

Numerical Investigation Of Coke Oven Gas Combustion Characteristics In A Premixed Burner

Sezgin TAŞDEMİR^{1,*}  Serhat KARYEYEN²  Mustafa İLBAŞ² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 17.01.2022
Revision: 22.02.2022
Accepted: 02.03.2022

Highlights

- CFD Modelling
- Premixed Flame
- Reaction Mechanism

Keywords

Coke Oven Gas
Combustion
Emission
Premixed Burner

In this study, the premixed combustion performance and emission characteristics of coke oven gas, which is a by-product of coal coking, were numerically investigated.

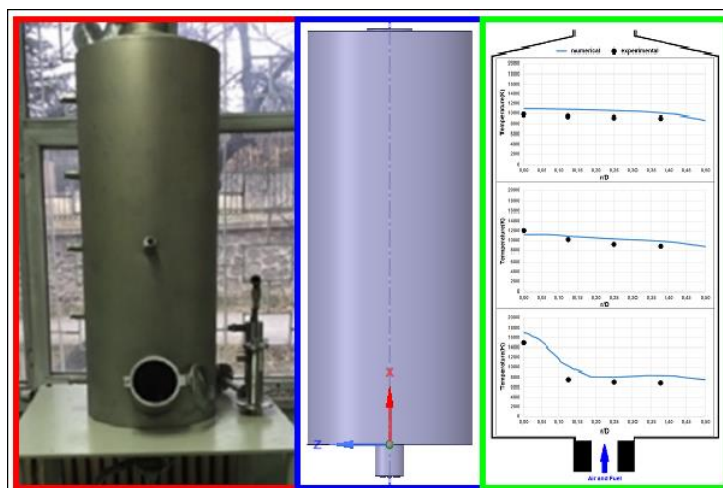


Figure A. Experimental system, numerical modeling and results

Purpose: In order to meet our ever-increasing energy needs, it may not be convenient to directly use the coal reserves. Gases obtained from coal exposed to heat treatment in an oxygen-free environment, on the other hand, would be more appropriate to consume because it is requires a simple and small burner, and especially forms less pollutant emissions.

Theory and Methods: A premixed burner pre-mixing the fuel and air, and introducing the mixture to the combustion chamber was used to burn the coke oven gas. The fuel-air mixture was consumed as premixed at excess air ratios of $\lambda=1,2$ and $\lambda=1,5$ under lean combustion conditions. In the study presented, the amount of fuel corresponding to a power of 10 kW was introduced to the combustion chamber. The experimental setup in which the measurements were made was modeled as three-dimensional through a commercial code ANSYS-Fluent. Combustion modeling was carried out by integrating the Eddy Dissipation Concept into the combustion model by creating 21, 27, 78, 162 and 239-step reactions for the coke oven gas and end-of-combustion NO_x estimations with the help of GRI-Mech 3.0 chemical kinetics as a combustion model. P-1 was chosen as the radiation model, and 3 different turbulence models were used to determine the effect of the turbulence model.

Results: It was observed that the number of reaction steps did not significantly affect the temperature, but significantly affected the NO emission estimation values.

Conclusion: The obtained temperature and NO_x profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactorily good agreement, it was seen that the 162-step reaction was sufficient.



Numerical Investigation Of Coke Oven Gas Combustion Characteristics In A Premixed Burner

Sezgin TAŞDEMİR^{1*} Serhat KARYEYEN² Mustafa İLBAŞ²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

In order to meet our ever-increasing energy needs, it may not be convenient to directly use the coal reserves, which are abundant in our country, because it is difficult to transport, requires large volumes of combustor, leaves wastes such as ash and slag, and especially due to the high pollutant emissions. Gases obtained from coal exposed to heat treatment in an oxygen-free environment, on the other hand, would be more appropriate to consume because it is easy to transport, requires a simple and small burner, and requires less air during combustion, and especially forms less pollutant emissions. In this study, the premixed combustion performance and emission characteristics of coke oven gas, which is a by-product of coal coking, were numerically investigated. A premixed burner pre-mixing the fuel and air, and introducing the mixture to the combustion chamber was used to burn the coke oven gas. The fuel-air mixture was consumed as premixed at excess air ratios of $\lambda=1,2$ and $\lambda=1,5$ under lean combustion conditions. In the study presented, the amount of fuel corresponding to a power of 10 kW was introduced to the combustion chamber. The experimental setup in which the measurements were made was modeled as three-dimensional through a commercial code ANSYS-Fluent. Combustion modeling was carried out by integrating the Eddy Dissipation Concept into the combustion model by creating 21, 27, 78, 162 and 239-step reactions for the coke oven gas and end-of-combustion NO_x estimations with the help of GRI-Mech 3.0 chemical kinetics as a combustion model. P-1 was chosen as the radiation model, and 3 different turbulence models were used to determine the effect of the turbulence model. The obtained temperature and NO_x profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactorily good agreement, it was seen that the 162-step reaction was sufficient.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17.01.2022
Düzeltilme: 22.02.2022
Kabul: 02.03.2022

Keywords

Coke Oven Gas
Combustion
Emission
Premixed Burner

Anahtar Kelimeler

Kok Fırını Gazı
Yanma
Emisyon
Ön Karışımli Yakıcı

Ön Karışımli Bir Yakıcıda Kok Fırını Gazı Yanma Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Öz

Her geçen gün daha da artan enerji ihtiyacımızı karşılamak için ülkemizde de çokça bulunan kömür rezervini doğrudan kullanmak, gerek taşınmasının zor olması, gerek büyük hacimli yakıcıya ihtiyaç duyması gerekse de kül, cüruf gibi atıklar bırakması ve özellikle kirletici emisyonlarının fazla olması nedeniyle doğrudan kullanılması elverişli olmayabilir. Oksijensiz ortamda ısı işleme maruz kalan kömürden elde edilen gazlar ise hem taşınması kolay, hem basit ve küçük yakıcıya ihtiyaç duyması hem de yakma sırasında daha az havaya ihtiyaç duyması ve özellikle daha az kirletici emisyon oluşturması nedeniyle bu gaz yakıtın tüketilmesi daha uygun olacaktır. Bu çalışmada, kömürün koklaştırma yan ürünü olan kok fırını gazının, ön-karışımli olarak yanma performansı ve emisyon karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Kok fırını gazını yakmak için yakıtı ve havayı önceden karıştırılarak yanma odasına gönderen ön-karışımli bir yakıcı kullanılmıştır. Yanma koşullarında fakir karışım bölgesinde kalınarak hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,5$ koşullarında yakıt-hava karışımı ön-karışımli olarak tüketilmiştir. Çalışmada 10 kW güce karşılık gelen yakıt miktarı yanma odasına gönderilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği ANSYS-Fluent ticari kodu ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Yanma modeli olarak GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve yanma sonu NO_x tahminleri için 21, 27, 78, 162 ve 239 basamaklı reaksiyonlar oluşturulmasıyla Eddy Dissipation Concept yanma modeline entegre edilerek yanma modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Radyasyon modeli olarak P-1 seçilmiş olup, türbülans modelinin etkisini belirlemek için de 3 farklı türbülans modeli kullanılmıştır. Elde edilen sıcaklık ve NO_x profilleri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve oldukça iyi bir uyum olduğu saptanmış, 162 basamaklı reaksiyonun yeterli olduğu görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjiye olan ihtiyaç birçok farklı kaynaklardan sağlanmaktadır. Günümüzde alternatif kaynaklara olan yönelim artsa da hala enerji ihtiyacının büyük çoğunluğu fosil kaynaklardan sağlanmaktadır ve ülkemizde kömür rezervleri fazla olduğundan sahip olduğumuz enerji potansiyelimiz yüksektir. Fakat, fosil yakıtlar özellikle de ülkemizde bulunan ısı değerleri düşük kömür rezervlerinin çok miktarda inorganik madde barındırması ve içerisindeki azot ve kükürt maddelerinden dolayı doğrudan kullanılması durumunda fazlaca kirletici emisyonlar oluşturmaktadır [1]. Bu çalışmada elverişli olması açısından kömürün koklaştırma yan ürünü kok fırını gazı yakıt olarak kullanılmıştır. Yanma şartlarında özellikle reaksiyon basamak sayısının etkisi üzerinde durulmuştur. Açığa çıkan yanma ürünlerinden NO_x değerlerinin belirlenmesi ve bu kirletici emisyonun düşürülme yolları araştırılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir;

İlbaş ve Karyeyen (2016), hidrojen içeren yakıtlardan şehir gazı ve kok fırını gazının ön-karışımli bir yakıcıda deneysel olarak yanmasını incelemiştir. Yanma odasının aksel ve radyal ölçüm sonuçlarını belirlemiştir. Aksel ve radyal ölçümlerin (Sıcaklık, NO_x , CO_2 ve CO) yaklaşık çoğunluğunda kok fırını gazının değerlerinin yüksek olduğu, özellikle şehir gazında hacimce daha fazla N_2 gazı olmasına rağmen yanma sonucu daha az NO_x oluşmasının nedeni bu gazın kalori değerinin diğer gazdan daha az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [2].

