

OCAK SICAKLIĞININ NO_x EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa İLBAŞ *

İlker YILMAZ **

Atilla YILDIRIM ***

* Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

** Makina Yük. Müh., Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu

*** Makina Yük. Müh., Makina Mühendisleri Odası

Bu makalede; sıvı yakıt yakan bir kazanda yanma odasının farklı işletme şartları altında modellenmesi yapılmıştır. Yanma odasının modellenmesinde, sonlu hacimler metoduna göre çalışan ticari bir hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) programı kullanılmıştır. Modelleme ile yanma odasının akış alanı, sıcaklık dağılımı ve gaz konsantrasyonları iki boyutlu elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, yanma odası içerisine yerleştirilen levhanın sıcaklık ve NO_x emisyonu üzerindeki etkisini belirlemektir. Yanma odasına yerleştirilen levhanın, yanma odası sıcaklığını azalttığı, sıcaklığın azaldığı bölgelerde NO_x emisyonunun da azaldığı görülmüştür. Diğer gaz konsantrasyon değerlerinin levhali durumda daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Levhali durumda, yanma odasındaki hız dağılımının levhanın etkisi ile giriş kısmında bir miktar değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler : Yanma, sıcaklık dağılımı, hesaplamalı akışkan dinamiği, NO_x emisyonu

In this paper, modelling of combustion chamber of liquid fuel fired furnace is performed under different operating conditions. A commercial computational fluid dynamics code which being work the finite volume method is used for modelling of combustion chamber. The flow field, temperature and, gas concentrations are acquired. The aim of this study is to determine the effect of located plate in combustion chamber on temperature and NO_x emission. The plate located in combustion chamber decreases temperature of combustion chamber and decreasing temperature regions are shown that NO_x emission reduces. Other gas concentration values are higher in plate case. In the plate case, it was obtained that velocity distribution is varied with effect of plate.

Keywords : Combustion, temperature distribution, computational fluid dynamics, NO_x emission.

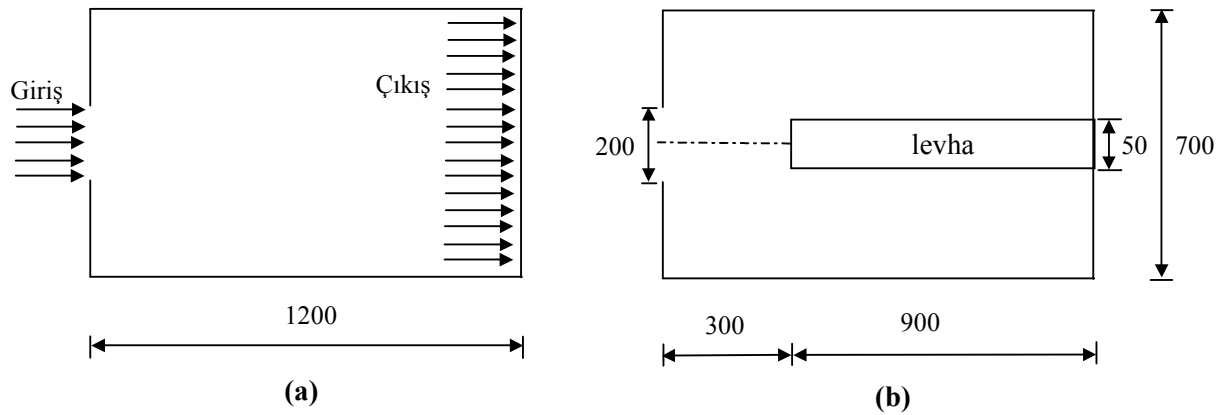
GİRİŞ

Yanma işlemi, insanın ateşi bulması ile normal yaşamımızın bir parçası haline gelmiş ve endüstrinin gelişmesine paralel olarak kullanımı hızla artmıştır. Dünyada alternatif enerji kaynaklarının artan kullanımına karşın, toplam enerji tüketiminin %95'ten fazlasını fosil yakıtların kullanımı oluşturmaktadır. Endüstriyel tesislerde artan fosil yakıt kullanımı ile tehlikeli boyutlara ulaşan yanma kaynaklı hava kirliliği günümüzün önemli problemlerinden birini oluşturmaktadır. Bu hava kirliliğinin; iklim değişikliklerine, ozon tabakasının delinmesine, insan ve çevre sağlığına olumsuz etkileri vardır. Günümüzde deneysel çalışmalar için sistem kurulmasının pahalı, uzun zaman gerektirmesi ve bazı durumlarda teknik zorluklarından dolayı sayısal akışkan dinamiği (computational fluid dynamic) tercih edilen bir tekniktir[1]. Yanma çalışmalarının temel öğelerinden olan yanma kararlılığı, yanma hızının kontrolü ve alev karakteristiklerinin tespitinde hesaplamalı akışkan dinamiğinin kullanımı oldukça yaygındır. Bu teknik, deneysel olarak

gerçekleştirilmesi çok pahalı ve teknik olarak mümkün olmayan sistemlerin modellemesine imkan vermektedir. Kazan, gaz türbini, roket motoru, ısıtıcı gibi sistemlerde akış alanının ve karışım özelliklerinin, sıcaklık dağılımının, kimyasal türlerin, partikül ve kirletici emisyonların tahmininde sayısal akışkan dinamiği çok yaygın olarak kullanılmaktadır [2,3,4]. Bu çalışmada bir kazanın yanma odası içerisine yerleştirilen metal bir plakanın sıcaklık dağılımı, NOx emisyonu ve akış alanına etkisi sayısal akışkan dinamiği programı kullanılarak belirlenmiştir.

MATEMATİKSEL MODEL

Çalışmada kullanılan yanma odasının fiziksel modeli levhasız ve levhalı durum için Şekil 1'de gösterilmiştir. Yanma odası 1200 mm. uzunluğunda ve 700 mm. genişliğindedir. Levhalı durum için 50 mm. genişliğinde ve 900 mm. uzunluğunda bir plaka kullanılmıştır. Akış alanında türbülans meydana geldiğinden, akışa uygun bir türbülans model kullanılması gerekmektedir. Burada, türbülanslı akış az girdaplıdır ve çizgisel hız bileşeni diğer hız bileşenleri ile karşılaştırıldığında çok küçüktür[5]. Bu nedenle, bu tür akışlarda iyi sonuçlar veren, standart k-e türbülans modeli kullanılmıştır. Akış alanı simetrik olduğundan modelleme işlemi sadece yanma odasının yarısı için yapılmıştır. Bu işlem, çözüm zamanının kısılmasını ve iyi uyumlulukta çözümler elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Yanma odasının modellemesinde, iki adımlı reaksiyon mekanizması ile eddy break-up yanma modeli kullanılmıştır. Kullanılan programda giriş ve duvarlar için sınır şartlar tanımlanmıştır. Levhalı ve levhasız akış şartlarında giriş sınır şartları; hız akış yönünde 2 m/s, türbülans şiddeti % 10, karakteristik uzunluk 0,35 m., sıcaklık 300 K olarak alınmıştır.



