

Doğalgaz Yakıtlı Düz Alevli Endüstriyel Brülör Tasarımı

Design of a Natural Gas Fired Industrial Flat Flame Burner

Nihat Enes TURAN¹, Ayhan ONAT², Selim HARTOMACIOĞLU²

¹YETEN Yakma ve Enerji Teknolojileri San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Dünya'da enerji tüketimi her geçen gün hızla artmaktadır. Endüstriyel yanma esnasında kullanılan yenilenemez enerji kaynaklarının (doğalgaz, fuel oil, vb. fosil yakıtların) sınırlı olması, endüstriyel tesislerin yıllık yakıt tüketimleri ve yanma sonucu açığa çıkan insan sağlığına zararlı baca gazı emisyonları göz önünde bulundurulduğunda, enerji verimliliği üzerine yapılan çalışmalar dünya çapında büyük bir önem kazanmıştır. Endüstrideki farklı yanma proseslerini gerçekleştirebilmek için çeşitli endüstriyel yakıcılar, brülörler kullanılmaktadır. Bu brülörler doğalgaz, fuel oil, dizel, LPG, COG, vb. yakıtlar ile çalışabilmektedir. Brülörler, alev şekillerine, çalışma prensiplerine, kullandıkları yakıt cinsine, vb. özelliklerine göre farklı şekilde isimlendirilir. Örneğin, yüksek hız brülörü, sıvı yakıt brülörü, rejeneratif brülör, reküperatif brülör, alevsiz brülör, düşük NOx brülörü, hidrojen brülörü, düz alevli brülör, vb. Bu çalışma ile bir düz alevli brülör tasarlanarak çeşitli modeller ve kabuller içeren hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD/CFD) yöntemleri ile ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak numerik yanma analizleri yapılmıştır. Düz alevli brülörler, brülörün oluşturduğu alevin direkt olarak mamule temas etmesinin ve pik alev sıcaklıklarının oluşmasının istenilmediği, homojen sıcaklık dağılımının arandığı uygulamalar (çelik, ısıl işlem, galvaniz, vb.) için tercih edilmektedir. Oluşturdukları alev, konvansiyonel brülörlerdeki gibi uzun ve keskin bir form yerine; daha yassı, düz bir forma sahiptir. Bu sebeple, düz alevli brülör (flat flame burner) olarak adlandırılırlar. CFD analizleri yapılarak farklı hava fazlalık kat sayılarının ve farklı yakma havası sıcaklıklarının yanma karakteristikleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiş; fırın içerisindeki sıcaklık dağılımları, hızlar, basınçlar, vb. sonuçlar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düz alevli brülör, Endüstriyel brülörler, Yakıt tasarrufu, Düşük NOx emisyonu, Yüksek yanma verimi, Çelik, Alüminyum, Isıl işlem, Galvaniz

Abstract

Energy consumption in the world is increasing day by day. Due to the limited non-renewable energy resources (natural gas, fuel oil, etc.) used during the industrial combustion, the annual fuel consumption of industrial facilities and dangerous flue gas emissions against the human health and nature; studies on energy efficiency and reduction of flue gas emissions have gained great importance around the world. Various industrial burners are used for different combustion processes in the industry. These burners use natural gas, fuel oil, diesel, LPG, COG, etc. as fuel source. They are categorized according to their flame shapes, working principles, used material types, fuel types, etc. For example, high velocity burners, liquid fuel burners, regenerative burners, recuperative burners, fuel oil burners, flameless burners, low NOx burners, hydrogen burners, flat flame burners, etc. In this work, a flat flame burner is designed and numerical combustion analyses of this burner are made by using Fluent CFD software. Flat flame burners are preferred for applications where the flame created by the burner is not desired to directly contact with the product, peak flame temperatures are avoided and homojen temperature distribution is needed. Such as, iron & steel, aluminum, galvanizing and heat treatment industries. These burners are called Flat Flame Burners because of their flat flame shape unlike the conventional burners which have a long and sharp flame shape instead. With the help of Fluent CFD software, the effects of different excess airs and different combustion air temperatures to the combustion characteristics are investigated and temperature distributions, velocities, pressures, etc. inside the furnace are evaluated.

Keywords: Flat flame burner, Industrial burners, Fuel saving, Low NOx emissions, High combustion efficiency, Steel, Aluminium, Heat treatment, Galvanizing

I. GİRİŞ

Günümüzde enerji, ülkelerin birbirleri arasındaki siyasi ilişkileri şekillendiren ve ülkelerin ekonomik kalkınma seviyelerini belirleyen en temel unsurlardan biridir. Birçok ülkenin dışa bağıllığı, ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılayabilme potansiyelleriyle direkt olarak ilişkilidir. Bu enerji talebini, sahip oldukları enerji kaynaklarını değerlendirerek karşılayan ülkeler, ekonomik açıdan diğer ülkelere kıyasla daha çok geliştikleri gibi takip ettikleri politikalarla da dünya siyasetinde söz sahibi olmuşlardır. Bu durum ülkeler arası siyasi ilişkiler incelendiğinde de çok net bir şekilde görülmektedir [1].