Ortiz vd. (2021), metal yüzeyine çarptırılmış kısmi ön-karışımli bir metan alevinin deneysel ve sayısal analizini yapmış, farklı güçlerde yakılan metan alevinin sıcaklık ve CO emisyon değerlerini karşılaştırmıştır. Radyal olarak sıcaklık ölçümlerinin genelde deneysel verilere uygun olarak azaldığı, merkezdeki sıcaklığın 10 mm uzağındaki alev sıcaklığından düşük olması ön-karışımli alevde meydana gelen sürüklenme alanının oluşturduğu koniden oluştuğu [3], alev hızı yönünden sayısal çalışmada yapılan k-omega türbilans modeli ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu, yakıt gücünün artırılması giriş hızının artmasıyla koni kısmının genişlemesine yol açtığı bu nedenle radyal olarak merkez konumdaki sıcaklığın hızla ters orantılı olduğu belirtilmiştir. CO değerinin ise gücün artmasıyla arttığı ve merkezden uzaklaştıkça azaldığı vurgulanmış, yakıt hava giriş çapının değiştirilmesiyle farklı güçlerde CO ve sıcaklık değerleri de incelenmiş, bu duruma göre 350-400 W aralığında maksimum termal verimlilik sağlanmasına rağmen CO değerinin de fazla olduğu gösterilmiştir [4].

Zhen vd. (2016), giriş havasının sıcaklığı artırılarak oluşturulan Bunsen alevinin ısı transferine etkileri deneysel olarak araştırılmış, $\text{CH}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ ve $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ 'den oluşan farklı yakıtlar üzerinde yapılan deneysel ölçümlerde giriş sıcaklıklarının artırılmasıyla hepsinin adyabatik sıcaklıklarının ve laminar alev hızlarının arttığı belirtilmiş, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ ve $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ alevinde oluşan sürüklenme alanının oluşturduğu koni yüksekliğinin yakıt giriş sıcaklığının artırılmasıyla ters orantılı olarak azaldığı gösterilmiş, yine bu üç yakıtın giriş sıcaklığının artırılmasıyla yanma sonucu oluşan NO_x değerinin de arttığı, bu değerlerden en yüksek olan $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtında olduğu, orta seviyede $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ yakıtında olduğu, en azının ise diğeri olan $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ yakıtında meydana geldiği ölçülmüş, aynı deney CO için de yapılmış ve bu sefer en yüksek CO değerine sahip olan yakıtın $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ 'de meydana geldiği, orta seviyede $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ 'de meydana geldiği en azının ise $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtında olduğu gösterilmiştir. $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtı için nozuldan uzaklaştıkça ısı transfer oranının azaldığı, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ yakıt hava karışımının farklı giriş sıcaklık değerlerindeki ölçümlerde giriş hava sıcaklığının artırılmasıyla ısı transfer oranının da arttığı ölçüm sonuçlarıyla gösterilmiştir [5].

Salem (2018), CH_4 , H_2 ve CO yakıtlarının 2, 5 ve 10 basamaklı reaksiyonda ön-karışımli yanma şartları incelenmiş, reaksiyon basamak sayısı arttıkça maksimum sıcaklığın düştüğü gösterilmiştir. Ayrıca Chemkin kodu üzerinde de yanma ürün mol değişim sonuçları paylaşılmıştır. Farklı oranlarda karıştırılan $\text{CH}_4\text{-H}_2$ yakıtının yine farklı hava-yakıt oranlarında yanmasının alev hızı sonuçları irdelenmiş ve CH_4 içerisine eklenen H_2 oranı artırıldıkça alev hızının arttığı ve bu hızın stokiyometrik yanma şartlarında maksimum olduğu belirtilmiştir. Yine hava fazlalık katsayısının bir olduğu durumda maksimum sıcaklığın

en yüksek olduğu, eksenel uzaklık arttıkça ise yüksek sıcaklığın hava fazlalık katsayısının bir buçuk olduğu şartlara doğru kaydığı gösterilmiştir. Ayrıca 10 basamaklı reaksiyonda H₂-CO yakıtının farklı yakıt-hava yanma şartlarında deneysel ve sayısal olarak yanma sonuçlarının adyabatik sıcaklık kıyaslaması yapılmış ve en iyi uyumlu sonucun stokiyometrik yanma şartlarında olduğu gösterilmiştir [6].

Zhai vd. (2021), CH₄ ve H₂ karışımı yakıtın, kısmi ön-karışımı yakıcıda yakılması sonucu alev boyutu ve rengi üzerinde durulmuş, öncelikle hidrojen gazının yoğunluğuna bakılmaksızın giriş hava miktarı artırıldıkça sürüklenme alanının küçüldüğü yani koni yüksekliğinin azaldığı belirtilmiş, H₂ gazının artırılmasıyla özellikle fazla hava girişli yanmalarda daha belirgin olmak üzere alev boyunun küçüldüğü ve alev parlaklığının azaldığı gösterilmiştir [7].

Jiang vd. (2017), ön-karışımı bir yakıcıda biogazın yanması incelenmiş, biogazın içeriğinde bulunan CH₄, CO₂, H₂ ve N₂ gazları miktarı üzerinde değişiklik yapılarak 5 farklı yakıt oluşturulmuş ve bu yakıtların yanma sonuçları üzerinde kıyaslama yapılmıştır. Chemkin kodu üzerinde laminer biogaz alevi simülasyonu yapılmış, sıcaklık ve yakıt ile yanma ürünlerinin kütleli değişimleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre tamamen CH₄'ten oluşan biogaz sıcaklığının daha yüksek olduğu, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarı arttıkça sıcaklığın düştüğü, biogaz içeriğinde bulunan CO₂ miktarının bir kısmının N₂ ile değiştirilmesi durumunda sıcaklık boyutunda önemli değişikliğin olmadığı gösterilmiştir. Laminer alev hızı konusunda tamamen CH₄'ten oluşan biogaz yakıtında en yüksek olduğu, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarı arttıkça laminer alev hızının azaldığı, biogaz içeriğindeki CO₂ miktarının bir kısmının N₂ ile değiştirilmesi durumunda laminer alev hızının da arttığı gösterilmiştir. Tek boyutlu bir simülasyon çalışmasında biogaz laminer alev üzerinde metan konsantrasyonunun önemli bir etkisinin olduğu belirtilmiştir [8].

Józsa vd. (2022), bütanal karışımı dizel yakıtın sıcaklık kontrollü girdaplı yakıcıda yakılması incelenmiş, eşdeğerlik oranı 0,86 ile 0,76 arasında olacak şekilde PID kontrolüyle yakıcıya gelen havanın sıcaklığı değiştirilmiş, basınç kontrolüyle de yakıt ve hava miktarı kontrol edilmiş, hava debisini kontrol eden basınç değeri artırıldıkça alev renginin değiştiği ve renk kaybettiği, aynı zamanda kirlenici NO(ppm) ve CO(ppm) seviyelerinin azaldığı, yakıt içerisindeki bütanın artırılmasıyla alev kalınlığının azaldığı, görünümü itibari ile sadece dizel yakıtta OH reaksiyonlarının arttığı, fakat yakıt içerisine bütan ilave edildiğinde OH ara ürün yoğunluğunun azaldığı, gürültü seviyesinin de yaklaşık 10 dB civarında azaldığı gösterilmiştir [9].

Konvansiyonel veya çok bileşenli yakıtların yanma şartlarını araştıran çok sayıda literatür vardır, fakat ön-karışımı olarak tüketilme koşullarında alev ve reaksiyon basamak sayısı etkileşimi, basamak sayısının yanma sonu ürünlerine etkisi konularıyla ilgili kritik sorular hala devam etmektedir. Ayrıca ön-karışımı yakıcılarda, hava ile yakıt yanma bölgesine gelmeden önce karıştığı için ön-karışimsız yakıcılara göre daha homojen bir yakıt-hava karışımı sağlamaktadır. Bu nedenle ön-karışımı yakıcılarda oluşan NO emisyon seviyesi ön-karışimsız yakıcılara göre daha az olmaktadır [10]. Daha temiz enerji elde etmek temel motivasyon kaynağımız olduğu için bu çalışmada ön-karışımı yanma şartları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Yakıtlar, kimyasal reaksiyonla ısı üretiminde elverişli maddelerdir. Yakıtlarda C, H, S gibi yanıcı elementler ile beraber O ve N gibi diğer elementler de bulunur. Fiziksel özelliklerine göre yakıtları sınıflandırdığımızda taş kömürü, esmer kömür, turb, odun gibi doğal ve kok ve odun kömürü gibi yapay olan katı yakıtlar, taş ve esmer kömürün gazlaştırılmasından veya odunun karbonizasyonundan üretilen katran veya alkol gibi sıvı yakıtlar ile doğal olanı yer gazı yapay olanları ise hava gazı, su gazı, kuvvet gazı, kok gazları, metan, asetilen, bütan gibi gaz yakıtlar da vardır [11].

