

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF METHANE IN A PRE-MIXED COMBUSTOR UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

Çağrı TÜMER^{1,*}  Serhat KARYEYEN² 

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: 31.07.20222
Revision: 24.10.2022
Accepted: 02.11.20222

Highlights

- CFD Modelling.
- Premixed Combustion.
- Reaction Mechanism.

Keywords

Distributed Combustion
Ultra- Low Emission
Premixed Burner

The results of the products as a result of combustion were investigated for the air excess coefficients of 1.2 and 1.7 under the colorless distributed combustion conditions of these different premixed methane fuels.

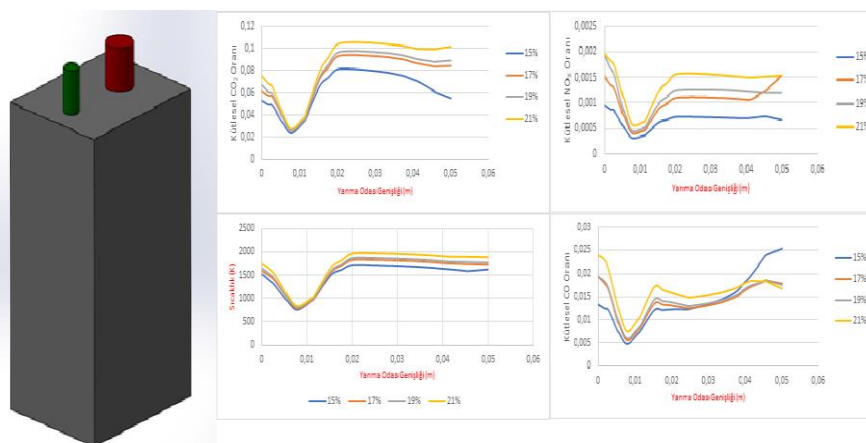


Figure A. Experimental system, numerical modelling and graphical results

Purpose: As a result of our ever-increasing energy needs, the negative impact of the fuels we use on our world is increasing day by day. It will be more appropriate to use methane fuel in suitable environments, as a result of the application of colorless distributed combustion conditions, as its emissions decrease to a very low level.

Theory and Methods: Before sending the methane gas to the combustion chamber, it is prepared externally as pre-mixed. The fuel-air mixture was used as premix at $\lambda=1.2$ and $\lambda=1.7$ air excess ratios. In the presented study, fuel rates corresponding to 10 kW power are presented. For combustion reactions, GRI-MECH 3.0 was used, where a 64-step chemical reaction was created and integrated into the Eddy Dissipation Concept model and models were performed. Colorless distributed combustion conditions were achieved by changing the 21% O₂ ratio in the air to 19%, 17% and 15%. For the modeling, the excess air coefficient was first accepted as $\lambda=1.2$ and the results obtained as a result of these conditions were evaluated. Then, the excess air coefficient was changed to $\lambda=1.7$ and the effects of the excess air coefficient on the colorless dispersed combustion conditions were investigated.

Results: As a result of the study, when two different excess air coefficients were compared, a decrease was observed in all emissions.

Conclusion: The obtained emission profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactory agreement. The 64-step reaction appears to be sufficient under conditions of excess air coefficient and colorless distributed combustion.

GU J Sci, Part C, 10(4): 895-924 (2022)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF METHANE IN A PRE-MIXED COMBUSTOR UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