Şekil 1. Yanma Odasının Levhasız Durum (a) ve Levhalı Durum (b) İçin Fiziksel Modeli.

NÜMERİK MODELLEME

Yanma odası içerisinde türbülanslı reaksiyon akışını (türbülanslı yanma) tanımlayan kütle, momentum, kimyasal türlerin ve enerjinin korunumu ifade eden kısmi diferansiyel denklemler genel formda denklem (1)'de verilmektedir. Denklem (1)'deki Φ değişkenleri, Γ_Φ Φ değişkenleri için difüzyon katsayılarını ve S_Φ ise her bir hacim elemanın kaynak terimini göstermektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho v\Phi - \Gamma_{\varphi} \text{grad}\Phi) = S_{\varphi} \quad (1)$$

Yanma odası duvar yüzeyleri sıcaklığı sabit kabul edilmiş ve 700 K olarak tanımlanmıştır. Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Bu çalışmada işletme basıncı olarak 1,01325E+05 Pa alınmıştır. İyi bir yakınsama çözümü, normal arta kalanların 1E-3 civarındaki bir çözümde elde edilmektedir. Ancak, entalpi ve kimyasal türler için kabul edilebilir değer 1E-6'dır. Tam çözümler için gereken normal arta kalanlar, yanma durumunda 1E-05 ile 1E-7 arasında alınmıştır. İyi uyumlulukta çözümler sağlamak için, rahatlatma faktörleri basınç için 0.5, hızlar ve entalpi için 0.2 değerleri kullanılmıştır[8]. Levhalı durum için 7000, levhasız durum için 4500 iterasyondan sonra iyi yakınsamalar elde edildiği görülmüştür.

Türbülans modellemesinde kullanılan sabitler Tablo (1)'de verilmiştir. Yanma odasının modellemesinde, korunum denklemleri Simple algoritmasına dayanan iteratif yöntemle sayısal akışkan dinamiği programı Fluent kullanılarak çözülmüştür. Bu program, reaksiyon akışlarını karakterize eden diferansiyel denklemleri kontrol hacim yöntemi ile çözmektedir.

Tablo 1. Türbülans Model Sabitleri

Türbülans Model Sabitler
$C_{\mu} = 0.09$ $C_1 = 1.44$ $C_2 = 1.92$ $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$

Yanma odası içerisindeki türbülanslı reaksiyon akışında, tepkimeye girenler ve ürünler için reaksiyon oranları, Arrhenius reaksiyon oranı (denklem 2) ve eddy break-up reaksiyon oranı (denklem 3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{i,k} = -v'_{i,k} M_i T^{\beta_k} A_k \prod_j C_j^{v_{j,k}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (2)$$

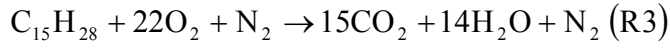
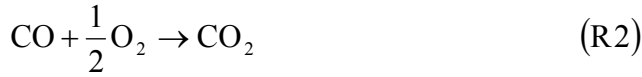
$$R_{i,k} = -C\rho\left(-\frac{\varepsilon}{k}\right) \sum_i \frac{m_i}{v_{i,k}} \quad (3)$$

Denklem 2'deki A_k magnussen sabitini, $v'_{i,k}$ i türünün molar stokiometrik katsayısını, M_i i türünün molekül ağırlığını (kg/kmol), β_k sıcaklık üssünü, C_j tepkimeye giren her bir j türünün molar konsantrasyonunu (kmol/m³), $v_{j,k}$ j konsantrasyonun üssünü E_k Aktivasyon Enerjisini (J/kmol), R universal gaz sabitini, T sıcaklığı (K) göstermektedir. Denklem 3'deki C deneysel bir sabiti, ρ yoğunluğu (kg/m³), türbülanslı kinetik enerji yayılım oranını, k türbülanslı kinetik enerji oran sabitini, m_i i türünün kütle kesrini göstermektedir. Yanma işlemlerinde yüksek

sıcaklıklardan dolayı radyasyonla ısı transferi meydana gelmektedir. Bu nedenle, yanma çalışmalarında ışınlama ısı transferinin gözönüne alınması gerekmektedir. Işınlama ısı transferi için discrete radyasyon modeli kullanılmıştır.

YANMA REAKSİYON MEKANİZMASI

Bu çalışmada, yanma odasında kimyasal formülü $C_{15}H_{28}$ olan sıvı yakıt yakılmıştır. Yanma reaksiyonunun modellenmesinde iki adımlı reaksiyon mekanizması ile eddy break-up yanma modeli kullanılmıştır. Yanma modellenmesinde kullanılan reaksiyonlar (R1, R2 ve R3) aşağıda gösterilmiştir. NO kestirimi için daha öncede benzer çalışmalarda [1, 2] kullanılmış olan, ısıl NO, prompt NO ve Yakıt NO dahil hesaba katan Fluent NOx post processor kullanılmıştır [1, 6].



Sıvı damlacık çapının, girişte 80 mm olduğu kabul edilmiştir. Sıvı yakıt damlacığı, buharlaşan sıvı damlacık tipinde alınmıştır [6]. Kullanılan yakıtın fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir [7].

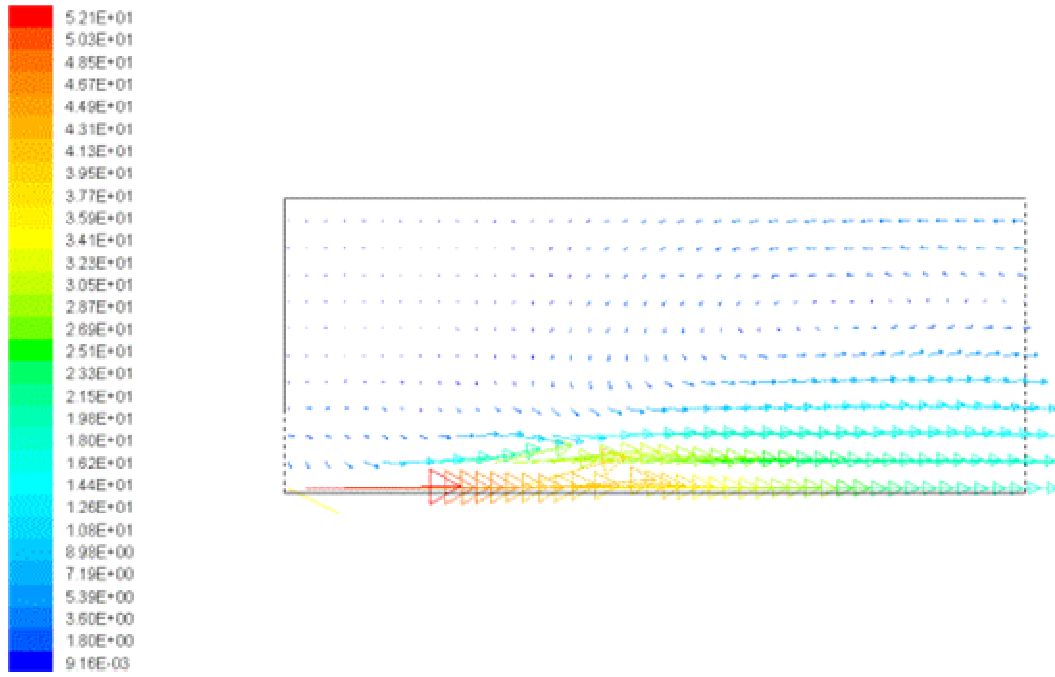
Tablo 2. Kullanılan Yakıtın Fiziksel Özellikleri.