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun 2022 yılında çıkardığı doğalgaz piyasası 2021 sektör raporu incelendiğinde ülkemizin doğalgaz ihtiyacının %99,33'ünü ithal ettiği görülmüştür. %99,33'lük ithalat oranı, doğalgaz miktarı olarak 58.703,93 milyon Sm³'e denk gelmektedir ve bu miktar 2020 yılına kıyasla %21,98 oranında artmıştır. İthalat oranı ve yıllık ihtiyaç artışı göz önünde bulundurulduğunda, kısa vadede doğalgaz tüketimindeki dışa bağımlılığımızın azaltılması mümkün gözükmemektedir [2]. Bu sebeple, doğalgaz kullanan endüstriler için, enerji verimliliğini artırma yönünde çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Yüksek verimli yanma teknolojilerinin geliştirilmesi ve işletmeye alınması ülke ekonomisinin gelişimi için büyük önem taşımaktadır.

Pandemi sürecinde de çok net bir şekilde şahit olunmuştur ki insan sağlığı her şeyden önce gelmektedir. Endüstriyel yanma sonucu açığa çıkan baca gazı emisyonları insan sağlığını olumsuz yönde etkilediği gibi baca gazlarının atmosferde oluşturduğu sera etkisi ile meydana gelen küresel ısınma sebebiyle de doğadaki ekolojik dengeler bozulmuştur.

Yukarıda bahsi geçen konular incelendiğinde yapılacak Ar-Ge faaliyetlerine endüstriyel yakma ve ısıtma proseslerinin kalbi olan endüstriyel brülörler ile başlamak gerektiği görülür. Endüstriyel brülörler çeşitli yakıtlar yakılarak ısı enerjisinin elde edildiği endüstriyel yakma ve ısıtma proseslerinde kullanılırlar. Sanayideki çeşitli proseslere ve uygulama alanlarına göre birçok çeşitleri vardır. Bunlardan biri de düz alevli brülörlerdir.

Düz alevli brülörler, brülörün oluşturduğu alevin direkt olarak mamule temas etmesinin ve pik alev sıcaklıklarının oluşmasının istenilmediği, homojen sıcaklık dağılımının arandığı uygulamalar (çelik, ısıl işlem, galvaniz, vb.) için tercih edilmektedir. Oluşturdukları alev, konvansiyonel brülörlerdeki gibi uzun bir form yerine; daha yassı, düz bir forma sahiptir. Bu sebeple düz alevli brülör adlandırılırlar. Düz alevli brülörler ve uygulama alanları ile ilgili halihazırda birçok literatür çalışması olduğu gibi, yeni

yayınlanan yönetmelikler ve spesifik uygulamalar düşünüldüğünde yüksek verimli, düşük baca gazı emisyonlarına sahip düz alevli brülörlerin geliştirilme çalışmaları devam etmektedir [3]. Yapılan literatür çalışması ile düz alev formunu elde etmek için uygulanan değişik yöntemlere ve tasarımlara ulaşılmıştır. Bunlardan bazıları şu şekildedir.

Giraud P. ve Montgermont J. C. yaptıkları çalışmada, hadde, sıcak tutma ve ısıl işlem fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, düz alev formunu oluşturmak için kavisli konik şekilli bir refrakter malzemeden yapılmış alev borusuna sahiptir. Hava girişine yerleştirilmiş bir orifis metrenin, brülör performansına ve brülör alev formuna olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, yakıt-hava karışımını meydana getiren türbülantör için farklı tasarımlar yapılarak bu tasarımların brülör performansına ve yanma sonucu açığa çıkan NOx emisyonu miktarına etkisi incelenmiştir [4].

Feese J. J. ve Wartluft B. B. yaptıkları çalışmada, alüminyum ergitme ve hadde fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Kademeli yanma yöntemiyle çalışan bu brülör, oksidatör olarak ısıtılmış yakma havası kullanılmaktadır. Sahip olduğu geometri sayesinde yanma sonucu açığa çıkan baca gazları içerisinde çok düşük seviyelerde NOx, CO ve HC emisyonları ölçülmüştür. Bu sebeple düşük NOx brülörü olarak değerlendirilmektedir. Kullanılan kademeli yanma yöntemi ile yüksek sıcaklık uygulamalarında olduğu gibi düşük sıcaklık uygulamalarında da yüksek yanma verimi elde edilmektedir [5].

Fantuzzi M. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hadde fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, düz alev formunu oluşturmak için refrakter malzemeden yapılmış konik bir alev borusuna sahiptir. Diğer düz alevli brülör tasarımlarından farklı olarak alevin içerisine sekonder gaz kanalları kullanılarak doğalgaz verilmektedir. Bu yöntemin alev formuna ve baca gazı emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Sekonder gaz kanallarından yanma bölgesine doğalgaz gönderilmesi ile yanmamış gazların yakılıp baca gazı emisyonlarının düşürüldüğünü tespit etmişlerdir [6].