Çağrı TÜMER^{1,*} Serhat KARYEYEN²

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

Due to the increase in energy demand and the depletion of fossil energy resources worldwide, resources should be used more efficiently. The damage to the environment of the resources used increases in parallel with the increase in energy demand and causes irreversible damages. With colorless distributed combustion approach, it was aimed to minimize the environmental damage of the fuels, and in this study, colorless distributed combustion method was applied. Premixed air-fuel mixture was introduced into a combustor, and the results were examined by changing the excess air coefficient (λ) under different conditions. The combustion reactions were first determined. 21% O₂ concentration in the air was changed to 19%, 17%, and 15%, and colorless distributed combustion was achieved. Excess air ratio $\lambda=1.2$ was first determined, and the results obtained is evaluated. Then, excess air ratio was changed as $\lambda=1.7$, and excess air ratio effects on colorless distributed combustion was investigated. Modeling was performed using Ansys Fluent Student Edition software. Species Transport combustion model and P-1 radiation model were selected for three-dimensional numerical modeling in Ansys Fluent software. GRI-MECH reaction mechanism was used, 64-step chemical reactions were created, and embedded to the Eddy Dissipation Concept model. The existing modeling results were compared for the validation of the model, and it is concluded that the results are in good agreement with the existing results. Modelings were performed at boundary conditions being a thermal power of 10 kW (about a thermal intensity of 70 MW/m³.atm). In order to achieve colorless distributed combustion, modelings that oxygen concentration in the air inside the fuel-air mixture was to be 21% O₂ (conventional combustion), 19% O₂, 17% O₂, and 15% O₂ were performed. N₂ was selected as the diluent to achieve colorless distributed combustion (simulation of combustion products recirculation). According to the results, via colorless distributed combustion, a more uniform thermal field which is particularly so important for gas turbines and/or aircraft engine combustors was obtained along with decrease in CO₂, NO_x, and CO emissions.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31.07.2022
Düzeltilme: 24.10.2022
Kabul: 02.11.2022

Keywords

- CFD Modelling.
- Premixed Combustion.
- Reaction Mechanism.

Anahtar Kelimeler

Distributed Combustion
Ultra- Low Emission
Premixed Burner

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA METAN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Öz

Dünya genelinde enerji ihtiyacındaki artış ve fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması sebebiyle kaynakların daha verimli kullanılması gerekmektedir. Kullanılan kaynakların çevreye olan zararları ise enerji ihtiyacındaki artış ile paralel olarak artmakta ve geri dönülemez zararları sebep olmaktadır. Renksiz dağıtılmış yanma yaklaşımı ile yakıtların çevreye olan zararlarını azaltmak amaçlanmış ve bu çalışmada da renksiz dağıtılmış yanma metodu uygulanmıştır. Bir yakıcı içerisinde ön karışimli olarak hava-yakıt karışımı gönderilmiş ve farklı koşullar altında hava fazlalık katsayısının (λ) da etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma yapılırken öncelikle yanma reaksiyonu hesaplanmıştır. Hava içerisindeki molce %21 O₂ oranı, %19, %17 ve %15 olacak şekilde değiştirilerek renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılmıştır. Modellemeler için hava fazlalık katsayısı öncelikle $\lambda=1.2$ kabul edilmiş ve bu şartlar sonucunda ortaya çıkan sonuçlar

değerlendirilmiştir. Ardından, hava fazlalık katsayısı $\lambda=1.7$ olarak değiştirilmiş ve hava fazlalık katsayısının renksiz dağıtılmış yanma şartlarına olan etkileri araştırılmıştır. Modellemeler Ansys Fluent Student Edition yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys Fluent yazılımında üç boyutlu sayısal modelleme için Species Transport yanma modeli ve P-1 radyasyon modeli seçilmiştir. Yanma reaksiyonları için GRI-MECH 3.0 kullanılmış, burada 64 basamaklı bir kimyasal reaksiyon oluşturulmuş ve Eddy Dissipation Concept modeline entegre edilerek modellemeler gerçekleştirilmiştir. Model ve reaksiyon sonucu doğrulaması için önceki modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapılmış ve uyum tespit edilmiştir. 10 kW ısı gücü (yaklaşık 70 MW/m³.atm ısı yoğunluk) sınır şartlarında modellemeler gerçekleştirilmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılması için yakıt hava karışımı içerisindeki havanın oksijen konsantrasyonu sırasıyla %21 O₂ (konvansiyonel yanma), %19 O₂, %17 O₂ ve %15 O₂ olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için seyreltici olarak N₂ seçilmiştir (yanma sonu ürünlerinin resirkülasyonunun temsili için). Sonuçlar irdelendiğinde, renksiz dağıtılmış yanma ile, özellikle gaz türbinlerinin ve/veya uçak motorlarının yanma odaları için oldukça önemli olan daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilirken CO₂, NO_x ve CO emisyonlarında önemli derecede azalmalar gözlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelimler ve yatırımlar artmaktadır. Ancak, Dünya enerji ihtiyacının büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Ulaşımında kullanılan araçların enerji ihtiyacını karşılamak için akaryakıtların, konutların ısıtılmasında doğalgazın veya kömürün ya da elektrik üretiminde neredeyse tüm fosil yakıtların kullanıldığı unutulmamalıdır. 2019 yılında Stanford üniversitesinin yaptığı bir araştırmaya göre [1] enerji kaynaklarının bulunmuş rezervlerinden petrolün 2050'li, doğalgazın 2060'lı ve kömürün ise bu yüzyılın sonlarında tükeneceği değerlendirilmektedir. Kullanılan fosil yakıtların enerji kapasitelerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğundan daha yüksek oldukları da bilinmektedir. [2]. Tükeneceği güne kadar kullanılmaya devam edilmesi yüksek ihtimal olan bu kaynaklardan enerji üretmenin de önemli maliyetleri bulunmaktadır. Ancak günümüzde maliyetlerden daha önemlisi ise çevresel faktörler ve bunların sonucu küresel ısınmaya olan olumsuz etkileridir. Fosil yakıtların kullanılması sonucu açığa çıkan CO, CO₂, NO_x, SO_x vb. emisyonlar, çevresel kirlenmeye ve küresel ısınmaya etki etmektedir [3]. Bu sebeple fabrikaların, enerji santrallerinin, araçların bile baca gazı emisyonları (egzoz) düzenli olarak kontrol edilmekte ve emisyonları azaltmak amaçlı çalışmalar yapılmaktadır.