Katı yakıtlar kapalı ortamda ısı işleminden geçirilirse koklaştırılmış olurlar ve sıvı ile gaz yakıtlara dönüşürler, eğer 600 °C derecelere kadar ısı işlem yapılırsa katran elde edilir, eğer 1200 °C dereceye kadar ısı işleminden geçerlerse katrandan tamamen temizlenmiş fazla oranda karbon içeren kok elde edilir, bu ikinci aşamada gaz verimi daha fazladır. Yapılan ısı işlemde sıcaklığın artış hızı önemlidir. Eğer hızlı

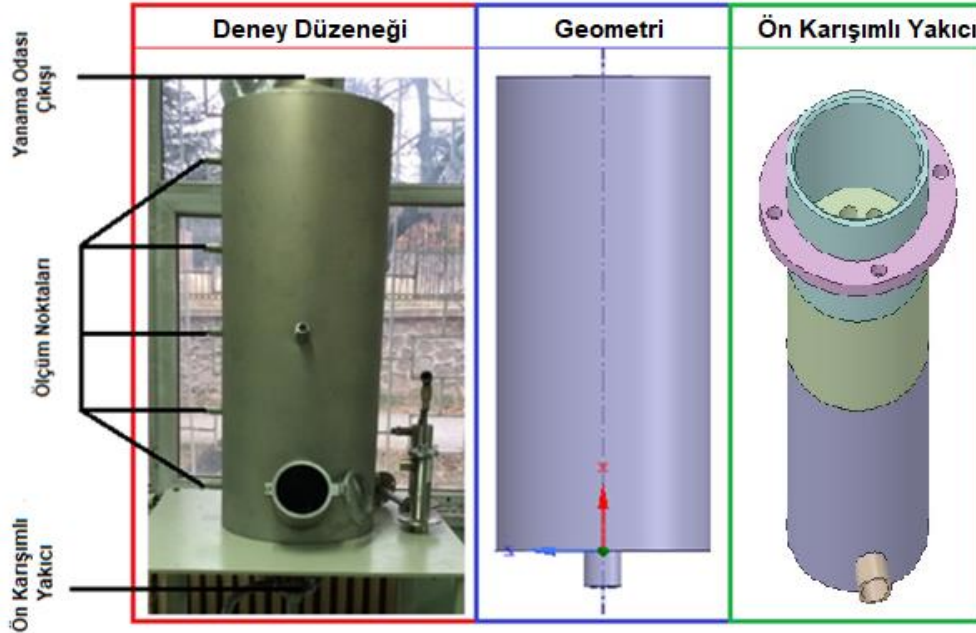
sıcaklık artışına maruz kalırsa gazlaşma aşaması sıcaklığın yüksek olduğu kesimlere kaymaktadır. Hidrokarbonca yüksek gaz elde etmek için alçak sıcaklık koklaştırması, hidrojenle yüksek gaz elde etmek için yüksek sıcaklık koklaştırması yapılır. Koklaştırmaya her kömür uygun değildir [11]. Örneğin alev kömürü, gaz kömürü ve yağsız kömürler elverişli olmayıp, yağlı kömür elverişlidir. Başlıca olarak yüzey ısıtmalı, yıkama gazlı, akışkanlaştırılmış yatak ve pnömatik koklaştırma yöntemleri ile kömürler gazlaştırılmaktadır. Kömürün gazlaştırılması sonucu elde edilen kok fırın gazının içerdiği bileşenler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. Kok Fırın Gazı İçeriğinin Hacimce Bileşenleri [1]

Kok Fırın Gazı Bileşenleri	Hacimce(%)
H ₂	55 – 60
CH ₄	23 – 27
CO	5 – 8
CO ₂	1 – 2
N ₂	3 – 6
C ₂ H ₄	1 – 1,5
C ₂ H ₆	0,5 – 0,8
C ₃ H ₈	≤ 0,07
H ₂ S	≤ 3,2E-5

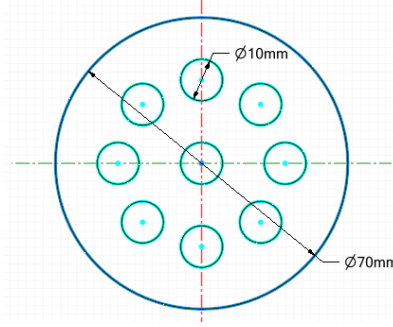
Bu çalışmada, %55H₂, %27CH₄, %6CO, %2CO₂ ve %10N₂ içeriğine sahip, 3678 kcal/m³ ısıl değer ve yaklaşık 0,45 kg/m³ yoğunluğundaki kok fırını gazı kullanılmıştır [2].

Yukarıda belirtilen gazı yakmak için deney düzeneğinde kullanılan yanma odası, paslanmaz çelikten üretilmiş 40 cm çapında ve 1 metre yüksekliğinde silindirik şekildedir. Yanma odasının yan tarafında, belli aralıklarla dizilmiş (10cm, 30cm, 50cm, 70cm ve 90cm) deneysel ölçümlerin yapılabildiği toplam 5 adet ölçüm noktaları bulunmaktadır. Ön tarafında da alevin görülebileceği gözlem penceresi bulunmaktadır.



Şekil 1. Yanma odası ve ön karışimli yakıcı [1-2]

Bu yanma odasının alt kısmında takılı olan ön-karışimli yakıcı, 70 mm çapındaki paslanmaz çelik üzerine belli aralıklarla açılmış 9 adet 10 mm çapındaki deliklerden oluşmaktadır. Ön-karışimli yakıcının kesit görünümü aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Şekil 2. Ön-karışimli yakıcının kesit görünümü [1-2]

3. SAYISAL MODELLEME (NUMERICAL MODELLING)

Yakıtlarda C, H, S, O ve N atomları bulunduğundan ve yanma için oksitleyici olarak hava (O_2 ve N_2) kullanıldığından yanma sonucu CO, NO_x gibi havayı kirletici gazlar oluşmaktadır. Bu çalışmada özellikle NO_x kirleticileri üzerinde durulmuştur. NO_x , NO, NO_2 , N_2O , N_2O_3 ve N_2O_5 olmak üzere 5 adet gaz bileşeninin genel ismidir. Bunlardan üçü olan NO, NO_2 ve N_2O asıl öneme sahip olup toplam NO_x oluşumunun da büyük çoğunluğunu NO oluşturmaktadır. NO_x 'in farklı mekanizmalarla oluştuğu kabul edilir. Bunlardan ısıl (Zeldovich) NO_x oluşum mekanizması; hava-yakıt oranı yüksek olan yanma şartlarındaki NO yanma ürünü oluşumunda önemli reaksiyonlardır [12]. Ani NO_x oluşum mekanizmasında ise NO oluşumunun yarıdan fazlası hava-yakıt oranı düşük olan yanma şartlarında meydana gelmektedir. Sonucu olan yakıt NO_x oluşumu da yakıt içerisinde bulunan bağıl azotun oksidasyonundan meydana gelir [13].

Yanma, zincirleme kimyasal reaksiyonlarda girenler ile ürünler arasındaki dönüşümde açığa çıkan enerjidir.

Bu kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi gösterilirse;



n_a, n_b, n_c, n_d : Reaksiyona giren elementi yada moleküllerin stokiyometrik katsayı değeri,
 A, B, C, D : Reaksiyona giren veya çıkan element yada moleküller,

Bu reaksiyondaki giren veya ürünlerin konsantrasyon değişimi ise aşağıdaki gibi gösterilirse;

$$-\frac{1}{n_a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{n_b} \frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{n_c} \frac{d[C]}{dt} = -\frac{1}{n_d} \frac{d[D]}{dt} = k[A]^x[B]^y \quad (2)$$

k : Hız sabiti, x ve y : reaksiyon derecesi,

Bu denklemi Arrhenius formatında aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

T : Sıcaklık(K), R : Universal gaz sabiti (cal/mol.K), E : Aktivasyon enerjisi (cal/mol), A : Arrhenius faktörü,

Buradaki A terimi yani Arrhenius faktörünü T^n sıcaklık üstel faktörü ile çarparsak;

$$k = A \cdot T^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

Denklem 4'deki gibi Ansys Chemkin kodu için kimyasal reaksiyon giriş parametleri elde edilmiş olmaktadır. Chemkin formatı için aşağıdaki tabloda bazı NO_x oluşum reaksiyonları gösterilmiştir.

Tablo 2. GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre bazı NO_x oluşum reaksiyonları

Reaksiyon Sayısı	Kimyasal Reaksiyon	Arrhenius Faktörü	Sıcaklık Üstel Değeri	Aktivasyon Enerjisi
1.	$N + NO \rightleftharpoons N_2 + O$	2.70E+13	0.0	355.0
2.	$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$	9.00E+09	1.0	6500.0
3.	$N + OH \rightleftharpoons NO + H$	3.36E+13	0.0	385.0
4.	$CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N$	3.12E+09	0.9	20130.0
5.	$CN + H_2O \rightleftharpoons HCN + OH$	8.00E+12	0.0	7460.0
6.	$C + NO \rightleftharpoons CN + O$	1.90E+13	0.0	0.0
7.	$N_2O(+M) \rightleftharpoons N_2 + O(+M)$	7.91E+10	0.0	56020.0
8.	$N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$	2.90E+13	0.0	23150.0
9.	$HO_2 + NO \rightleftharpoons NO_2 + OH$	2.11E+12	0.0	-480.0
10.	$NO_2 + H \rightleftharpoons NO + OH$	1.32E+14	0.0	360.0

Tablo 2'deki 1. ve 2. reaksiyonlar (Zeldovich) ile 3. Reaksiyon (Lavoie ve ark.) ısı NO_x oluşum reaksiyonlarıdır [14]. Bu oluşumlar genellikle yüksek alev sıcaklıklarında (1800 K'dan fazla) meydana gelmektedir. Diğer olan ani NO_x oluşum mekanizması için 4., 5. ve 6. reaksiyonlar gösterilebilir. Zengin yakıt-hava karışımlarında fazlaca meydana gelmekle birlikte diğer iki NO_x oluşum mekanizmasına göre daha azdır. Yakıt NO_x oluşumu, 5. ve 6. reaksiyonlarda meydana gelen CN ve HCN gibi moleküllerin oksijenle buluşmasıyla NO_x 'in oluşmasıdır [15-16]. Diğer reaksiyonlarda da gösterildiği gibi farklı NO_x türlerinin (N_2O , NO_2 gibi) oluşum mekanizmaları da vardır.