Wünning J. G. ve Wünning J. A. yaptıkları çalışmada, ısıl işlem fırınlarında kullanılmak üzere bir düz alevli brülör geliştirmişlerdir. Tasarladıkları brülör, diğer düz alevli brülör tasarımlarından farklı olarak konik alev borusu yerine düz alev formunu oluşturacak özel tasarlanmış bir silisyum karbür alev borusuna sahiptir. Brülör, elde ettiği düz alev formu ile yüksek hızlı yanma gerçekleştirir ve fırın iç atmosferini sirküle ettirir. Bu sayede fırın içerisindeki yanmamış gazlar tekrar reaksiyon bölgesine çekilir ve yakılır.

Yanmamış gazların yakılması ile baca gazı emisyonları düşürülür [7].

Wicker M. yaptığı çalışmada, bir düz alevli brülör geliştirmiştir. Tasarlanan brülör, klasik bir türbülátöre sahiptir. Türbülátör üzerindeki havayı döndüren dış kanatlar, düz alev formu için gerekli türbülans sağlayacak şekilde imal edilmiştir. Yakıt, türbülátörün merkezinden geçerek hava ile buluşur ve yanma reaksiyonu başlar. Ayrıca, brülörün merkezinden fırın atmosferine doğru uzatılmış bir gaz lansı kullanılarak yakıtın birden fazla noktada hava ile buluşması sağlanır ve kademeli yanma gerçekleştirilmiş olur. Bu sayede baca gazı emisyonları düşürülmüş ve fırın içerisindeki pik sıcaklıkların önüne geçilmiştir [8].

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Brülör ve Yanma Odası Tasarımı

Düz alevli brülörler ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde düz alev formunu elde etmek için alev borusunun konik bir şekilde tasarlandığı görülmüştür. Yaptığımız çalışmada da düz alev formunu elde etmek için alev borusu konik şekilde tasarlanmıştır. Yanma yöntemi olarak kademeli yanma metodu tercih edilmiştir. Bunun sebebi, kademeli yanma sonucunda açığa çıkan baca gazı emisyonlarının standart yanma sonucu açığa çıkan baca gazı emisyonlarından daha az olması ve daha verimli bir yanmanın elde edilmesidir. Yakıt ve hava, çeşitli geometrilerden geçerek brülör gövdesi içerisinde birçok kez karışır ve yanma meydana gelir.

Oluşan karışımın yüksek alev çıkış hızları ile konik alev borusuna yönlendirilmesi ile düz alev formu elde edilir. Bu sayede alev direkt olarak mamule temas etmez ve ışınlım yoluyla ısı transferi gerçekleşir. Ayrıca, düz alevin fırın duvarlarına doğru yönelmesi ile fırın duvarları ısınır. Isınan duvarların yaptığı ışıma ile de bir miktar ısı enerjisi mamule aktarılır.

Brülör tasarımı için kapasite 70 kW olarak seçilmiştir ve aşağıdaki formüller kullanılarak sisteme girecek akışkanların debileri hesaplanmıştır.

$$Q_{Brülör} = H_{U, Metan} \times \dot{V}_{Metan} \quad (1)$$

$$\rho_{Metan} = \dot{m}_{Metan} \div \dot{V}_{Metan} \quad (2)$$

$$\dot{V}_{Hava} = \lambda \times \dot{L}_{min} \times \dot{V}_{Metan} \quad (3)$$

$$\rho_{Hava} = \dot{m}_{Hava} \div \dot{V}_{Hava} \quad (4)$$

$Q_{Brülör}$: Brülör kapasitesi

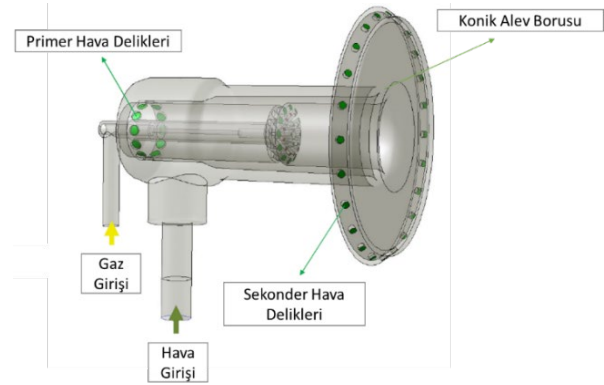
H_U : Alt ısıl değer

\dot{V} : Hacimsel debi

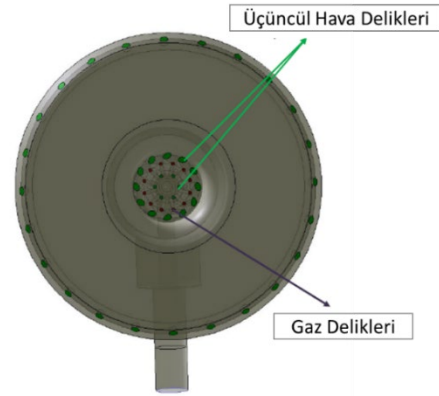
ρ : Yoğunluk

\dot{m} : Kütleli debi

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de tasarlanan brülör geometrisi verilmiştir.