Küresel ısınmanın ve fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan emisyonların kısa vadede etkileri toprak ve çevre kirliliği olsa da asıl problem uzun vadede oluşturduğu etkilerdir. Bunların da en önemlileri kuraklık, çölleşme, sel ve asit yağmurlarıdır [4]. Dünyadaki yaşamı etkileyebilecek bu etkilerin tehlikelerini azaltmak için bilim insanları yanma sonu emisyonları düşürebilmek adına bilimsel çalışmalar yapmaktadırlar. Çalışmalardan bazıları şöyle değerlendirilebilir. HITAC (High Temperature Air Combustion) yüksek sıcaklıkta havanın yakılması anlamında olan bu yanma şeklinde yanma işlemi büyük hacimde, neredeyse tüm yakıcı hacmine yayılarak gerçekleşmektedir. Yanma işleminde kullanılan yüksek sıcaklıklı ve oldukça düşük oksijen konsantrasyonlu hava kullanılmakta, bu sayede hacimsel yanma ile birlikte alevsiz yanma başarılarak yanma sonu kirlenici emisyonlar azaltılabilmektedir [5]. MILD (Moderate or Intense Low Dilution) hem reaktanların yüksek sıcaklığı hem de yanma sürecinde düşük sıcaklık artışı ile karakterize edilmektedir [6]. FLOX (Flameless Oxidation) alevsiz yanma, yüksek bir dahili baca gazı devridaimi ile büyük bir hacme aktarılmaktadır. Bu teknoloji diğerlerinde de olduğu gibi çok düşük kirlenici emisyonların başarılmasına olanak sağlamaktadır [7]. CDC (Colorless Distributed Combustion) [8] renksiz dağıtılmış yanma, yanma odasına giren havanın bünyesinde bulunan O₂ konsantrasyonunun azaltılması ile başarılan ve bu sayede daha uniform bir sıcaklık dağılımı ile birlikte kirlenici emisyonların önemli ölçüde azaltıldığı yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Geleneksel alevli yanma sırasında yüksek NO_x seviyeleri ortaya çıkarken, renksiz dağıtılmış yanmada alevin görünürlüğünün ve dolayısıyla da yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ile birlikte oldukça düşük NO_x seviyelerinin başarıldığı gözlenmiştir. Örneğin, Karyeyen vd. [9] 300K giriş sıcaklığı altında renksiz dağıtılmış yanmanın şartlarının uygulandığı, hidrojen bakımından zengin yakıtlar üzerinde çalışma yapmışlardır. Renksiz dağıtılmış yanmanın OH* ışıltama görüntülerinin yanı sıra kirlenici NO_x ve CO emisyonlarına olan etkilerini de araştırmışlardır. Seyrelticilerin karışıma

eklenmesi ile birlikte OH* seviyelerinin, NO_x ve CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı yakıt incelenmiş ve seyreltici olarak CO₂ ve N₂ kullanılmıştır.