Daha ekonomik ve enerji tasarrufu açısından yanma simülasyonları kullanmak yeni bulgulara kılavuzluk sağlayabilir. Bu amaçla deney düzeneği ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu (Ansys Fluent) yardımıyla üç boyutlu olarak modellenmiştir (Yanma odasının ısı iletkenlik katsayısı $k=16,27$ W/mK). Kok fırını gazı için 3678 kcal/m³ ısı değer referans alınarak 10 kW ısı güce karşılık gelen yakıt debisi ile hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ yanma şartlarındaki hava debisi toplanarak giriş yakıt-hava debisi elde edilmiştir. Bu debi Şekil 2'de gösterilen ön-karışımli yakıcının akışkan kesit alanına oranlanarak sınır şartı olan giriş hızı elde edilmiştir. Deneyin yapıldığı şartlardaki gibi giriş yakıt-hava sıcaklığı 293 K'dır (Dinamik viskozite $\mu=1,72e-5$ kg/ms, ısı iletkenlik $k=0,0454$ W/mK). Isı taşınım katsayısı $h=20$ W/m²K ve ortam sıcaklığı 293 K sınır şartlarında sayısal çözümleme yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar bulgular bölümünde irdelenmiştir. Sayısal modellemenin matematiksel alt yapısı kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerine dayanmaktadır. Kütle korunumu denklemi (Denklem 5) [17];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

ρ : Akışkanın yoğunluğu, t : Zaman, u , v , w : Referans eksenine göre hızlar

Momentum korunumu denklemi (Denklem 6, 7, 8) [18-19];

$$\rho \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{xx}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + F_{mx} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{yy}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + F_{my} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{\partial(\tau_{zz}-p)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial z} + F_{mz} = 0 \quad (8)$$

p : Basınç, τ : Viskoz gerilim tensörü, F : Kuvvet,

Parçacık boyutunda enerji korunumu denklemi (Denklem 9) [6];

$$\rho \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -div(\rho V) + \frac{\partial(v\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \quad (9)$$

$$+ \frac{\partial(v\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(k\Delta T) + Q = 0$$

V : Hız, k : Isı iletim katsayısı, T : Sıcaklık,

Silindirik ve simetrik yanma odası geometrisi için transfer denklemi (Denklem 10) [1];

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \Phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + S_\Phi \quad (10)$$

S_Φ : Taşıma denklemi için kaynak terim, Φ : Bağımlı değişken, v_j : Bağımlı değişken Φ 'ye karşılık gelen hız, Γ : Değişken için difüzyon katsayısı,

Zincirleme kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği anda alevin yayılması aşağıdaki formüllerle tanımlanabilir ve türbülanslı alev hızı hesabı için formül aşağıda gösterilmiştir (Denklem 11, 12, 13) [3-15-20].

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \nabla(\rho v x) = \nabla \left(\frac{\mu}{S_{x_t}} \nabla x \right) + \rho S_x \quad (11)$$

$$\rho S_x = \rho_u S_v |\Delta x| \quad (12)$$

$$S_v = A(v')^{3/4} V_l^{0,5} \Gamma^{-0,25} X_t^{0,25} = A v' \left(\frac{\tau_t}{\tau_x} \right)^{0,25} \quad (13)$$

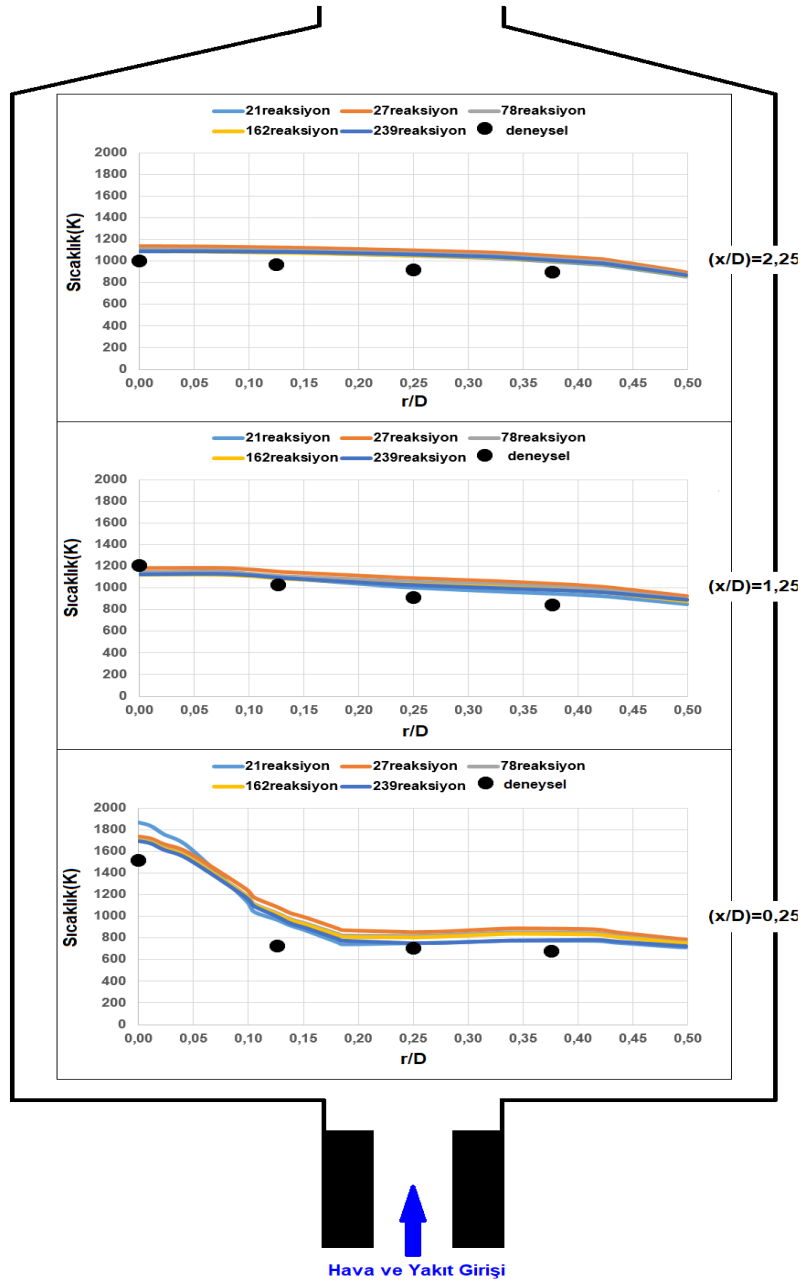
S_v : Türbülans alev hızı, V_l : Laminer alev hızı, v' : RMS hızı, A : Model sabiti, ρ_u : Yanmış karışımın yoğunluğu, Γ : Yanmamış karışımın difüzyon katsayısı, X_t : Türbülans uzunluk ölçeği, τ_t ve τ_x : Türbülans zaman ölçeğidir. Buradaki x terimi, CFD modelinde bir sınır şartıdır ve girişte $x=0$ (yanmamış), $x=1$ (yanmış) anlamındadır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Ön-karışımli alevler ön-karışimsız alevlerden farklıdır. Ön-karışimsız alevlerde yakıt ile hava birleşmesi esnasında yanma işlemi başlamasına rağmen ön-karışımli alevlerde, hava ve yakıt karıştıktan belli bir süre sonra yanma işlemi meydana gelmektedir. Hava ve yakıt önceden karışımli yakıcı ile yanma odasına gönderilmesi akabinde belirli bir süre sürüklenmeden sonra reaksiyonlar başlar, hava ve yakıtın önceden buluşması ve yanma alanına da sürüklenerek karışması kirletici emisyon oluşumunda azalma sağlayabilir [10]. Reaksiyonların başladığı bu alan genelde koni şeklini oluşturur, bu koninin yüksekliği ve genişliği yakıt ve havanın yanma odasına gönderilme hızına bağlıdır. Koni iç kısmında yanma (reaksiyonlar) olmadığından sıcaklık düşüktür. Yanma (reaksiyonlar) koninin dış kısmında meydana geldiğinden sıcaklık artışı bu kısımda meydana gelmektedir. Bu sayede yakıcı ekipmanın zarar görmesi de önlenir. Ön-karışımli alevlerin rengi diğerinden farklı olmaktadır. Alev rengi yakıt-hava karışımındaki hava miktarına ve yakıtın bileşenleri gibi birçok etkene bağlıdır. Ayrıca ön-karışımli yakıcılarda yanma sonucu yanma odasında oluşan dinamik basınç değişimleri ön-karışimsız yakıcıya göre daha azdır [21]. Bu nedenle deney düzeneğinde kullanılan ön-karışımli yakıcı ayrıca emisyon seviyesinde azaltma etkisi göstereceği düşünülmektedir.