Fiziksel Sabit	Sabit Değer
Buharlaşma Gizli Isısı [J/kg]	3.63E-5
Buharlaşma Sıcaklığı [K]	303
Kaynama Noktası [K]	463
Uçucu Bölüm Bileşeni [-]	1
Difüzyon Katsayısı [m^2/s]	6.1E-6
2. Fazın Buhar Basıncı [Pa]	8.2E+4

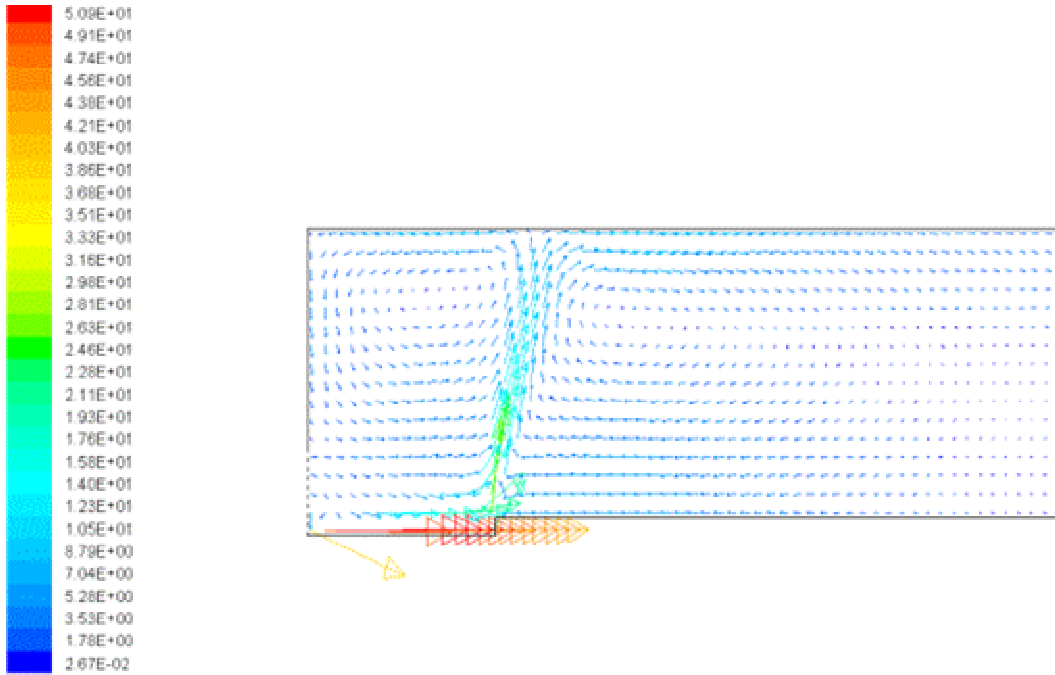
MODELLEME SONUÇLARI

Levhasız durumdaki hız dağılımı şekil 2-a'da görülmektedir. Maksimum hız, 50 m/s ile giriş

bölgesinde ve minimum hız 3 m/s ile üst yüzeye yakın çıkış bölgesindedir. Giriş bölgesinden başlayarak çıkış bölgesine kadar hızda bir azalma meydana gelmektedir. Çıkış bölgesinde, hız simetri eksenine yakın bölgelerde 18 m/s, orta bölgelerde 8 m/s, üst yüzeylere doğru 3 m/s ile kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Levhalı durumdaki hız dağılımı, şekil 2-b'de görülmektedir. Maksimum hız, 50 m/s ile giriş bölgesinde görülürken; minimum hız 2 m/s ile çıkış bölgesinde görülmüştür. Giriş bölgesinden başlayarak levha ön ucuna kadar kademeli bir hız azalması görülmekte, levha başlangıcında 38 m/s'ye kadar hız düşmektedir. Alev, levhaya çarptığı anda levha başlangıcından düşey olarak yukarıya doğru azalan bir hız dağılımı görülmektedir. Levha başlangıcında 38 m/s olan hız, orta bölgelere doğru 18 m/s, üst yüzeylere doğru 8 m/s ve üst yüzeyde 5 m/s olmaktadır. Yanma odası merkezine yerleştirilen levha akışı etkilemektedir. Levhasız durumda yanma odası çıkışına yakın bölgede resirkülasyon bölgesi oluşurken, levhalı durumda levha ucuna gaz jetlerinin çarpması ile iki resirkülasyon bölgesi oluşmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2 Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhalı (b) Durumda Hız Vektörleri (m/s).

Yanma odasının modellenmesinden elde edilen sıcaklık dağılımları, levhasız durum için Şekil 3-a'da ve levhali durum için Şekil 3-b'de gösterilmiştir. Maksimum sıcaklık (2450 K) alev bölgesinde ve minimum sıcaklık ise; yakıcı giriş bölgesinde (300 K) görülmüştür. Giriş bölgesinden başlayarak alevin olduğu bölgeye doğru sıcaklık kademeli olarak artmakta alev bölgesinde maksimum sıcaklık (2450 K) seviyesine ulaşmaktadır. Yanma odası merkezinde (simetri eksen) sıcaklık yaklaşık 1900 K civarındadır. Merkezden yanma odası duvarına doğru gittikçe sıcaklık 1700 K'e kadar düşmektedir. Simetri bölümünde ise giriş bölgesinden çıkış bölgesine kadar yine kademeli

şekilde artmakta, çıkış sıcaklığı 2150 K olmaktadır. Yanma odası içerisine yerleştirilen levha ile Şekil 3-b'ten de görüleceği gibi yanma şartları altında maksimum sıcaklık (2450 K) yine alev bölgesinde meydana gelmektedir. Minimum sıcaklık (300 K) ile giriş bölgesindedir. Giriş bölgesinden alev bölgesine kadar yanma odası içerisindeki sıcaklık kademeli olarak levhasız durumdaki gibi artmaktadır. Levhada meydana gelen ısı transferi ile simetri bölgesindeki ve yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımındaki fark Şekil 3-b'de görülmektedir. Yerleştirilen levha boyunca sıcaklık (2000 K) civarında sabit kalmaktadır. Yine aynı şekilde levhanın başlangıç noktasında üst yüzeylere doğru kademeli artan bir sıcaklık dağılımı görülmekle birlikte levha boyunca levha yüzeyinden üst yüzeye kadar kademeli bir sıcaklık azalması gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık dağılımında levhanın hemen üst bölgesinde 2100 K, levha ile yüzey orta bölgesinde 1900 K, üst yüzeylere doğrudan 1700 K'e kadar düşüş gözlenmektedir. Levhanın yerleştirilmesi ile sıcaklıkta bölgesel olarak azalma meydana gelmiştir.