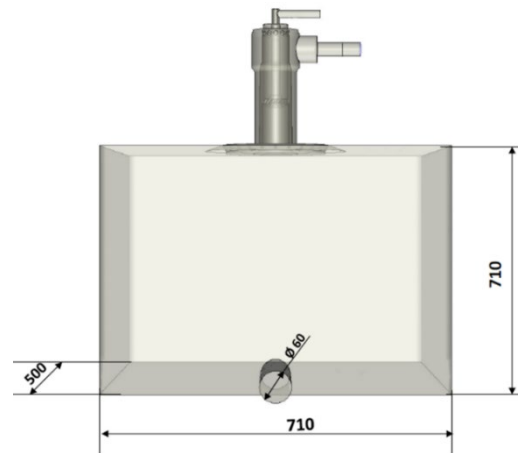


Şekil 2.1 Brülör Geometrisi - Yandan Görünüş



Şekil 2.2 Brülör Geometrisi - Önden Görünüş

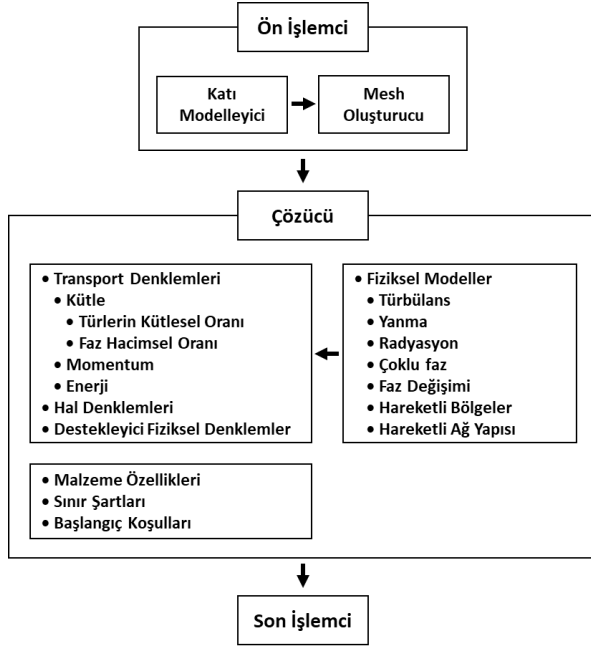
Şekil 2.3'te brülörün yanma odasına monte edilmiş hali verilmiştir.



Şekil 2.3 Yanma Odası - Önden Görünüş

2.1. Brülör ve Yanma Odası Tasarımı

Yanma analizi için kullanılan ANSYS FLUENT yazılımında kısmi diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürmek için sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır. FLUENT yazılımı, muhtelif modelleme programlarından aldığı Mesh dosyalarını okuyup istenilen koşulları uygulamak için dizayn edilmiştir ve bu sayede sistemin çözümünü elde eder. FLUENT yazılımını oluşturan ön işlemci, çözücü ve son işlemci kısımları Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 ANSYS FLUENT Yazılımını Oluşturan Kısımlar [9]

2.3. Analiz Formülleri

CFD hesaplamaları için aşağıdaki denklemler dikkate alınır [10].

Kütlenin korunumu denklemi:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (5)$$

Momentumun korunumu denklemi:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (6)$$

Enerjinin korunumu denklemi:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (7)$$

2.4. Kullanılan Modeller

Reynolds sayıları hesaplanarak yanma analizi için kullanılacak metan (yakıt) ve havanın (oksidatör) türbülanslı akış bölgesinde olduğu tespit edilmiştir.

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskoz Kuvvetleri}} = u \times D \div \nu \quad (8)$$

Re : Reynolds Sayısı

u : Akışkan Hızı

D : Çap

ν : Kinematik Viskozite

Türbülans modeli olarak standart k- ϵ , radyasyon modeli olarak discrete ordinates ve kimyasal reaksiyon modeli olarak reaksiyona giren gazları belirleme seçeneğini sunması sebebiyle species transport modeli seçilmiştir.

2.5. Mesh

Oluşturulan geometri ANSYS FLUENT programında Mesh modülüne aktarılmış ve sonlu elemanlar kullanılarak geometri bir ağ haline getirilmiştir. Şekil 2.4'te brülöre ait Mesh verilmiştir.



Şekil 2.5 Brülöre Ait Mesh

III. SONUÇLAR VE BULGULAR

3.1. Değişken Hava Fazlalıkları ile Yapılan Analizler

2. bölümde akışkanların debileri hesaplanırken hava fazlalık katsayısı (λ) 1,25 olarak alınmıştır. Değişken hava fazlalıklarının analiz sonucuna etkilerini incelemek için aşağıdaki tabloda belirtilen λ değerleri kullanılarak hava debileri tekrar hesaplanmıştır. Tablo 3.1 ve tablo 3.2'de yapılan 4 farklı yanma analizine ait girdiler ve hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 3.1 Girdiler

GİRDİLER				
	Analiz-1	Analiz-2	Analiz-3	Analiz-4
Brülör Kapasitesi (kW)	70	70	70	70
Yakıt	Metan	Metan	Metan	Metan
Oksidatör	Hava	Hava	Hava	Hava
Yakıt Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25
Hava Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25