Deneyin yapıldığı şartlar referans alınarak 10 kW güce karşılık gelen kok fırını gazı ve hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,2$ oranındaki hava miktarı yanma odasına gönderilmiştir. Bu sınır şartlarında, farklı reaksiyon basamak sayılarında, modellemenin yapıldığı ticari kod üzerinde çözdürülmüştür. Radyal sıcaklık ölçümleri yanma odasının 10 cm, 50 cm ve 90 cm'deki noktalarından ölçüldüğünden [2], bu noktalardaki radyal sıcaklık profilleri ve 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm ve 90 cm'deki eksenel sıcaklık ölçüm sonuçları farklı reaksiyon basamak sayılarındaki sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. NO emisyon eksenel ölçüm

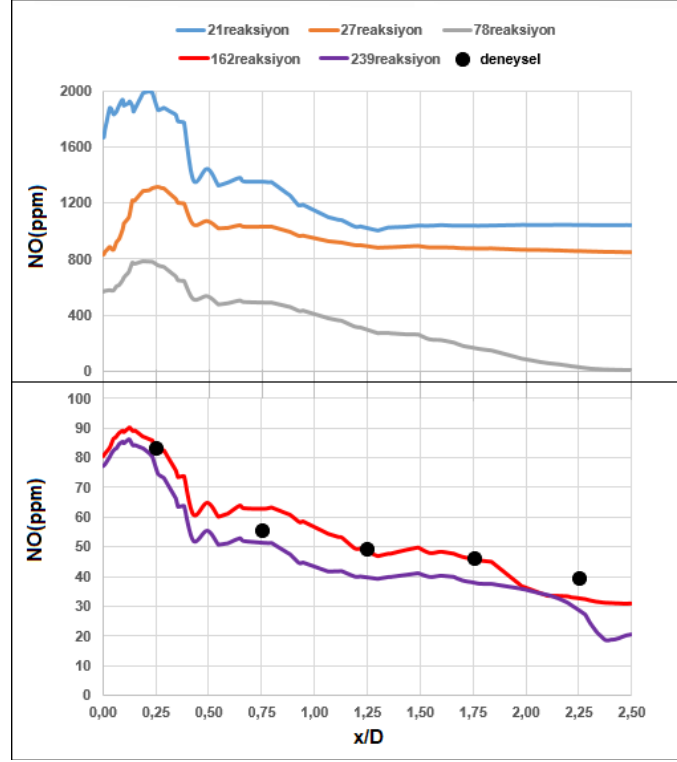
sonuçları [2] da yine farklı reaksiyon basamak sayılarındaki sayısal sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 3. Radyal sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması

Yanma sırasında en yüksek sıcaklık stokiyometrik yanma şartlarında meydana gelmektedir. Stokiyometrik yanma şartlarından uzaklaştıkça reaksiyona katılmayan fazla havanın yanma odasından ayrılırken sıcaklığı da beraberinde götürmesi sonucu sıcaklığın azaldığı bilinmektedir. Yanma sırasında yakıtın hepsi tamamen CO₂ veya H₂O dönüşmediğinden, yanma sırasında oluşan ara ürünler de sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır. Yani yanma bir basamaklı reaksiyondan oluşmayıp zincirleme birçok basamaklı reaksiyondan oluşmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi ölçülen deneysel sonuçların sayısal verilerle uyumunun sağlanabilmesi için sadece deneyin yapıldığı ortam ve yakıt hava giriş verilerini hesaplamalı akışkan dinamiği kodu üzerinde çalıştırmak yeterli değildir. Ara ürün sayısını yani reaksiyon basamak sayısını artırarak sayısal çözümleme yapmak da gerekmektedir.

Şekil 3'te yanma odasının eksenel olarak 10 cm, 50 cm ve 90 cm'deki ölçüm noktalarından ölçülen radyal sıcaklık sonuçları [2] ile sayısal modelleme sonuçları, GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve NO_x için oluşturulan 5 farklı reaksiyon basamak sayısında analiz edilmiştir. Basamak sayısının sonuçlara olan etkisinin daha belirgin olarak görmek için eksenel NO sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.

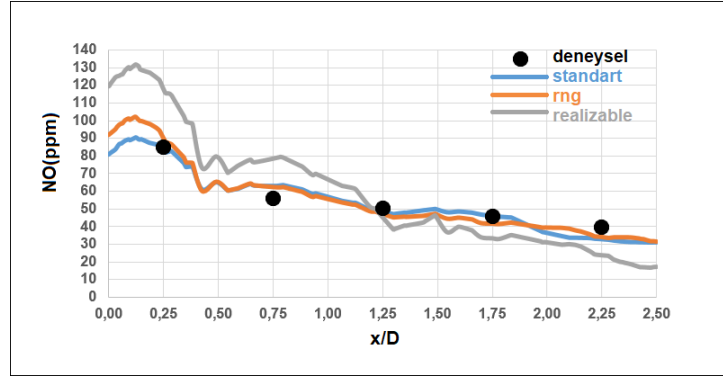


Şekil 4. Eksenel NO sonuçlarının karşılaştırılması

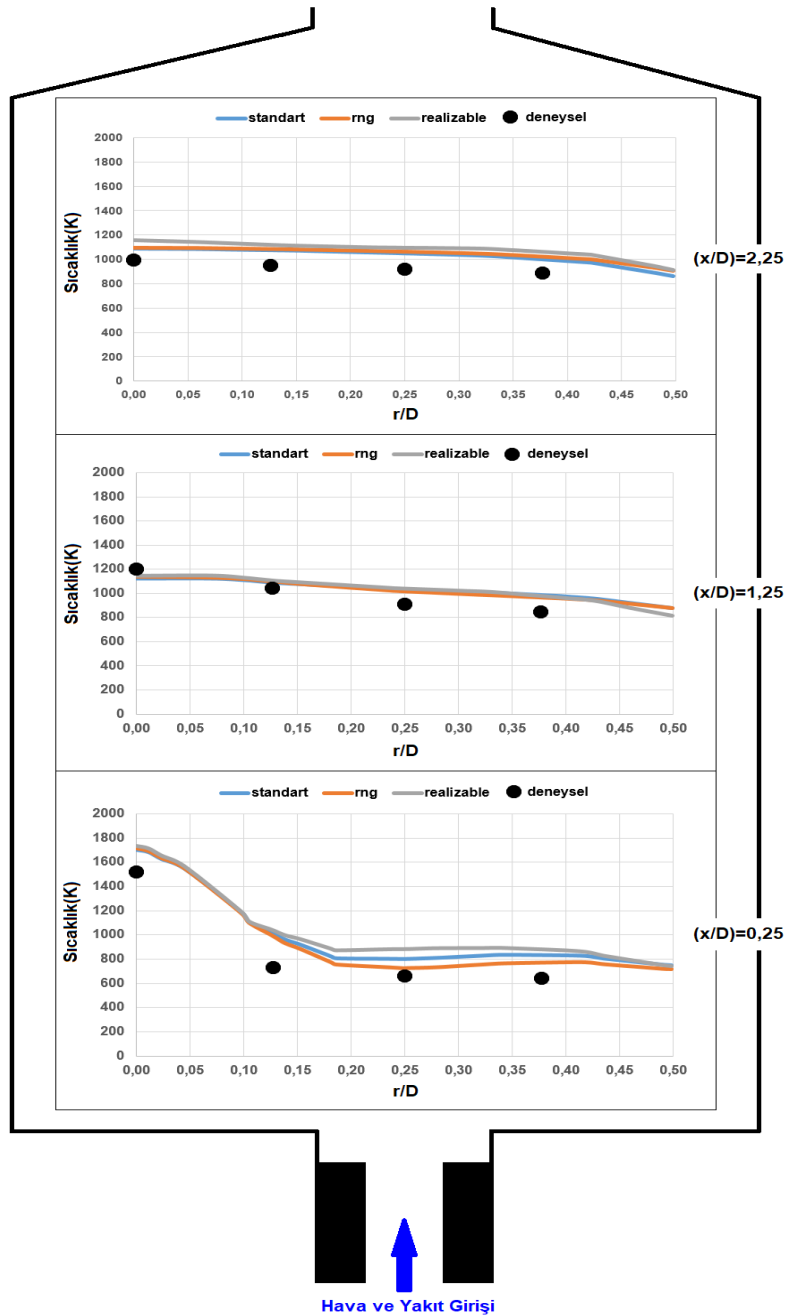
Şekil 4'te de görüldüğü gibi GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği yardımıyla kok fırını gazı ve NO_x için oluşturulan 5 farklı reaksiyon basamak sayısındaki eksenel NO (ppm) emisyon sayısal sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarının [2] karşılaştırılması yapıldığında, reaksiyon basamak sayısı artırıldıkça deneysel sonuçlarla daha iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Özellikle 162 basamaklı ve daha fazla reaksiyon kinetiğinin kullanıldığı kimyasal kinetikler ile elde edilen sonuçların, daha düşük reaksiyonlar ile yapılan modellemelere göre iyi sonuçlar verdiği ve deneysel verilerle büyük ölçüde hem değer hemde eğilim bakımından uyumlu olduğu söylenebilir. Alev bölgesinden ($x/D=0,25$) elde edilen NO verilerinin de büyük ölçüde tutarlı olması oldukça önemli bir kazanımdır. Bu sonuçların temel nedeninin, daha fazla ara reaksiyonun dikkate alınmasının daha gerçekçi olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3'e göre reaksiyon basamak sayısının artması sıcaklık verilerinde fazla bir değişikliğe neden olmasa da NO (ppm) emisyon verilerinde oldukça farklılık göstermesi nedeni ile, yani Şekil 3 ve Şekil 4 birlikte değerlendirildiğinde, 162 reaksiyon basamak sayısının kok fırını gazının gerçekçi modellenmesi için yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde gerçekleştirilecek modellemelerde de 162 basamaklı reaksiyon kinetiği kullanılmıştır.