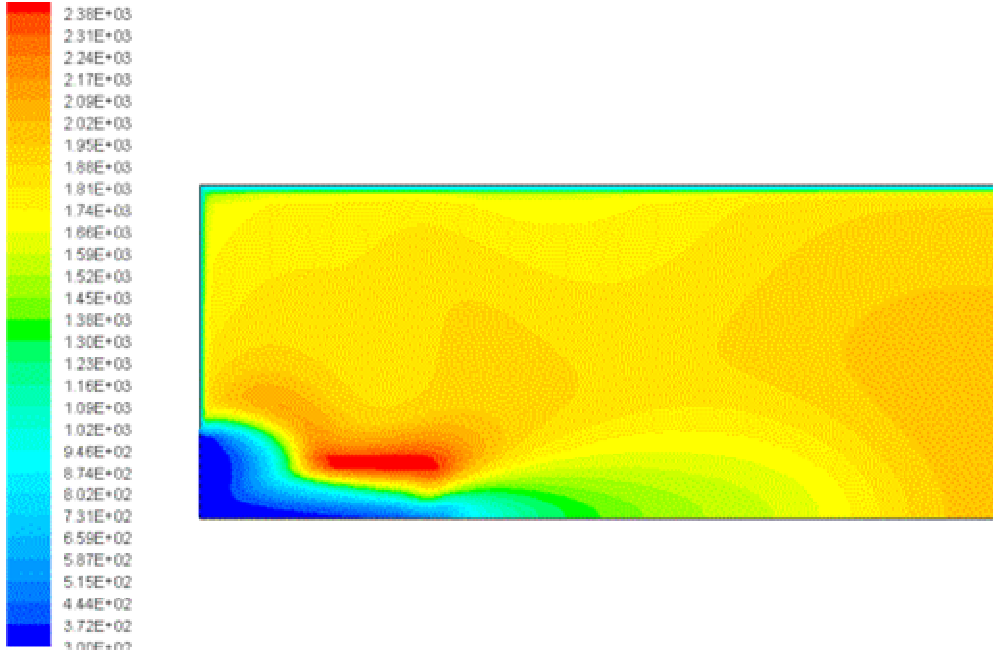
Levhasız durumda NO_x dağılımı, Şekil 4-a'da görülmektedir. Maksimum ve minimum NO_x değerlerinde levhalı duruma göre önemli farklılıklar görülmemektedir. Alev bölgesinden simetri eksenine doğru kademeli bir azalma meydana gelirken, alev bölgesinden üst yüzeylere (520 ppm) ve çıkışa doğru gidildikçe (410 ppm) homojen bir dağılımın olduğu görülmektedir. Levhalı durumdaki NO_x emisyonu dağılımı Şekil 4-b'de görülmektedir. Maksimum NO_x 788 ppm alev bölgesinde, en düşük NO_x ise; 39 ppm ile alev bölgesinin yakınlarında simetri ekseninde meydana gelmektedir. Alev bölgesinden simetri eksenine ve üst yüzeylere doğru kademeli bir azalma meydana gelmektedir. Çıkışa doğru NO_x dağılımında homojen bir durum mevcuttur. Yanma odası sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde NO_x emisyonunun da yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklığın maksimum olduğu (2450 K) alev bölgesinde NO_x emisyon değeri de (788 ppm) olduğu görülmektedir. Sıcaklık dağılımında olduğu gibi NO_x dağılımında da alev bölgesinden itibaren dışarıya doğru kademeli olarak azalma görülmektedir.

Levhalı durumda, CO₂'nin maksimum ve minimum değerleri levhasız durumla karşılaştırıldığında büyük farklılıklar olmadığı Şekil 5-a ve Şekil 5-b'den görülmektedir. Levhasız durumda CO₂ emisyonunun maksimum değeri %15,3 ile alev bölgesinde, minimum değer ise % 3,82 ile alev bölgesi yakınlarında simetri eksenine üzerinde olduğu Şekil 5-a'da görülmektedir. Yanma odası ortalarından, çıkışa kadar % 9'luk bir homojen dağılım görülmektedir.

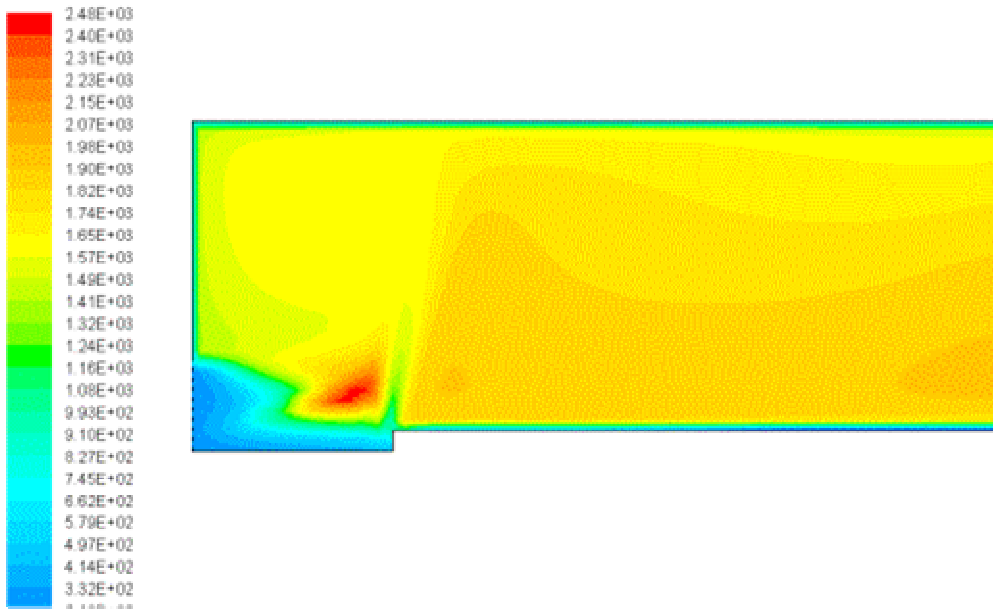
Levhasız durumdaki H₂O emisyonu, % 6,37 ile alev bölgesinde minimum değer % 0,6 ile alev bölgesi altı simetri eksenine üzerinde olduğu Şekil 6-a'da görülmektedir. Levhalı durumda ise H₂O'nun maksimum ve minimum değerlerinin levhasız durumla karşılaştırıldığında da benzer olduğu Şekil 6-b'de görülmektedir.