Khalil ve Gupta [10] çalışmalarında kullandıkları yakıtın içerisine hidrojen ekleyerek hidrojen zengin yakıt elde etmişlerdir ve hidrojen zenginleştirme işlemi ile CO emisyonunda dikkate değer bir azalma sağlandığı ve tutuşma sınırının da genişlediği tespit edilmiştir. Çalışmalarında kullandıkları dağıtılmış yanma yöntemi sayesinde geliştirilmiş alev yapısı, ultra düşük emisyonlar ve verimliliği artırmak için yüksek yoğunluklu düşük oksijen konsantrasyonlu koşullar altında önemli faydalar sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Yu vd. [11] alevsiz yanma şartları altında hidrojen bakımından zenginleştirilmiş yakıtları incelemişler ve farklı yakıtları farklı hidrojen oranları için araştırmışlardır. Hidrojen bakımından zenginleştirilmiş olan yakıtın yanması sonucunda NO_x oluşumunu azaltmak için alevsiz yanmanın büyük ölçüde katkı sağladığını belirlemişlerdir. Yanma sonucunda ise NO_x ve CO emisyonlarının sıfıra çok yaklaştığı görülmüştür.

Derudi vd. [12] yaptığı çalışmada geleneksel yakıtların aksine geleneksel olmayan yakıtlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Kok fırını gazı olarak isimlendirilen yakıtın hidrojen içeren halinde verimli bir yanmaya olanak sağladığı görülmüştür. Hidrojen içeren yakıtlarda jet hızının daha yüksek olması gerektiği ve fırın sıcaklıklarının daha düşük ortalamalarda çalışabilmesi için yanma havasının ön ısıtmasını azalmasının sağlandığı belirlenmiştir.

Khalil ve Gupta [13] bu çalışmada renksiz dağıtılmış yanmanın ultra düşük emisyon, alev kararlılığı ve termal alanın daha homojen olması üzerindeki etkilerini göstermiştir. Kullandıkları üç farklı yakıtta dağıtılmış yanma şartlarının etkilerini araştırmışlardır. Yakıt olarak metan kullanıldığında oksijen konsantrasyonu %11 - %13 arasına kadar azaltılabilirken, NO_x emisyonunda %85 azalma gözlenmiştir. Yakıtların sıcaklıkları 300 K ile 750 K arasında değişirken NO_x emisyonunun 1 ppm'den daha az olduğunu göstermişlerdir.

Liv vd. [14] çalışmalarında sayısal ve deneysel olarak MILD koşulları altında metan yakıtını kullanmışlardır. Metana H₂ ilavesinin NO_x emisyonu üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda NO_x emisyonunun önemli ölçüde değişmediğini tespit etmişlerdir.

İlbaş ve Karyeyen [15] model bir yanma odasında birbirinden farklı bileşenlere sahip yakıtları sayısal olarak modellemişlerdir. Modelleme sonucunda ise emisyonları karşılaştırmışlardır. Yanma modeli olarak PDF/Mixture Fraction, radyasyon modeli olarak P-1, türbülans modeli için k-ε kullanılmıştır. Yanma sonuçları incelendiğinde hidrojen zengin yakıtlar için NO_x emisyonlarının daha yüksek olduğu, bu durumun ise ikincil ve seyreltme havası beslenerek aşıldığı belirlenmiştir.

Hashemi vd. [16] simetrik ve ani genişlemeli bir yanma odasında yakıt olarak metan kullanmışlar ve sonucun NO_x emisyonundaki değişimine etkisini incelemişlerdir. Yanma modeli olarak β-PDF, türbülans modeli olarak k-ε kullanılmıştır. Türbülansın artmasıyla NO emisyonu önemli ölçüde azalmıştır. Yanma odası tasarımıdaki hava giriş açısının artırılması da NO emisyonunun azaltılması üzerinde etkili olmuştur.