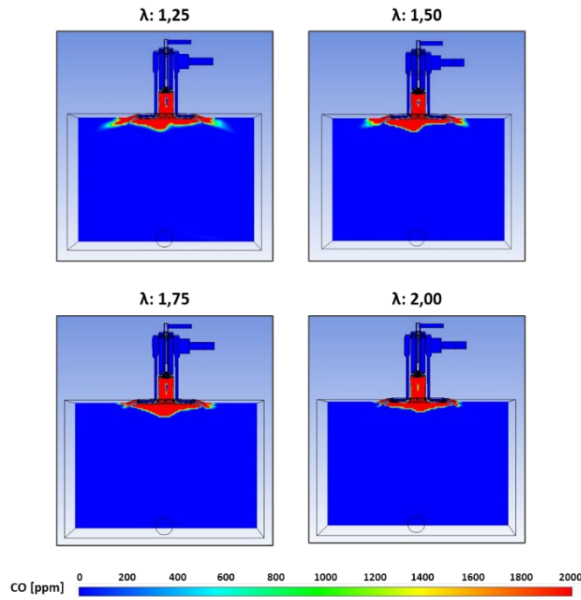
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
---------------------------------------	------	------	------	------

Tablo 3.2 Hesaplanan Değerler

HESAPLANAN DEĞERLER				
	Analiz - 1	Analiz - 2	Analiz - 3	Analiz - 4
Metan Debisi (kg/s)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Hava Debisi (kg/s)	0,0305	0,0366	0,0427	0,0488

3.1.1. Alev Formu

Şekil 3.1’de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen alev formları gösterilmiştir.

**Şekil 3.1** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

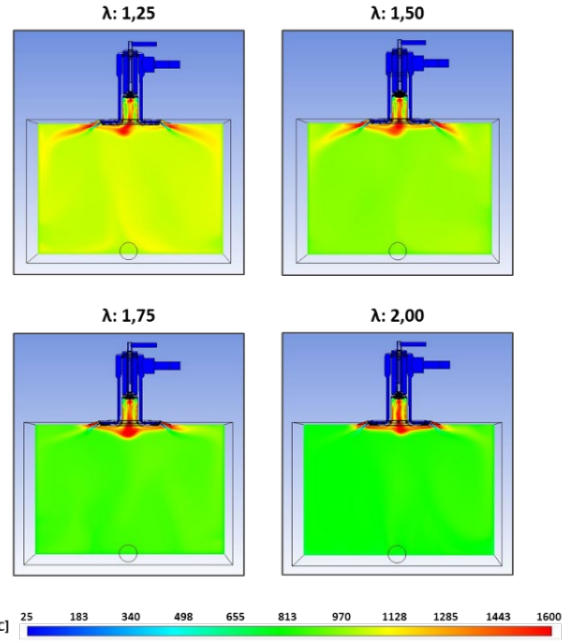
Hava fazlalığının alev formu üzerindeki etkisi incelendiğinde, yakıt debisi sabitken hava debisi artırıldığında alev boyunun kısaldığı ve alevin brülörün merkezine doğru çekildiği görülmüştür. Tablo 3.3’te hava fazlalığındaki değişimin alev boyuna etkisi verilmiştir.

Tablo 3.3 Hava Fazlalığının Alev Boyuna Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Boyu (cm)	41	33	30	25

3.1.2. Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.2’de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen sıcaklık dağılımları [°C] cinsinden gösterilmiştir.

**Şekil 3.2** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

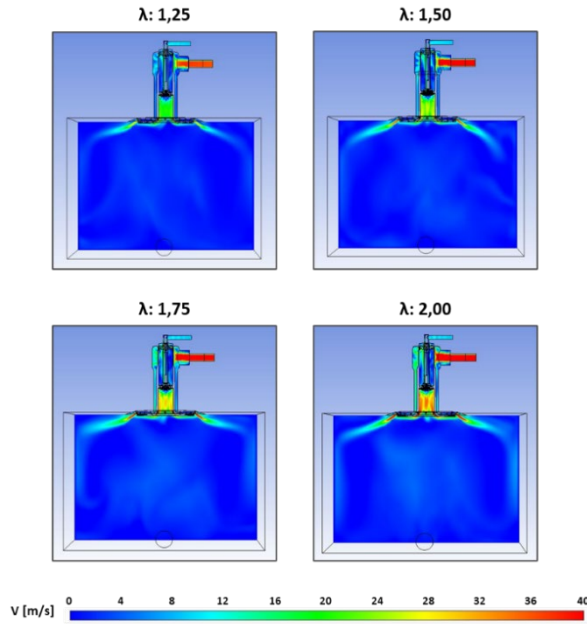
Hava fazlalığının adyabatik alev sıcaklığı ve baca sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi arttıkça adyabatik alev sıcaklığının ve baca sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Tablo 3.4’te hava fazlalığındaki değişimin adyabatik alev sıcaklığına ve baca sıcaklığına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.4 Hava Fazlalığının Adyabatik Alev Sıcaklığına ve Baca Sıcaklığına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	1780	1650	1600	1550
Baca Sıcaklığı (°C)	1080	980	890	750

3.1.3. Hız Dağılımı

Şekil 3.3’te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen hız dağılımları [m/s] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3 [m/s] Cinsinden Hız Dağılımları

Hava fazlalığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi arttıkça alev çıkış hızının arttığı görülmüştür. Tablo 3.5'te hava fazlalığındaki değişimin alev çıkış hızına etkisi verilmiştir.