Levhalı durumdaki maksimum ve minimum değerler, levhasız durumla karşılaştırıldığında CO emisyon dağılımlarında büyük değişiklikler olmadığı Şekil 7-b'den görülmektedir. Levhasız durumdaki CO emisyonu, % 1,3 ile alev bölgesinde ve minimum değer ise % 0,006 ile alev bölgesi altı simetri eksenine üzerinde olduğu Şekil 7-a'da görülmektedir.

O₂ dağılımları Şekil 8'de görülmektedir. Levhasız durumla karşılaştırıldığında benzer olduğu Şekil 8-a ve Şekil 8-b'den görülmektedir. Levhasız durumdaki O₂ emisyonu, maksimum % 21 olarak giriş bölgesinde oluşmaktadır.

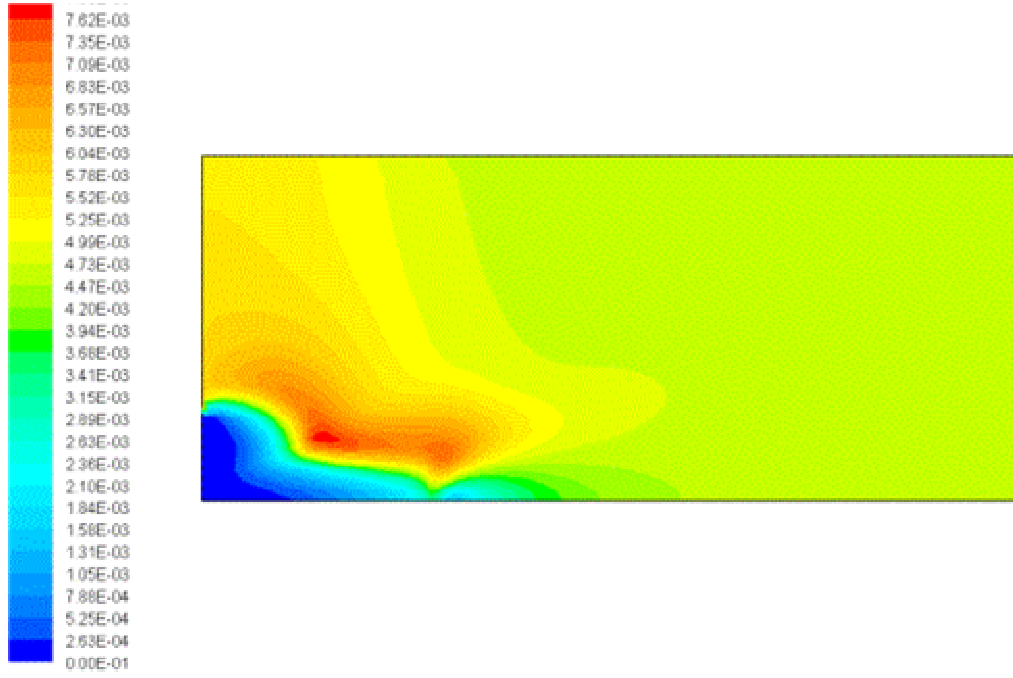


(a)

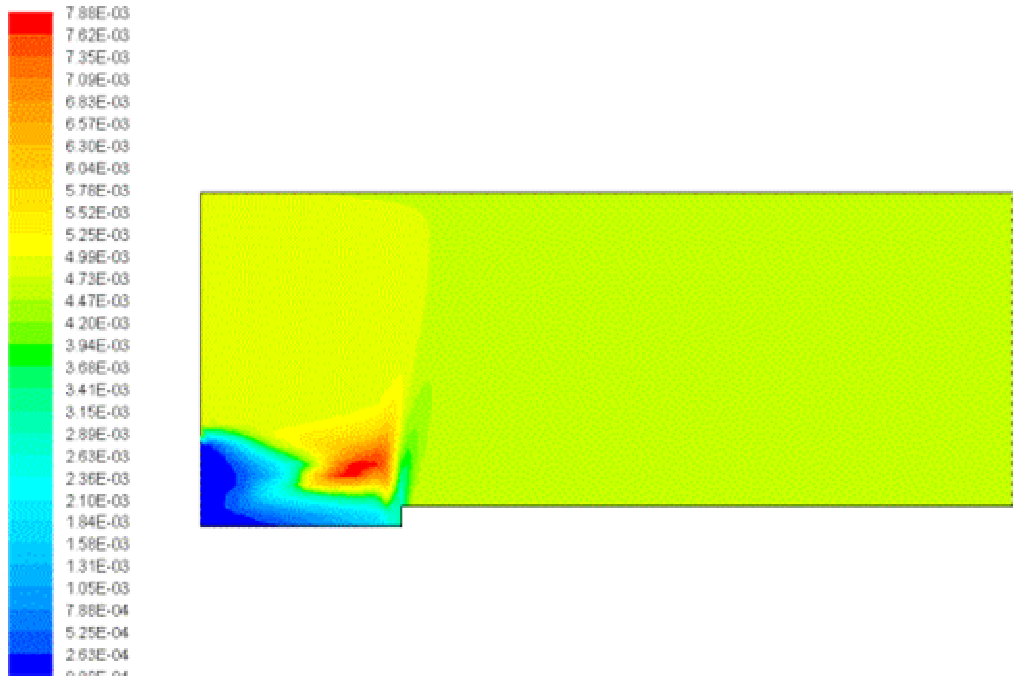


(b)

Şekil 3 Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhalı (b) Durumda Sıcaklık Dağılımları (K)

