerden C’un oksitleyicideki yakıcı bileşen olan O₂ ile buluşmasını ve tepkimeye girerek CO₂ oluşturmasını bir miktar zorlaştırması ile açıklanabilir.

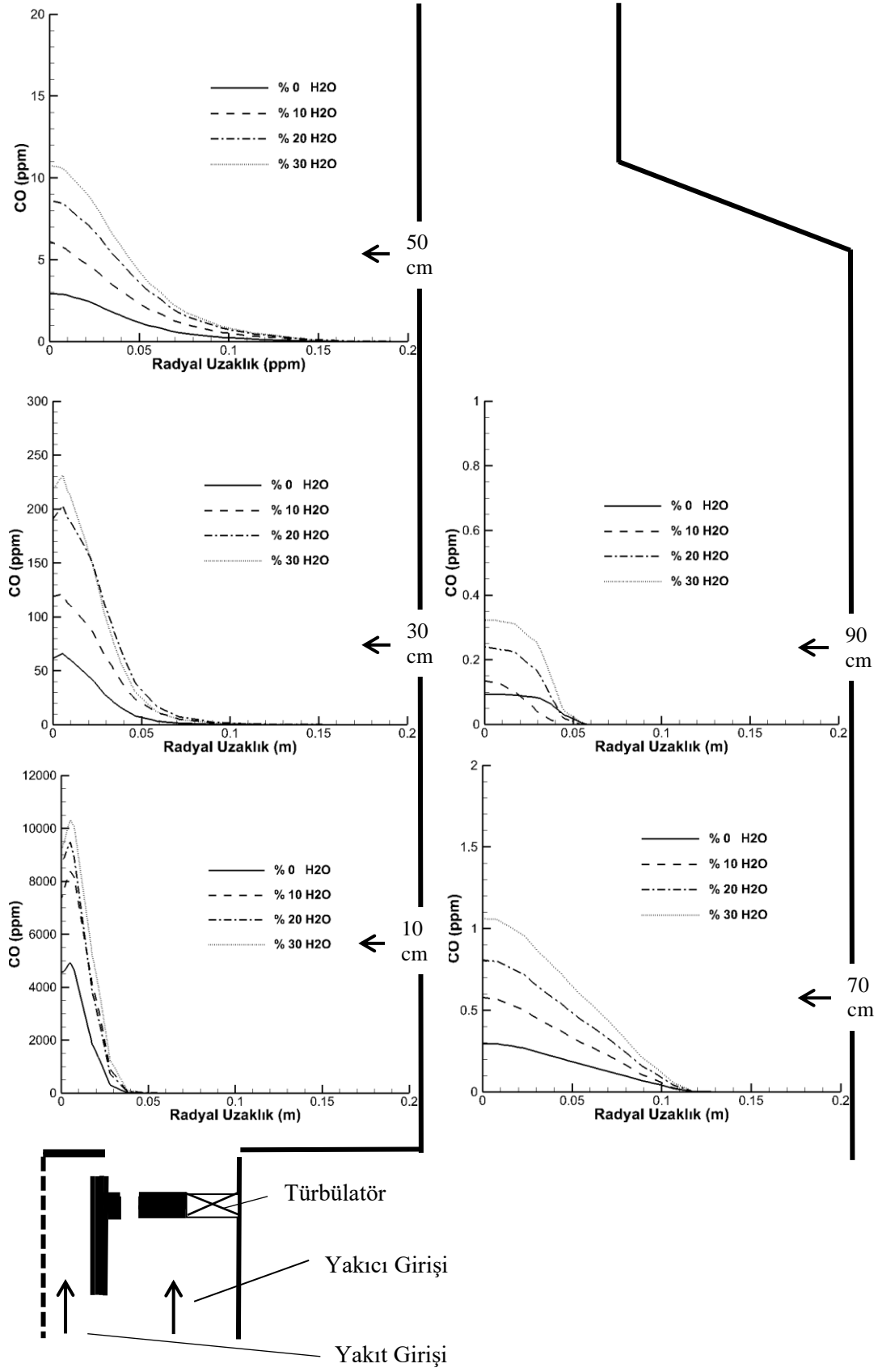
Bu çalışma kapsamında son olarak H₂O emisyon tahminleri de yapılmış ve yanma odası boyunca elde edilen H₂O tahminleri Şekil 10’da sunulmuştur. Şekil 10’dan görüleceği gibi oksitleyici bünyesindeki su buharı seviyeleri arttırıldıkça yanma odası içerisindeki su buharı seviyeleri de beklendiği gibi artmaktadır. Bunun yanı sıra, % 10 su buharı içeren oksitleyici ile gerçekleştirilen yanma ile tahmin edilen H₂O seviyesi yanma odası çıkışında yaklaşık % 25 olarak tahmin edilirken, % 20 ve % 30 su buharı içeren oksitleyici ile gerçekleştirilen yanma neticesinde yapılan tahmin ile belirlene H₂O seviyeleri aynı oranda yükselmemiştir. Bu durum da, kok fırını gazı bünyesinde bulunan ve yanabilir bileşen olarak bilinen H₂’nin, oksitleyici içerisindeki su buharı seviyesi arttıkça, oksitleyici bünyesinde bulunan O₂ ile buluşmasının ve reaksiyona girmesinin biraz daha zorlaşması ile açıklanabilmektedir.