Yılmaz ve İlbaş [17] yeni bir yanma odası tasarımı geliştirmişlerdir. Bu yanma odasına ise doğalgaz yakıcı bağlamışlardır. Farklı içeriklere sahip yakıtı deneysel olarak yakmışlardır. Yanma sonucunda ortaya çıkan sıcaklık ve emisyon değerlerini, tasarladıkları yanma odasının dikey duvarlarına açtıkları delikler sayesinde ölçmüşlerdir. Sonuçlar incelendiğinde yakıt içerisindeki hidrojen konsantrasyonu artırıldıkça yanma odası sıcaklıkları ve NO_x emisyonlarının yükselme olurken CO ve CO₂ emisyonlarında ise azalmalar görülmüştür.

Çalışmada Şekil-1 ve Şekil-2 de gösterilen yanma odası içerisine, metan-hava karışımly yanabilir bileşen, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarında beslenerek yanma ve emisyon karakteristikleri sayısal olarak araştırılmıştır. Yakıt-hava karışımı, yanma odasına girmeden önce ön karışımly olacak şekilde yanma odasına beslenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma koşullarının başarılması için, hava bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %2 lik değişimleri azaltılarak, %21, %19, %17 ve %15 olacak şekilde karışım oranları belirlenmiştir. Bu işlem için seyreltici olarak N₂ kullanılmıştır. Yanma şartları için hava fazlalık katsayıları λ=1.2 ve λ=1.7 olarak belirlenmiş olup bu hava fazlalık katsayılarının başarılması için gerekli O₂ miktarları seyreltme ile de değiştirilmemiştir. Bu oranlarda, renksiz dağıtılmış yanmanın da etkisiyle yanma hızı yavaşlamış, yanmanın karakteristiğindeki değişiklikler ve yanma sonunda ortaya çıkan emisyonlar üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Çalışmada, özellikle küçük hacimli bir yanma odası tercih edilmiştir. Buradaki temel sebep, hacim küçültülerek gaz türbinlerinin ısı yoğunluk (thermal intensity)

değerlerini temsil edilmesi ve renksiz dağıtılmış yanmanın gaz türbinleri için uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Gaz türbinlerinin çalıştırıldığı ısı yoğunluklar, kullanım alanına göre değişmekle birlikte 20-30 MW/m³.atm değerlerinin üzerinde olup çalışmada kullanılan yanma odasının ısı yoğunluğu, 10 kW'lık ısı gücü de değerlendirildiğinde yaklaşık 70 MW/m³.atm civarında olacak şekilde seçilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada yakıt olarak metan kullanılmıştır. Metanın yanma reaksiyonu ise, daha iyi sonuç verebilmesi için Ansys – Chemkin kullanılarak ekteki tabloda tüm basamakları ile birlikte sunulmuştur. [EK-1]. Yakıt-hava karışımı ön karışimli olarak yanma odasına beslenirken $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları ile hava içerisinde oksijen yüzdesi %21 O₂'den, %19 O₂, %17 O₂ ve %15 O₂ oranlarına azaltılarak renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılmasına olanak sağlanmıştır. Seçilen yanma odası, sınır koşulları, türbülans ve radyasyon modellerinin detayları çalışmanın sonraki bölümlerinde sunulmuştur. Tablo-1'de reaksiyona giren türlerin mol fraksiyon olarak hesaplaması verilmiştir.