Sayısal sonuçların doğruluğunu etkileyen diğer önemli bir faktör de türbülans modeli olup 3 farklı k-ε türbülans modelinin (Standard, RNG ve Realizable) eksenel NO ve radyal sıcaklık dağılımlarına olan etkileri Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

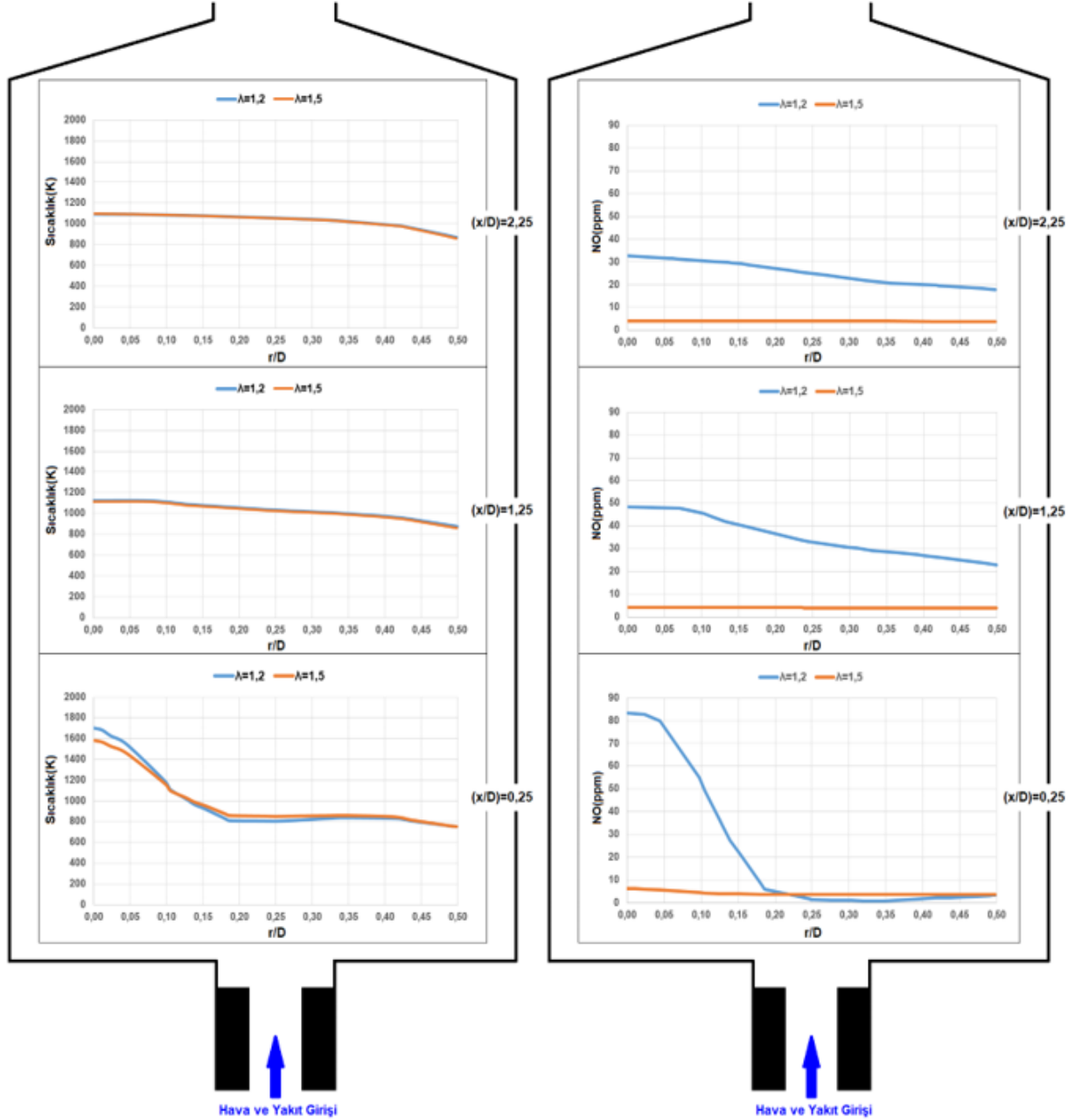


Şekil 5. Türbülans modelinin aksel NO profiline etkisi



Şekil 6. Türbülans modelinin radyal sıcaklık profiline etkisi

Şekil 5 ve Şekil 6’da 3 farklı türbülans modeli için deneysel [2] ve sayısal aksenal NO (ppm) emisyon ve radyal sıcaklık profilleri karşılaştırılmış olup, yine sıcaklık değerlerinde önemli derecede farklılığın olmamasına karşı NO (ppm) emisyon değerlerinde, türbülans model etkisinin önemli derecede farklılık oluşturduğu görülmüştür. Ancak yine de, özellikle standard k- ϵ ve RNG k- ϵ türbülans modelleri kullanılarak elde edilen NO (ppm) dağılımlarının deneysel ölçüm sonuçları ile daha iyi bir uyum içinde olduğu saptanmış olup, genel olarak, daha fazla noktadaki NO değerlerini yakalayabildiği için standard k- ϵ türbülans modeli, ön-karışımli bir yakıcıda, toplam 162 basamaklı reaksiyon ile yapılan kok fırını gazı modellemesi için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Hava fazlalık katsayısının radyal sıcaklık ve NO dağılımlarına olan etkisi

Çalışmanın bu bölümüne kadar yapılan modellemelerde, öncelikle farklı basamak sayılı reaksiyon kinetiklerinin ve türbülans modellerinin ön-karışımli bir yakıcıdaki kok fırını gazı modellemelerine olan etkileri araştırılmış olup, çalışmanın devamında ise, hava fazlalık katsayısının yanma sonu sıcaklık ve NO

emisyon dağılımlarına olan etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Şekil 7’de, 1,2 ve 1,5 hava fazlalık katsayıları için yanma sonu sıcaklık ve NO dağılımları gösterilmiştir. Yanma odası giriş kısmından yanma odası çıkışına doğru gidildikçe sıcaklık değerleri azalmış, buna bağlı olarak da NO oluşumları (ısılı NO_x) azalma göstermiştir. Ayrıca, hava fazlalık katsayısı 1,2’den 1,5’e çıkarıldığında, özellikle alev bölgesindeki sıcaklık değerlerinin bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Hem sıcaklık düşüşüne hem de reaksiyon hızının yavaşlamasına bağlı olarak NO değerlerinde kayda değer bir düşüş gözlemlenmiştir. 1,2 hava fazlalık katsayısı için yanma odası çıkışının merkezinde yaklaşık 30 ppm dolaylarında olan NO sayısal tahmin değeri, 1,5 hava fazlalık katsayısı için 10 ppm’in altına kadar düşürülmüştür.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Ön-karışimli bir yakıcı ve bağlı olduğu yanma odasını içeren bir yanma sistemi için, öncelikle yanma sırasında oluşan ara ürünlerin sayısı artırılarak yani reaksiyon basamak sayısı artırılarak sayısal yanma sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. 21 basamaklı reaksiyon yanma sonuçlarında maksimum sıcaklık 2115 K seviyesinde iken 239 basamaklı reaksiyon yanma sonuçlarında 2048 K seviyesine kadar gerilemesine rağmen maksimum NO emisyon seviyesi 1995 ppm seviyesinden 87 ppm seviyesine kadar düşmüştür. Reaksiyon basamak sayısının sıcaklığı önemli ölçüde etkilememesine karşın NO emisyon tahmin değerlerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Kok fırını gazı için 5 farklı basamak sayılı reaksiyon kinetiği ile gerçekleştirilen yanma modellemeleri neticesinde elde edilen sıcaklık ve NO profillerine göre, 162 basamaklı reaksiyon kinetiğinin modelleme sonuçları için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın diğer bölümünde ise, ön-karışimli kok fırını gazı yanma modellemeleri için türbülans modelinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda modellerinden standard, RNG ve realizable türbülans modelleri kullanılarak sıcaklık ve NO dağılımları değerlendirilmiş ve deneysel ölçümlerle en iyi uyumun standard k-ε türbülans modelinin kullanıldığı modelleme ile ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında son olarak hava fazlalık katsayısının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,5$ hava fazlalık katsayıları için yanma modellemeleri gerçekleştirilmiş ve yanma odası boyunca sıcaklık ve NO dağılımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre (83 ppm olan NO emisyon seviyesinin 6 ppm’e kadar düşmesi), hava fazlalık katsayısının, özellikle NO dağılımlarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Fakir yanma şartları için, hava fazlalığı nedeniyle, özellikle fazla oksijen ve azotun yanma reaksiyonlarına katılmadan yanma odasını terk ederken de ortam ısısını beraberinde götürdüğü, bu nedenle bir miktar sıcaklık düşüşüne sebep olduğu, düşük sıcaklık neticesinde de NO oluşumunu azalttığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karyeyen S. (2016). Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] İlbas M., Karyeyen S., Premixed Turbulent Combustion of Hydrogen Containing Fuels - An Experimental Study, 24th « Journées d’Etude » of the Belgian Section of the Combustion Institute. Louvain-la-Neuve, Belgium, May, 19-20, 2016.
- [3] Wang L., Jiang Y., Qiu R., Experimental Study Of Combustion Inhibition By Trimethyl Phosphate In Turbulent Premixed Methane/Air Flames Using OH-PLIF, Journal Of Fuel 294(2021) 120324.