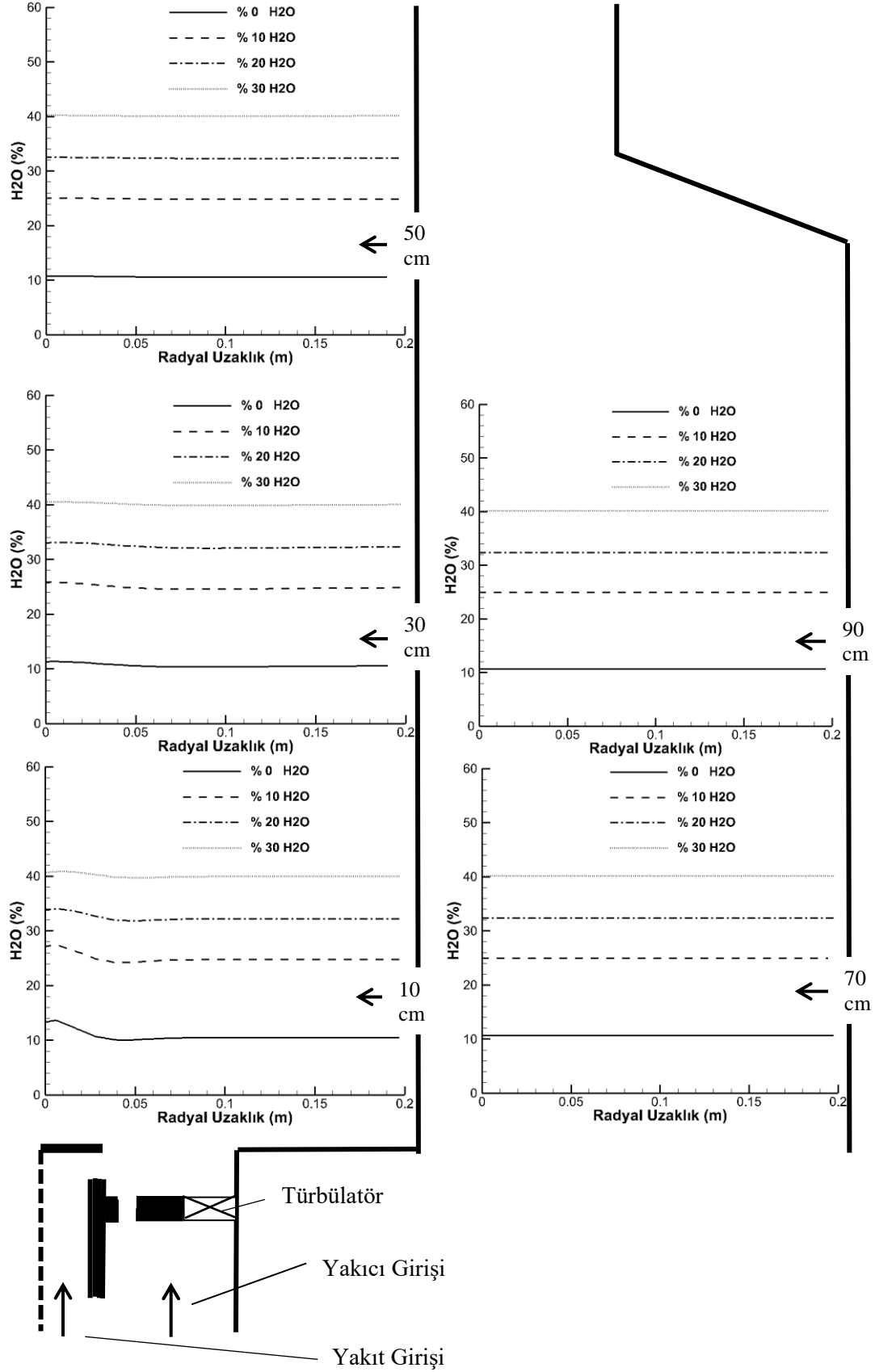
Şekil 7. Yakıcıya su buharı ilavesinin NO_x dağılımlarına olan etkisi