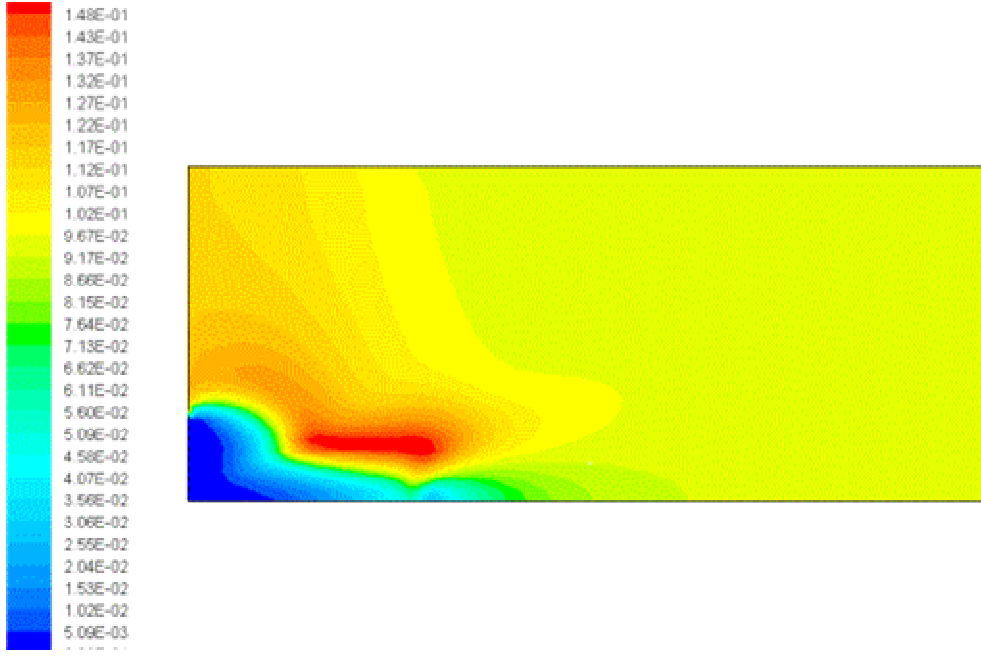


(a)

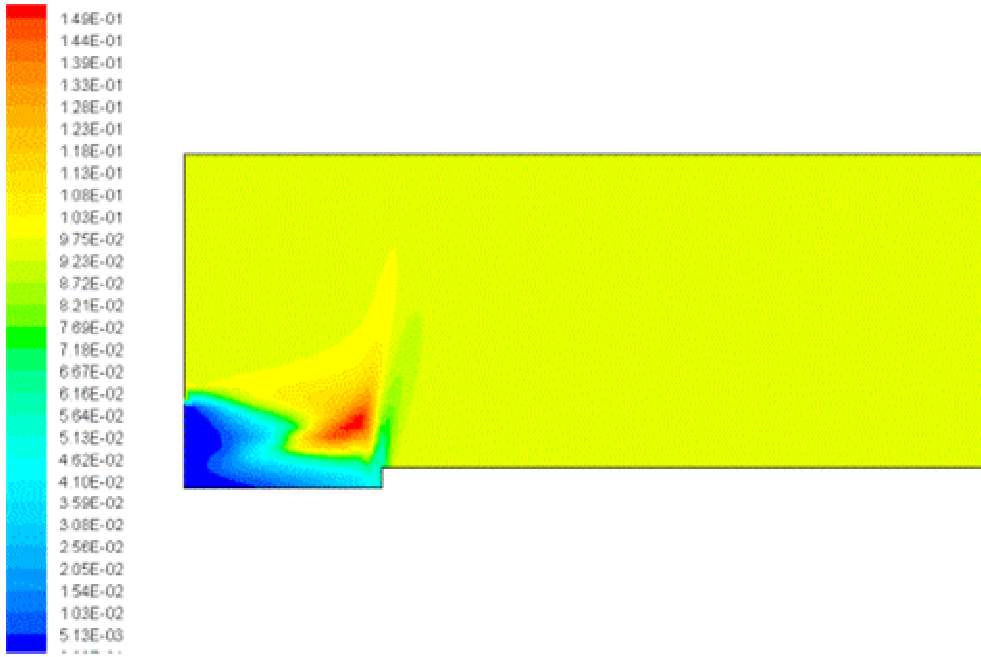


(b)

Şekil 4. Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhali (b) Durumda NO Emisyonu.

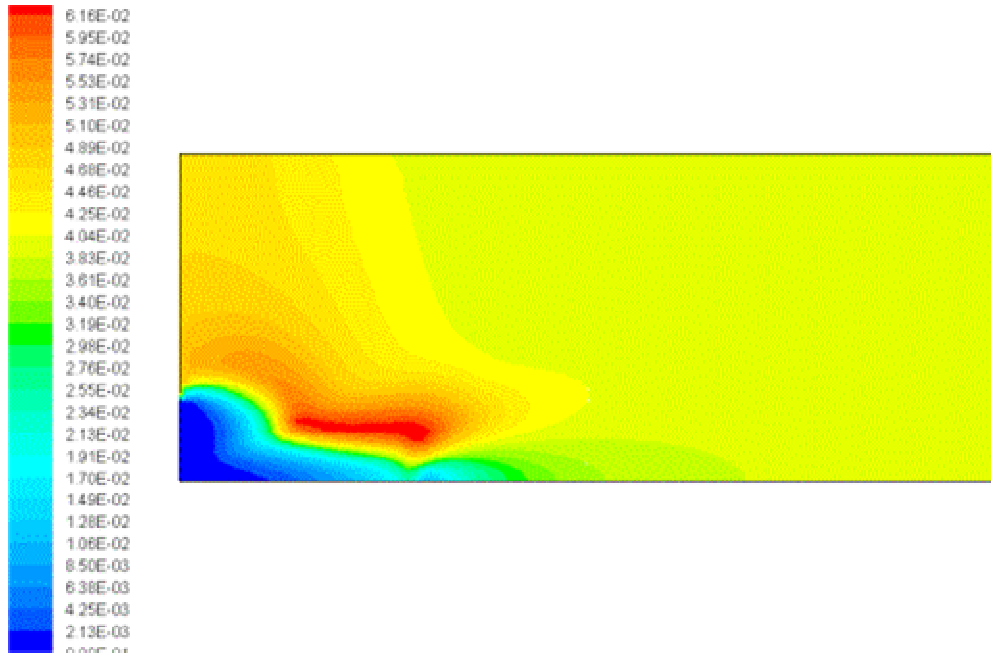


(a)