- [4] Laguillo S., Ochoa J.S., Tizné E., Pina A., Ballester J., Ortiz A., CO Emissions And Temperature Analysis From An Experimental And Numerical Study Of Partially Premixed Methane Flames Impinging Onto A Cooking Pot, *Journal Of Natural Gas Science And Engineering* 88(2021) 103771.
- [5] Zhen H.S., Miao J., Leung C.W., Cheung C.S., Huang Z.H., A Study On The Effects Of Air Preheat On The Combustion And Heat Transfer Characteristics Of Bunsen Flames, *Journal Of Fuel* 184(2016) 50-58.
- [6] Salem E. (2018). Numerical Simulations Of Premixed Flames Of Multi Component Fuels/Air Mixtures And Their Applications, *Theses And Dissertations Mechanical Engineering*.132, Lexington.
- [7] Guo L., Zhai M., Shen Q., Guo H., Dong P., Effect Of Hydrogen Addition On The Ionization Of Partially Premixed Methane Flame, *Journal Of Fuel*, 285(2021) 119141.
- [8] Jiang X., Greco A., Mira D., Effects Of Fuel Composition On Biogas Combustion In Premixed Laminar Flames, *Energy Procedia* 105(2017) 1058-1062.
- [9] Józsa V., Csemány D., Hidegh G., Darwish M., Distributed Combustion Of Diesel-Butanol Fuel Blends In A Mixture Temperature-Controlled Burner, *Fuel* 307(2022) 121840.
- [10] Gupta A. K., Khalil A. E. E., Towards Colorless Distributed Combustion Regime, *Fuel* 195(2017) 113-122.
- [11] Telli Z. (1984). *Yakıtlar ve Yanma*, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları, Isparta.
- [12] Nguyen T.H., Kim S., Park J., Jung S., Kim S., CFD-CRN Validation Study For NO_x Emission Prediction In Lean Premixed Gas Turbine Combustor, *Journal Of Mechanical Science And Technology* 31 (10) (2017) 4933-4942.
- [13] Ilbas M. (1997). *Studies Of Ultra Low NO_x Burners*, PhD Thesis, School Of Engineering, University Of Wales, Cardiff, UK, 10-28.
- [14] Tunçer O., Hidrojenle Zenginleştirilmiş Metan Yakıtının Alev Hızları ve Emisyon Değerlerinin Kimyasal Kinetik Analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi* 29,2.29-42, 2009.
- [15] Yılmaz B. (2010). *Computational Analysis And Experimental Verification Of Premixed Combustion Of Hydrogen Methane/Air Mixtures*, Thesis For The Degree Of Doctor Of Philosophy, Marmara University, Institute For Graduate Studies In Pure And Applied Sciences, İstanbul.
- [16] Sepman A.V., Mokhov A.V., Levinsky H.B., The Effect Of Hydrogen Addition On NO Formation In Atmospheric-Pressure, Fuel-Rich-Premixed, Burner-Stabilized Methane, Ethane And Propane Flames, *International Journal Of Hydrogen Energy* 36 (2011) 4474-4481.
- [17] Feng R., Gruber A., Chen J.H., Valiev D.M., Influence Of Gas Expansion On The Propagation Of A Premixed Flame In A Spatially Periodic Shear Flow, *Journal Of Combustion And Flame* 227(2021) 421-427.
- [18] Pashchenko D., Numerical Investigation Of High Temperature Synthesis Gas Premixed Combustion Via ANSYS Fluent, *MATEC Web Of Conferences* 145, 03012 (2018).
- [19] Yılmaz İ., Yılmaz H., Cam O., Ilbas M., Combustion Characteristics Of Premixed Hydrogen/Air Flames In A Geometrically Modified Micro Combustor, *Journal Of Fuel* 217 (2018) 536-543.
- [20] Karyeyen S., Ilbas M., Experimental And Numerical Analysis Of Turbulent Premixed Combustion Of Low Calorific Value Coal Gases In A Generated Premixed Burner, *Journal Of Fuel* 220(2018) 586-598.
- [21] Gupta A.K., Arghode V.K., Bryden K.M., High Intensity Colorless Distributed Combustion For Ultra Low Emissions And Enhanced Performance, *Applied Energy* 92 (2012) 822-830.

Ek:

Reaksiyon Sayısı	Kimyasal Reaksiyon	Arrhenius Faktörü [mol-cm-sn-K]	Sıcaklık Üstel Değeri	Aktivasyon Enerjisi [kal/mol]
1.	$2O+M \rightleftharpoons O_2+M$	1.20E+17	-1.0	0.0
2.	$O+H+M \rightleftharpoons OH+M$	5.00E+17	-1.0	0.0
3.	$O+H_2 \rightleftharpoons H+OH$	3.87E+04	2.7	6260.0
4.	$O+HO_2 \rightleftharpoons OH+O_2$	2.00E+13	0.0	0.0
5.	$O + H_2O_2 \rightleftharpoons OH + HO_2$	9.63E+06	2.0	4000.0
6.	$O + CH \rightleftharpoons H + CO$	5.70E+13	0.0	0.0
7.	$O + CH_2 \rightleftharpoons H + HCO$	8.00E+13	0.0	0.0
8.	$O + CH_2(S) \rightleftharpoons H_2 + CO$	1.50E+13	0.0	0.0
9.	$O + CH_2(S) \rightleftharpoons H + HCO$	1.50E+13	0.0	0.0
10.	$O + CH_3 \rightleftharpoons H + CH_2O$	5.06E+13	0.0	0.0
11.	$O+CH_4 \rightleftharpoons OH+CH_3$	1.02E+09	1.5	8600.0
12.	$O+CO(+M) \rightleftharpoons CO_2(+M)$	1.80E+10	0.0	2385.0
13.	$O+HCO \rightleftharpoons OH+CO$	3.00E+13	0.0	0.0
14.	$O+HCO \rightleftharpoons H+CO_2$	3.00E+13	0.0	0.0
15.	$O+CH_2O \rightleftharpoons OH+HCO$	3.90E+13	0.0	3540.0
16.	$O_2+CO \rightleftharpoons O+CO_2$	2.50E+12	0.0	47800.0
17.	$O_2+CH_2O \rightleftharpoons HO_2+HCO$	1.00E+14	0.0	40000.0
18.	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$	2.80E+18	-0.9	0.0
19.	$H+2O_2 \rightleftharpoons HO_2+O_2$	2.08E+19	-1.2	0.0
20.	$H+O_2+H_2O \rightleftharpoons HO_2+H_2O$	1.13E+19	-0.8	0.0
21.	$H+O_2+N_2 \rightleftharpoons HO_2+N_2$	2.60E+19	-1.2	0.0
22.	$H+O_2+AR \rightleftharpoons HO_2+AR$	7.00E+17	-0.8	0.0
23.	$H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$	2.65E+16	-0.7	17041.0
24.	$2H+M \rightleftharpoons H_2+M$	1.00E+18	-1.0	0.0
25.	$2H+H_2 \rightleftharpoons 2H_2$	9.00E+16	-0.6	0.0
26.	$2H+H_2O \rightleftharpoons H_2+H_2O$	6.00E+19	-1.2	0.0
27.	$2H+CO_2 \rightleftharpoons H_2+CO_2$	5.50E+20	-2.0	0.0
28.	$H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$	2.20E+22	-2.0	0.0
29.	$H+HO_2 \rightleftharpoons O+H_2O$	3.97E+12	0.0	671.0
30.	$H+HO_2 \rightleftharpoons O_2+H_2$	4.48E+13	0.0	1068.0
31.	$H+HO_2 \rightleftharpoons 2OH$	8.40E+13	0.0	635.0
32.	$H+H_2O_2 \rightleftharpoons HO_2+H_2$	1.21E+07	2.0	5200.0
33.	$H+H_2O_2 \rightleftharpoons OH+H_2O$	1.00E+13	0.0	3600.0
34.	$H+CH \rightleftharpoons C+H_2$	1.65E+14	0.0	0.0
35.	$H+CH_2(+M) \rightleftharpoons CH_3(+M)$	6.00E+14	0.0	0.0
36.	$H+CH_2(S) \rightleftharpoons CH+H_2$	3.00E+13	0.0	0.0
37.	$H+CH_3(+M) \rightleftharpoons CH_4(+M)$	1.39E+16	-0.5	536.0
38.	$H+CH_4 \rightleftharpoons CH_3+H_2$	6.60E+08	1.6	10840.0
39.	$H+HCO(+M) \rightleftharpoons CH_2O(+M)$	1.09E+12	0.5	-260.0
40.	$H+HCO \rightleftharpoons H_2+CO$	7.34E+13	0.0	0.0
41.	$H+CH_2O \rightleftharpoons HCO+H_2$	5.74E+07	1.9	2742.0
42.	$H_2+CO(+M) \rightleftharpoons CH_2O(+M)$	4.30E+07	1.5	79600.0
43.	$OH+H_2 \rightleftharpoons H+H_2O$	2.16E+08	1.5	3430.0
44.	$2OH(+M) \rightleftharpoons H_2O_2(+M)$	7.40E+13	-0.4	0.0