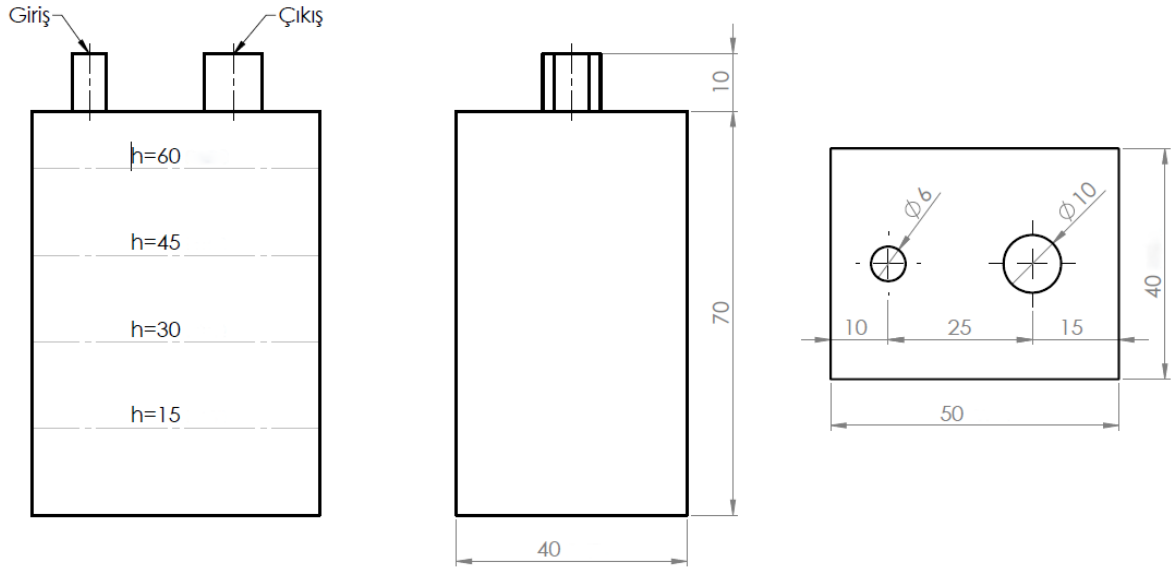
21%O ₂		19%O ₂	
<i>n(mol)</i>	<i>mol fraksiyonu</i>	<i>n(mol)</i>	<i>mol fraksiyonu</i>
1CH ₄	0,080489CH ₄	1 CH ₄	0,0732 CH ₄
2,4O ₂	0,193171O ₂	2,4O ₂	0,1763O ₂
9,024N ₂	0,72634N ₂	10,2315N ₂	0,7505N ₂
n_{Toplam} = 12,424	1	n_{Toplam} = 13,631	1
17%O ₂		15%O ₂	
<i>n(mol)</i>	<i>mol fraksiyonu</i>	<i>n(mol)</i>	<i>mol fraksiyonu</i>
1CH ₄	0,07083CH ₄	1CH ₄	0,0625CH ₄
2,4O ₂	0,17O ₂	2,4O ₂	0,15O ₂
10,7175N ₂	0,75917N ₂	12,599N ₂	0,7875N ₂
n_{Toplam} = 14,117	1	n_{Toplam} = 15,999	1

Tablo 1. Farklı O₂ konsantrasyonları için mol fraksiyonları

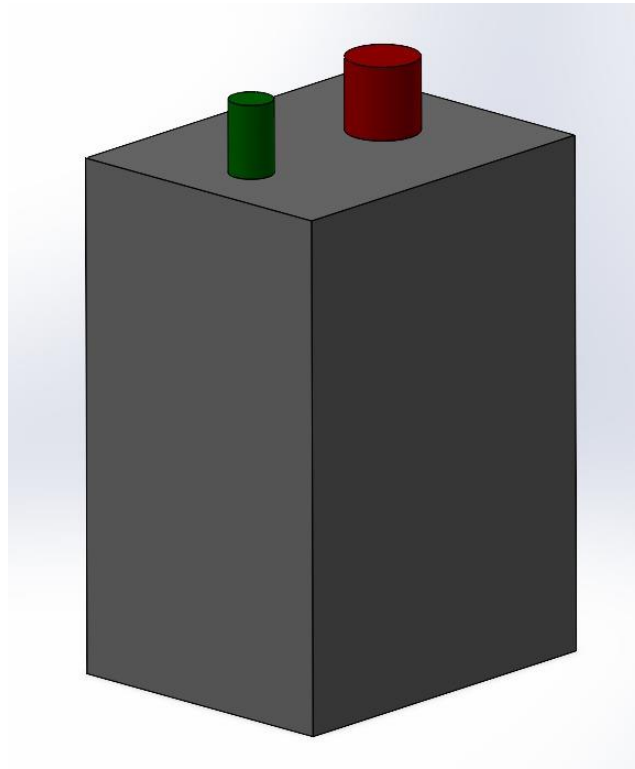
2.1. Yanma Odası

Modellemelerin gerçekleştirildiği yanma odasının teknik resmi ve 3 boyutlu görünüşü Şekil-1 ve Şekil-2'de gösterilmiştir. Yanma odası dikdörtgen bir yapıda olup, uygulamadaki yanma odaları (örneğin gaz türbinleri) için daha silindirik bir yapıda tasarım yapılabilecek olsa da literatür karşılaştırması yapılabilmesi için bu çalışma kapsamında bu tipte bir yanma odasının çalışılmasına karar verilmiştir. Silindirik yapıda bir yanma odasının da modellemesi yapılabilir. Bu durum, sonuçlar kısmında görülecek bölgesel resirkülasyonların önüne de geçebilir.