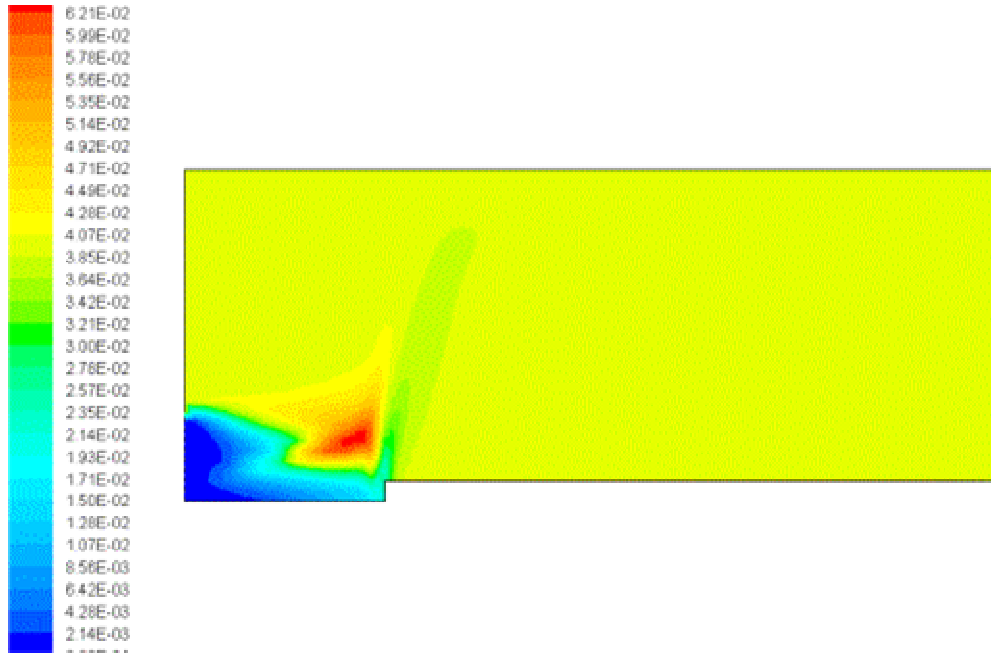


(b)

Şekil 5. Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhali (b) Durumda CO₂ Dağılımları (%).

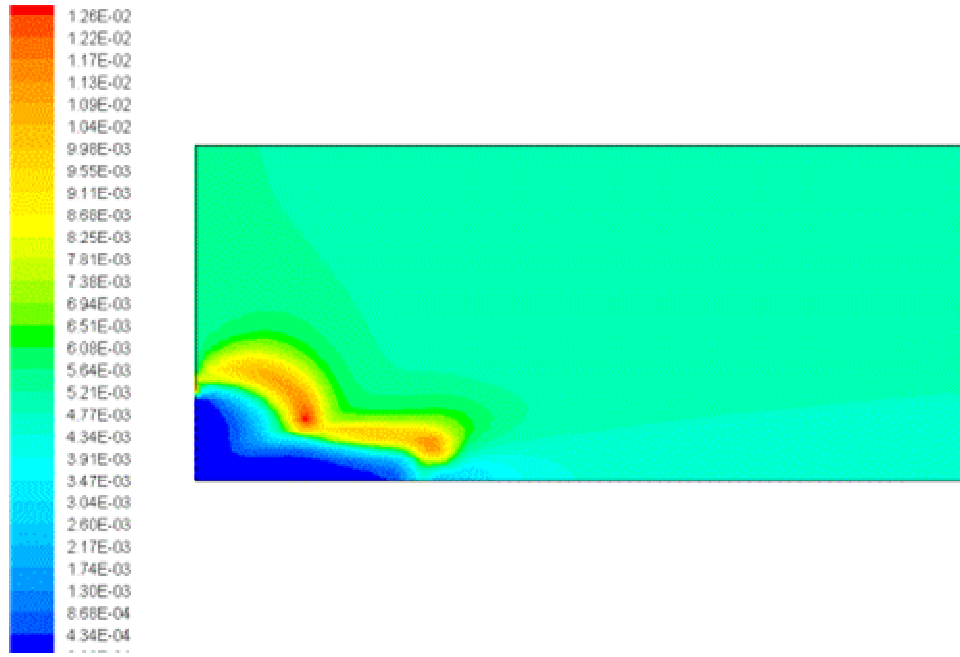


(a)

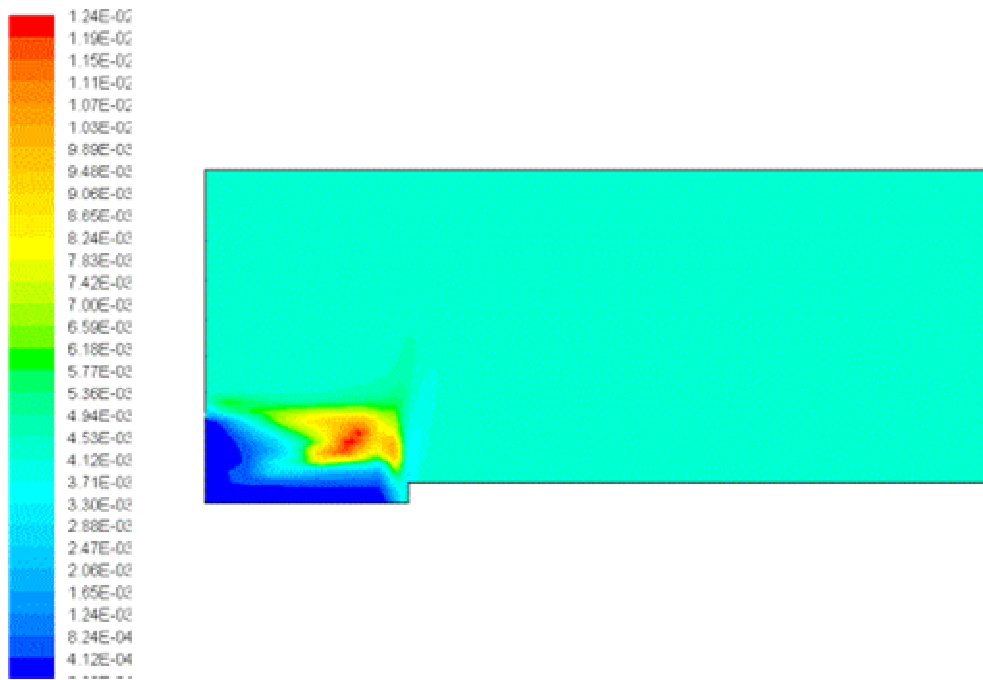


(b)

Şekil 6. Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhali (b) Durumda H₂O Dağılımları (%)