Şekil 8. Yakıcıya su buharı ilavesinin CO₂ dağılımlarına olan etkisi



Şekil 9. Yakıcıya su buharı ilavesinin CO dağılımlarına olan etkisi



Şekil 10. Yakıcıya su buharı ilavesinin H₂O dağılımlarına olan etkisi

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kok fırını gazının yakılmasında kullanılan oksitleyiciye su buharı ilavesi yapılmış ve bu ilavenin kok fırını gazının yanma karakteristiklerine olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Fluent kullanılmıştır. Modellemeler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiş ve yanma sonu sıcaklık ve emisyon dağılımları sunulmuştur. Modellemeler ile yapılan tahminler neticesinde oksitleyiciye su buharı ilavesinin sıcaklık seviyelerinde bir miktar azalmaya neden olduğu sonucuna varılmıştır. Buna karşın, oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesinin kok fırını gazının NO_x emisyonlarını önemli derecede azalttığı tespit edilmiştir. CO₂ emisyonlarında ise bir miktar azalma olurken CO seviyelerinde de bir miktar artış olduğu ortaya konulmuştur.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde kok fırını gazının alternatif bir yakıt olarak kullanılabileceği, bu durumda ortaya çıkan yüksek NO_x probleminin ise oksitleyici bünyesine su buharı ilavesi ile aşılabileceği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, 114M668 nolu proje desteğinden dolayı Tübitak'a, Ansys Fluent yazılımının kullanımından dolayı Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Karyeyen, Model bir gaz türbini yanma odasında kömür gazları yanma davranışının sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [2] K. Wright, Coke Oven Gas Treatment Tar, Liquor, Ammonia, The Coke Oven Managers' Year-Book, COMA (Coke Oven Managers Association), 2003.
- [3] J. G. Speight, Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance, United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [4] T. Asai, S. Dodo, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue, Effects of multiple injection-burner configurations on combustion characteristics for dry low NO_x combustion of hydrogen-rich fuels, ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 1–10.
- [5] M. C. Lee, J. Yoon, S. Joo, Y. Yoon, Gas turbine combustion characteristics of H₂/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle. International Journal of Hydrogen Energy, 40: (2015) 11032–11045.
- [6] M. C. Lee, S. B. Seo, J. H. Chung, S. M. Kim, Y. J. Joo, D. H. Ahn, Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas. Fuel, 89: (2010) 1485–1491.
- [7] M. C. Lee, S. B. Seo, J. Yoon, M. Kim, Y. Yoon, Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine. Fuel, 102: (2012) 431–438.
- [8] M. A. Habib, E. M. A. Mokheimer, S. Y. Sanusi, M. A. Nemitallah, Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler. Energy Conversion and Management, 83: (2014) 296–305.
- [9] S. Göke, M. Furi, G. Bourque, B. Bobusch, K. Gökeler, O. Krüger, S. Schimek, S. Terhaar, C. O. Paschereit, Influence of steam dilution on the combustion of natural gas and hydrogen in premixed and rich-quench-lean combustors. Fuel Processing Technology, 107: (2013) 14-22.

- [10] Y. Tian, S. Zang, B. Ge, Experimental investigation on the combustion performance of N₂ dilution in syngas non-premix combustion in humid air conditions. *Applied Thermal Engineering*, 107: (2016) 560-564.
- [11] S. Li, S. Li, D. Mira, M. Zhu, X. Jiang, Investigation of dilution effects on partially premixed swirling syngas flames using a LES-LEM approach. *Journal of the Energy Institute*, <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.09.005>, In Press.
- [12] M. Ilbas, S. Karyeyen, An experimental and numerical study on turbulent combustion of hydrogen-rich coal gases in a generated non-premixed burner. *Fuel*, 194: (2017) 274-290.
- [13] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid Dynamics. Second Edition, PEARSON Prentice Hall, 2007.
- [14] M. Ilbas, Studies of Ultra Low NO_x Burner, PhD Thesis, Cardiff, UK: University of Wales, 1997.
- [15] M. Ilbas M, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen– hydrocarbon combustion modelling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: (2005) 1113-1126.
- [16] S. Karyeyen, Geliştirilen bir yakıcıda kömür gazlarının yanma karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması, Doktora Tezi, Ankara, Türkiye, 2016.