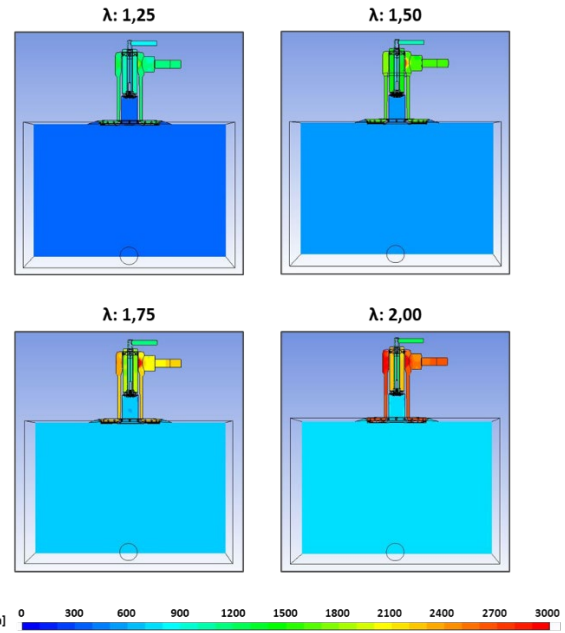
Tablo 3.5 Hava Fazlalığının Alev Çıkış Hızına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Çıkış Hızı (m/s)	32	39	45	52

Hava fazlalığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde hava debisi ve alev çıkış hızları arttıkça, hız vektörlerinin fırının iç kısımlarına doğru daha geniş bir alana yayıldıkları görülmüştür. Alev çıkış hızının artması sonucunda fırın iç atmosferi sirküle ettirilir ve fırın içerisindeki yanmamış gazlar tekrardan reaksiyon bölgesine çekilerek yakılır. Yanmamış gazların yakılması ile NOx emisyonları düşürülmüş olur. Bu da yüksek hızlı yanmanın endüstriyel uygulamalarda NOx emisyonlarını düşürmek amacıyla kullanılmasının sebeplerinden biridir.

3.1.4. Basınç Dağılımı

Şekil 3.4'te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı hava fazlalıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen basınç dağılımları [Pa] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Analiz Sonuçlarına Göre Basınç Dağılımları
Hava fazlalığının fırın içerisindeki basınç dağılımına etkisi incelendiğinde hava debisi ve alev çıkış hızları arttıkça fırın iç basıncının arttığı, bu durumun da brülör gaz ve hava giriş basınçlarını etkilediği görülmüştür. Hava fazlalığı arttıkça brülör gaz ve hava giriş basınçları da artmıştır. Tablo 3.6'da hava fazlalığındaki değişimin brülör gaz ve hava giriş basınçlarına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.6 Hava Fazlalığının Brülör Gaz ve Hava Giriş Basınçlarına Etkisi

Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,50	1,75	2,00
Gaz Giriş Basıncı (Pa)	940	1100	1200	1300
Hava Giriş Basıncı (Pa)	1130	1660	2250	2700

3.2. Değişken Yakma Havası Sıcaklıkları ile Yapılan Analizler

Değişken yakma havası sıcaklıklarının analiz sonucuna etkilerini incelemek için aşağıdaki tabloda belirtilen hava sıcaklık değerleri ile yanma analizleri tekrar yapılmıştır. Tablo 3.7 ve tablo 3.8'de yapılan 4 farklı yanma analizine ait girdiler ve hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 3.7 Girdiler

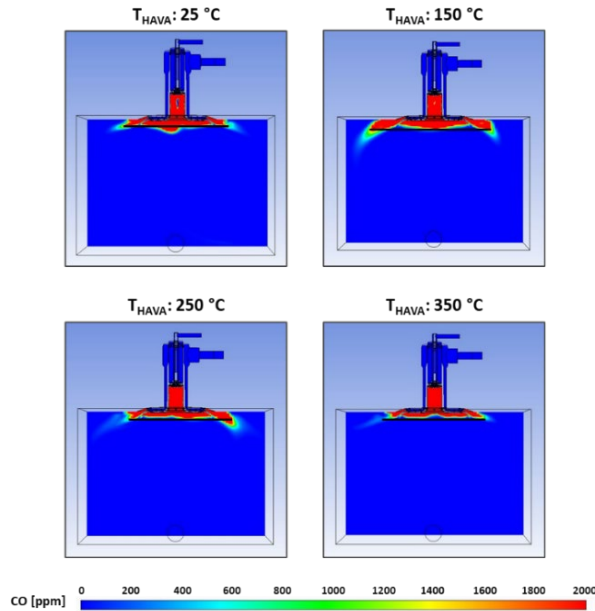
GİRDİLER				
	Analiz-1	Analiz-2	Analiz-3	Analiz-4
Brülör Kapasitesi (kW)	70	70	70	70
Yakıt	Metan	Metan	Metan	Metan
Oksidatör	Hava	Hava	Hava	Hava
Yakıt Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25
Hava Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,25	1,25	1,25	1,25

Tablo 3.8 Hesaplanan Değerler

HESAPLANAN DEĞERLER				
	Analiz - 1	Analiz - 2	Analiz - 3	Analiz - 4
Metan Debisi (kg/s)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Hava Debisi (kg/s)	0,0305	0,0305	0,0305	0,0305

3.2.1. Alev Formu

Şekil 3.5'te yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen alev formları gösterilmiştir.