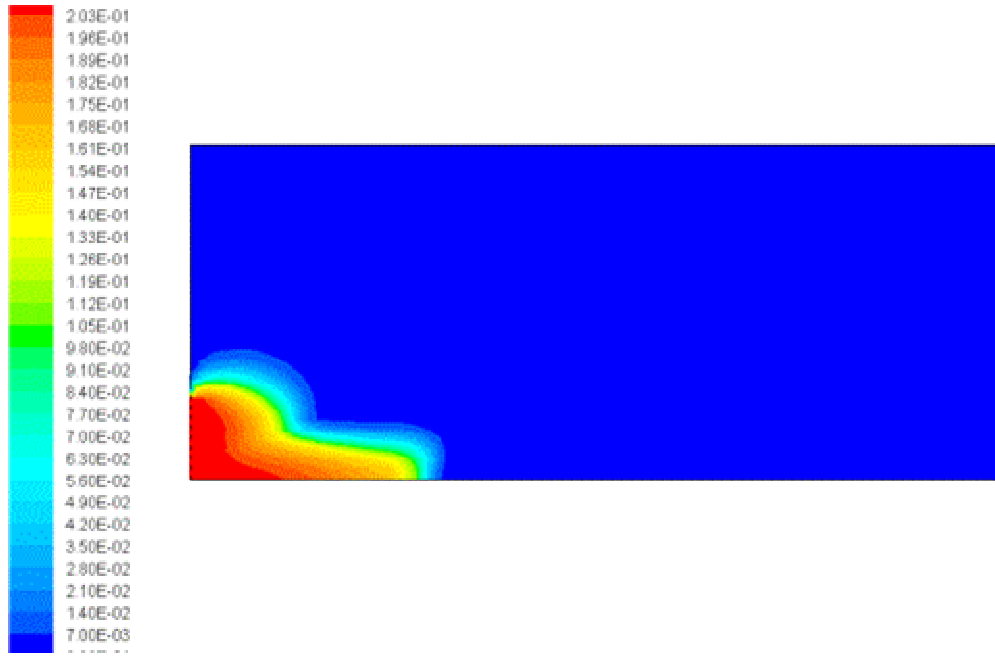


(a)

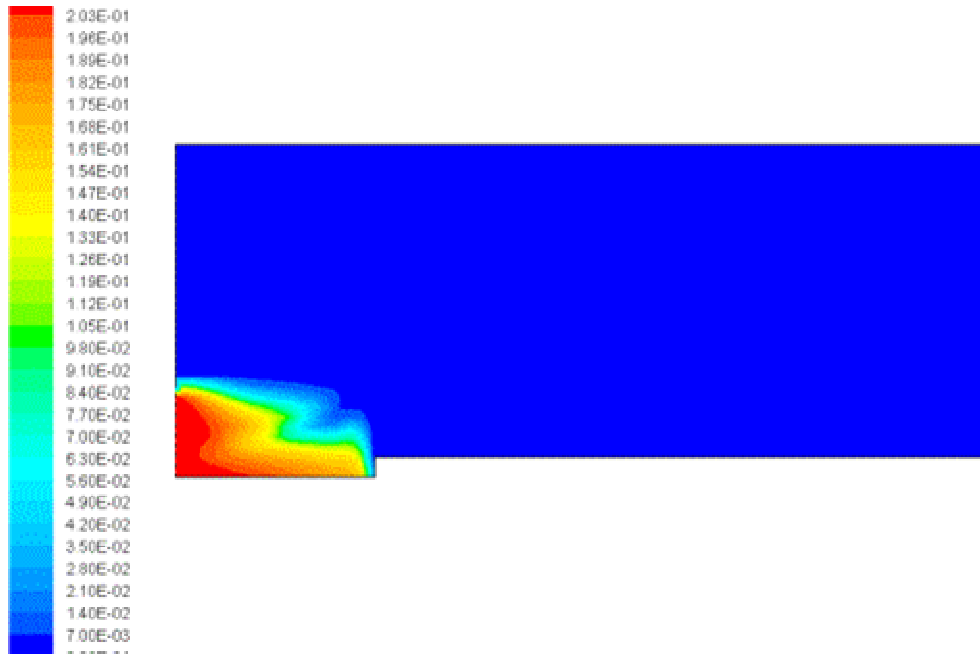


(b)

Şekil 7. Yanma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhali (b) Durumda CO Dağılımları (%).



(a)



(b)

Şekil 8. Yarıma Odasındaki Levhasız (a) ve Levhalı (b) Durumda O₂ Dağılımları (%).

SONUÇ

Bu çalışmada, sıvı yakıtlı bir kazanın yanma odasının hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yanma odası simetri eksenine yerleştirilen plakanın sıcaklık dağılımı ve NOx emisyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan sıcaklık ve NOx emisyonu arasındaki korelasyon tespit edilmeye çalışılmıştır. Modelleme işleminde, sıvı yakıt kazanı yanma odası silindirik ve simetrik olduğu için iki boyutlu üniform Fluent grid alanı kullanılmıştır. İki adımlı reaksiyon mekanizması ile eddy-break up yanma modeli kullanılmıştır. Alev bölgesinde merkezden yanma odası duvarlarına doğru önce sıcaklıkta yükselme ve daha sonra azalma olduğu her iki durumda da görülmektedir. Yanma odası çıkışına doğru, eksenel yönde bir sıcaklık azalması ile radyal yönde sıcaklık dağılımının benzer ve homojen olduğu görülmüştür. Yanma odası merkezine yerleştirilen levha, akışı özellikle başlangıç kısmında etkilemekte, ancak daha sonra levha boyunca hız dağılımı levhasız durumla benzerlik göstermektedir. NOx emisyon dağılımında sıcaklık dağılımına benzer bir eğilim göstermektedir. Yanma odası içerisinde sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde NOx emisyonunda yüksek olduğu görülmüştür. NOx emisyonunun ısı-NOx mekanizması ile oluştuğu tespit edilmiştir. Levhasız durumda, yanma odası ortalarına kadar devam eden kademeli azalma, levhalı durumda levha başlangıcından çıkışa kadar homojen bir dağılım göstermektedir. Dolayısıyla, sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde NOx emisyonları da yüksek değerlerdedir. Levhanın etkisi ile bölgesel bazlarda değişik olmak üzere, % 10-15 civarında NOx emisyonunda azalmalar tespit edilmiştir. Elde edilen model sonuçları benzer şartlardaki önceden yapılmış nümerik ve deneysel sonuçlarla [1, 2] genel olarak benzerlik göstermektedir. Levhasız durumda elde edilen gaz konsantrasyonları değerlerinin, levhalı durumda elde edilen değerlerden kısmen daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. O₂'nin levha başlangıcından çıkışa kadar tükenmiş olması, yanmanın stoikometrik şartlarda olmasından kaynaklanmaktadır.

KAYNAKÇA

1. **İlbaş, M.**, Studies of Ultra Low NOx Burner, PhD Thesis, University of Wales, Cardiff, UK, 1997.
2. **İlbaş, M., Yılmaz, İ.**, Modelling of A Methane Fired in Gas Turbine Combustor, 4th Aviation Symposium, Kayseri, 2002.
3. **Griffiths, J.F., Barnard, J.F.**, Flame & Combustion, Third Edition, 1994.
4. **Turns, S.R.**, An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Second Edition, McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series, 1996.
5. **Yıldırım, A.**, Ocak Sıcaklığının NOx Emisyonu Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran-2002, Kayseri.
6. Fluent Version 4.5, Fluent Incorporated, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court Lebanon NH 03766 USA.
7. **Williams, A.**, Fundamentals of Oil Combustion, Fossil Fuel Combustion, A source Book, pp.135-182, Wiley Interscience Publication, 1989.