45.	$2\text{OH} \rightleftharpoons \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	3.57E+04	2.4	-2110.0
46.	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction	1.45E+13	0.0	-500.0
47.	$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction	2.00E+12	0.0	427.0
48.	$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction	1.70E+18	0.0	29410.0
49.	$\text{OH} + \text{C} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO}$	5.00E+13	0.0	0.0
50.	$\text{OH} + \text{CH} \rightleftharpoons \text{H} + \text{HCO}$	3.00E+13	0.0	0.0
51.	$\text{OH} + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	2.00E+13	0.0	0.0
52.	$\text{OH} + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{CH} + \text{H}_2\text{O}$	1.13E+07	2.0	3000.0
53.	$\text{OH} + \text{CH}_2(\text{S}) \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	3.00E+13	0.0	0.0
54.	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	5.60E+07	1.6	5420.0
55.	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O}$	6.44E+17	-1.3	1417.0
56.	$\text{OH} + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	1.00E+08	1.6	3120.0
57.	$\text{OH} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO}_2$	4.76E+07	1.2	70.0
58.	$\text{OH} + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$	5.00E+13	0.0	0.0
59.	$\text{OH} + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$	3.43E+09	1.2	-447.0
60.	$2\text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ Declared duplicate reaction	1.30E+11	0.0	-1630.0
61.	$2\text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ Declared duplicate reaction	4.20E+14	0.0	12000.0
62.	$\text{HO}_2 + \text{CH}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	2.00E+13	0.0	0.0
63.	$\text{HO}_2 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{CH}_4$	1.00E+12	0.0	0.0
64.	$\text{HO}_2 + \text{CO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CO}_2$	1.50E+14	0.0	23600.0
65.	$\text{HO}_2 + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}_2$	5.60E+06	2.0	12000.0
66.	$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CO}$	5.80E+13	0.0	576.0
67.	$\text{CH} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{HCO}$	6.71E+13	0.0	0.0
68.	$\text{CH} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2$	1.08E+14	0.0	3110.0
69.	$\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_2\text{O}$	5.71E+12	0.0	-755.0
70.	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{H} + \text{CO}$	5.00E+12	0.0	1500.0
71.	$\text{CH}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{CH}_3$	5.00E+05	2.0	7230.0
72.	$\text{CH}_2 + \text{CH}_4 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$	2.46E+06	2.0	8270.0
73.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{N}_2$	1.50E+13	0.0	600.0
74.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{AR} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{AR}$	9.00E+12	0.0	600.0
75.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH} + \text{CO}$	2.80E+13	0.0	0.0
76.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	1.20E+13	0.0	0.0
77.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}$	7.00E+13	0.0	0.0
78.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	3.00E+13	0.0	0.0
79.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CH}_4 \rightleftharpoons 2\text{CH}_3$	1.60E+13	0.0	-570.0
80.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO} \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{CO}$	9.00E+12	0.0	0.0
81.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_2 + \text{CO}_2$	7.00E+12	0.0	0.0
82.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$	1.40E+13	0.0	0.0
83.	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_2\text{O}$	2.31E+12	0.0	20315.0
84.	$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HO}_2 + \text{CH}_4$	2.45E+04	2.5	5180.0
85.	$\text{CH}_3 + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{CO}$	2.65E+13	0.0	0.0
86.	$\text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO} + \text{CH}_4$	3.32E+03	2.8	5860.0
87.	$\text{HCO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	1.50E+18	-1.0	17000.0
88.	$\text{HCO} + \text{M} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{M}$	1.87E+17	-1.0	17000.0

89.	$\text{HCO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HO}_2+\text{CO}$	1.34E+13	0.0	400.0
90.	$\text{N}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}$	2.70E+13	0.0	355.0
91.	$\text{N}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{O}$	9.00E+09	1.0	6500.0
92.	$\text{N}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}$	3.36E+13	0.0	385.0
93.	$\text{N}_2\text{O}+\text{O}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}_2$	1.40E+12	0.0	10810.0
94.	$\text{N}_2\text{O}+\text{O}\rightleftharpoons 2\text{NO}$	2.90E+13	0.0	23150.0
95.	$\text{N}_2\text{O}+\text{H}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{OH}$	3.87E+14	0.0	18880.0
96.	$\text{N}_2\text{O}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{HO}_2$	2.00E+12	0.0	21060.0
97.	$\text{N}_2\text{O}(\text{+M})\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{O}(\text{+M})$	7.91E+10	0.0	56020.0
98.	$\text{HO}_2+\text{NO}\rightleftharpoons\text{NO}_2+\text{OH}$	2.11E+12	0.0	-480.0
99.	$\text{NO}+\text{O}+\text{M}\rightleftharpoons\text{NO}_2+\text{M}$	1.06E+20	-1.4	0.0
100.	$\text{NO}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{O}_2$	3.90E+12	0.0	-240.0
101.	$\text{NO}_2+\text{H}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$	1.32E+14	0.0	360.0
102.	$\text{NH}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}$	4.00E+13	0.0	0.0
103.	$\text{NH}+\text{H}\rightleftharpoons\text{N}+\text{H}_2$	3.20E+13	0.0	330.0
104.	$\text{NH}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{H}$	2.00E+13	0.0	0.0
105.	$\text{NH}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{N}+\text{H}_2\text{O}$	2.00E+09	1.2	0.0
106.	$\text{NH}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{O}$	4.61E+05	2.0	6500.0
107.	$\text{NH}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$	1.28E+06	1.5	100.0
108.	$\text{NH}+\text{N}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{H}$	1.50E+13	0.0	0.0
109.	$\text{NH}+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{H}_2$	2.00E+13	0.0	13850.0
110.	$\text{NH}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{OH}$	2.16E+13	-0.2	0.0
111.	$\text{NH}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2\text{O}+\text{H}$	3.65E+14	-0.5	0.0
112.	$\text{NH}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{OH}+\text{NH}$	3.00E+12	0.0	0.0
113.	$\text{NH}_2+\text{O}\rightleftharpoons\text{H}+\text{HNO}$	3.90E+13	0.0	0.0
114.	$\text{NH}_2+\text{H}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{H}_2$	4.00E+13	0.0	3650.0
115.	$\text{NH}_2+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{H}_2\text{O}$	9.00E+07	1.5	-460.0
116.	$\text{H}+\text{NO}+\text{M}\rightleftharpoons\text{HNO}+\text{M}$	4.48E+19	-1.3	740.0
117.	$\text{HNO}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{OH}$	2.50E+13	0.0	0.0
118.	$\text{HNO}+\text{H}\rightleftharpoons\text{H}_2+\text{NO}$	9.00E+11	0.7	660.0
119.	$\text{HNO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}_2\text{O}$	1.30E+07	1.9	-950.0
120.	$\text{HNO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{HO}_2+\text{NO}$	1.00E+13	0.0	13000.0
121.	$\text{CN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{CO}+\text{N}$	7.70E+13	0.0	0.0
122.	$\text{CN}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{H}$	4.00E+13	0.0	0.0
123.	$\text{CN}+\text{H}_2\text{O}\rightleftharpoons\text{HCN}+\text{OH}$	8.00E+12	0.0	7460.0
124.	$\text{CN}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{O}$	6.14E+12	0.0	-440.0
125.	$\text{CN}+\text{H}_2\rightleftharpoons\text{HCN}+\text{H}$	2.95E+05	2.5	2240.0
126.	$\text{NCO}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{CO}$	2.35E+13	0.0	0.0
127.	$\text{NCO}+\text{H}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{CO}$	5.40E+13	0.0	0.0
128.	$\text{NCO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{NO}+\text{H}+\text{CO}$	2.50E+12	0.0	0.0
129.	$\text{NCO}+\text{N}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{CO}$	2.00E+13	0.0	0.0
130.	$\text{NCO}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{NO}+\text{CO}_2$	2.00E+12	0.0	20000.0
131.	$\text{NCO}+\text{M}\rightleftharpoons\text{N}+\text{CO}+\text{M}$	3.10E+14	0.0	54050.0
132.	$\text{NCO}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2\text{O}+\text{CO}$	1.90E+17	-1.5	740.0
133.	$\text{NCO}+\text{NO}\rightleftharpoons\text{N}_2+\text{CO}_2$	3.80E+18	-2.0	800.0
134.	$\text{HCN}+\text{M}\rightleftharpoons\text{H}+\text{CN}+\text{M}$	1.04E+29	-3.3	126600.0
135.	$\text{HCN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NCO}+\text{H}$	2.03E+04	2.6	4980.0
136.	$\text{HCN}+\text{O}\rightleftharpoons\text{NH}+\text{CO}$	5.07E+03	2.6	4980.0

137.	$\text{HCN} + \text{O} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{OH}$	3.91E+09	1.6	26600.0
138.	$\text{HCN} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{NH}_2 + \text{CO}$	1.60E+02	2.6	9000.0
139.	$\text{C} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{CN} + \text{N}$	6.30E+13	0.0	46020.0
140.	$\text{CH} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{N}$	3.12E+09	0.9	20130.0
141.	$\text{CH}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{NH}$	1.00E+13	0.0	74000.0
142.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NH} + \text{HCN}$	1.00E+11	0.0	65000.0
143.	$\text{C} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{CN} + \text{O}$	1.90E+13	0.0	0.0
144.	$\text{C} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{N}$	2.90E+13	0.0	0.0
145.	$\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{O}$	4.10E+13	0.0	0.0
146.	$\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{H} + \text{NCO}$	1.62E+13	0.0	0.0
147.	$\text{CH} + \text{NO} \rightleftharpoons \text{N} + \text{HCO}$	2.46E+13	0.0	0.0
148.	$\text{CH}_2 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{HCN}$	2.90E+14	-0.7	760.0
149.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{NO} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{HCN}$	2.90E+14	-0.7	760.0
150.	$\text{CH}_3 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$	9.60E+13	0.0	28800.0
151.	$\text{CH}_3 + \text{N} \rightleftharpoons \text{HCN} + \text{H}_2$	3.70E+12	0.1	-90.0
152.	$\text{NH} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HNO} + \text{CO}$	1.00E+13	0.0	14350.0
153.	$\text{CN} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{NCO} + \text{NO}$	6.16E+15	-0.8	345.0
154.	$\text{NCO} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O} + \text{CO}_2$	3.25E+12	0.0	-705.0
155.	$\text{N} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{CO}$	3.00E+12	0.0	11300.0
156.	$\text{O} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{H} + \text{H}_2 + \text{CO}$	3.37E+13	0.0	0.0
157.	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightleftharpoons \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ Declared duplicate reaction	5.00E+15	0.0	17330.0
158.	$\text{OH} + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	8.00E+09	0.5	-1755.0
159.	$\text{CH} + \text{H}_2(+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CH}_3(+\text{M})$	1.97E+12	0.4	-370.0
160.	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H} + \text{CO}_2$	5.80E+12	0.0	1500.0
161.	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{CH}_2\text{O}$	2.40E+12	0.0	1500.0
162.	$\text{CH}_2(\text{S}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CH}_2\text{O}$	6.82E+10	0.2	-935.0