**Şekil 3.5** Analiz Sonuçlarına Göre Alev Formları

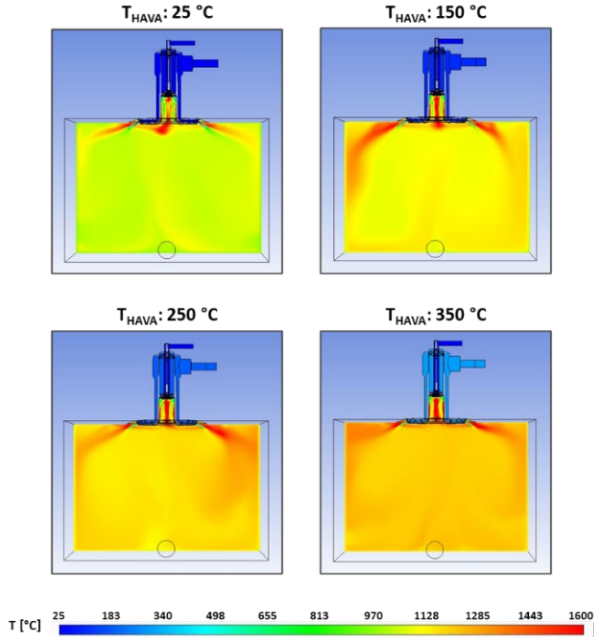
Yakma havası sıcaklığının alev formu üzerindeki etkisi incelendiğinde, yakma havası sıcaklığı arttırıldığında alev boyunun küçüldüğü ve alevin merkeze doğru çekildiği görülmüştür. Tablo 3.9'da yakma havası sıcaklığındaki değişimin alev boyuna etkisi verilmiştir.

Tablo 3.9 Yakma Havası Sıcaklığının Alev Boyuna Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	1,25	1,50	1,75	2,00
Alev Boyu (cm)	41	33	30	25

3.2.2. Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.6'da yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen sıcaklık dağılımları [°C] cinsinden gösterilmiştir.

**Şekil 3.6** [°C] Cinsinden Sıcaklık Dağılımları

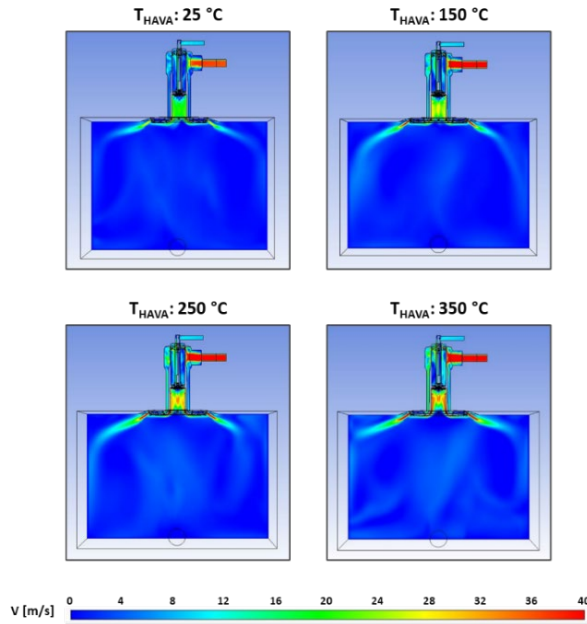
Yakma havası sıcaklığının adyabatik alev sıcaklığı ve baca sıcaklığı üzerindeki etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı arttıkça adyabatik alev sıcaklığının ve baca sıcaklığının arttığı görülmüştür. Tablo 3.10'da yakma havası sıcaklığındaki değişimin adyabatik alev sıcaklığına ve baca sıcaklığına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.10 Yakma Havası Sıcaklığının Adyabatik Alev Sıcaklığına ve Baca Sıcaklığına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	1780	1890	1950	1980
Baca Sıcaklığı (°C)	1080	1150	1240	1290

3.2.3. Hız Dağılımı

Şekil 3.7'de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen hız dağılımları [m/s] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.7 [m/s] Cinsinden Hız Dağılımları

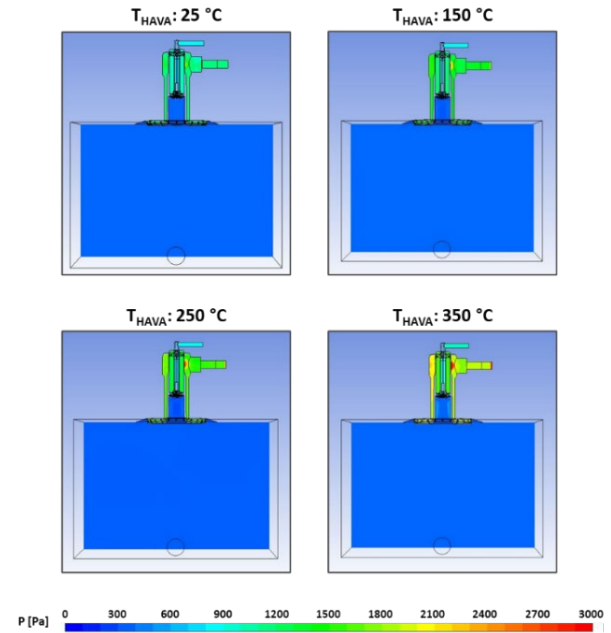
Yakma havası sıcaklığının fırın içerisindeki hız dağılımları üzerindeki etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı arttıkça alev çıkış hızının arttığı görülmüştür. Tablo 3.11'de yakma havası sıcaklığındaki değişimin alev çıkış hızına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.11 Yakma Havası Sıcaklığının Alev Çıkış Hızına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Alev Çıkış Hızı (m/s)	32	48	56	68

3.2.4. Basınç Dağılımı

Şekil 3.8'de yapılan analiz sonuçlarına göre farklı yakma havası sıcaklıkları ile meydana gelen yanmada elde edilen basınç dağılımları [Pa] cinsinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Analiz Sonuçlarına Göre Basınç Dağılımları

Yakma havası sıcaklığının fırın içerisindeki basınç dağılımına etkisi incelendiğinde yakma havası sıcaklığı ve alev çıkış hızları arttıkça brülör gaz ve hava giriş basınçlarının arttığı görülmüştür. Tablo 3.11'de yakma havası sıcaklığındaki değişimin brülör gaz ve hava giriş basınçlarına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.10 Yakma Havası Sıcaklığının Brülör Gaz ve Hava Giriş Basınçlarına Etkisi

Yakma Havası Sıcaklığı (°C)	25	150	250	350
Gaz Giriş Basıncı (Pa)	940	980	1020	1080
Hava Giriş Basıncı (Pa)	1130	2100	2800	3600

IV. SONUÇ

Yapılan analizler sonucunda düz alev formunun doğrudan brülör geometrisi ile alakalı olduğu, hava fazlalık kat sayısı ve yakma hava sıcaklığında meydana gelen değişikliklerin yanmayı nasıl etkilediği açıkça görülmüştür. Bu parametrelerin alev formu, sıcaklık dağılımları, hızlar, basınçlar, vb. üzerinde yapmış olduğu değişikliklerin incelenmesi makale konusu brülörün değişik sektörlerde uygulanması için önemli bir referanstır.

CFD yazılımlarının brülör imalatı yapan firmalar için vazgeçilmez bir araç olduğu açıkça görülmüştür. CFD analizleri yapılarak endüstrideki yanma uygulamaları esnasında karşılaşılabilecek sorunların daha tasarım aşamasında tespit edilmesi ve incelenmesi mümkün hale gelmiştir.

CFD analiz sonuçları, yapılacak prototip imalatı çalışmalarına referans olmuştur. İmal edilecek

prototipin bir yanma odasında performans testlerinin yapılması ve performans test sonuçları ile CFD analiz sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir.

Performans testleri esnasında, CFD analiz sonuçlarına ek olarak, baca gazı içerisindeki NO_x, CO, CO₂ ve O₂ gibi yanma sonucu açığa çıkan gazların miktarları da ölçülecektir.

Gelecekte yapılması planlanan bu çalışmalar ile ısı işlem, çelik, galvaniz, vb. sektörler için yüksek verimli, düşük NO_x emisyonuna sahip düz alevli brülörün seri imalatı planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] İskender, S. (2005). Türkiye 'de ve Dünya 'da Enerji & Nükleer Enerji Gerçeği, Türkiye Teknik Elemanlar Vakfı, Ankara.
- [2] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2022). Doğal Gaz Piyasası 2021 Yılı Sektör Raporu, Ankara.
- [3] Leicher, J. (2015). Effiziente Brennertechnik für Industrieöfen, 6. Praxistagung, Essen.
- [4] Giraud, P., Montgermont, J. C. (2002). Flat Flame Burners, US Patent 6,461,145 B1.
- [5] Feese, J. J., Wartluft, B. A. (2013). Three Stage Low NO_x Burner System with Controlled Stage Air Separation, US Patent 8,485,813 B2.
- [6] Fantuzzi, M., Daneri, M., Laviosa, V., Senarega, M., Zanusso, U., Malfa, E. (2013). Flat-Flame Vault Burner with Low Polluting Emissions, US Patent 8,480,394 B2.
- [7] Wüning, J. G., Wüning, J. A. (2004). Flameless Oxidation Burner, US Patent 2004/0091830 A1.
- [8] Wicker, M. (2012). Low-NO_x-Lösungen für Industrielle Brenner, 3. Praxistagung, Essen.
- [9] Omar, M., Yoğuşmalı Kombiler için Çok Geçişli Kompakt Isı Değiştiricisi ve Yarı Küresel Metal Matrix Yakıcının Geliştirilmesi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2014.
- [10] Çengel, Y.A. (2006). Heat and Mass Transfer A Practical Approach, 3rd Edition Mc-Graw-Hill, Singapore.