Yanma odasının 70 mm yüksekliği ve bu yüksekliğe ek 10 mm yakıt girişi ve egzoz çıkış bölümü bulunmaktadır. 3 boyutlu çizimde görüleceği üzere yeşil olarak renklendirilmiş olan yakıt girişi için çap 6 mm ve kırmızı olan çıkış bölümünün çapı ise 10 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Giriş ve çıkış bölümleri, merkezleri arasında 25 mm uzaklık bulunacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Yanma Odası ön (soldaki), yan (ortadaki) ve üst (sağdaki) görünüş teknik resimleri. Teknik resimdeki tüm birimler milimetre (mm) olarak alınmıştır. [18]



Şekil 2. Yanma Odasının İzometrik Görünüşü [18]

Çalışmada kullanılan yanma odası [18], ilgili referansta kullanılan yanma odası ile benzer olup, bu çalışmada ön-karışımli bir geometrik düzenleme yapılmış ve ısı güç artırılarak gaz türbini ve/veya uçak motoru yanma odalarının ısı yoğunluk çalışma değerleri simüle edilmiştir. Giriş ve çıkış kısmı, Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilen şekilde tasarlanan yanma odasının en önemli özelliklerinden birisi de yüksek iç resirkülasyon sağlayabiliyor olmasıdır. Renksiz dağıtılmış yanma şartları, yanma sonu ürünlerinin dış ya da iç resirkülasyonu (alevsiz yanma) ile başarılı olabilirken, bu çalışma ile bu etki hem iç hem de dış resirkülasyon ile araştırılmaktadır. Çalışmada tasarlanan yanma odası [18] referans alınmış, ön karışımli olacak şekilde yeniden tasarlanmış ve yanma hem iç hem de dış resirkülasyonlu (dış resirkülasyon, N₂ ile seyreltme sayesinde simüle edilmektedir) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekillerde de görüldüğü gibi yanma odası dikdörtgen bir prizma şeklinde, hava-yakıt karışımının gireceği ve çıkacağı iki alan haricinde tamamen kapalı olacak şekilde tasarlanmıştır. Genişliği 50 mm derinliği ise 40 mm'dir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisini daha iyi irdeleyebilmek için yanma odasının alt kısmından itibaren farklı yüksekliklerde (h=15mm, h=30mm, h=45mm ve h=60mm) hayali çizgiler üzerinde yanma ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir.

2.2. Sınır Şartları

Çalışmada yakıt olarak metan, seyreltici olarak N₂ oksitleyici olarak da $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları için hava kullanılmıştır. $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısının seçilmesinin temel sebebi, gaz yakıtların genellikle stokiyometrik yanma şartlarından biraz yüksek hava fazlalık katsayılarında (çoğunlukla 1.1 – 1.3) yakılmasıdır. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı sınır şartı ise, hem hava fazlalık katsayısının etkisini gözlemlemek hem de çalışmanın ana amaçlarından birisi olan gaz türbini yanma şartlarını temsil etmektir (gaz türbinleri genellikle daha yüksek hava fazlalık katsayılarında çalıştırılır. Ancak, havanın önemli bir bölümü yanma odasına gönderilmeyerek soğutma amaçlı kullanılır). Tüm modellemeler için ısı güç 10 kW (bu yanma odası ölçüleri için ısı yoğunluk yaklaşık 70 MW/m³.atm) ve giriş sıcaklıkları oda sıcaklığı olan 300K seçilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılması için N₂ seyreltici olarak seçilmiş ve yanma odasına girmeden önce, hava bünyesinde belirlenen yüzdelerde karışımı sağlanmıştır. Bu işlem sırasında, çalışma kapsamında belirlenen $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları için gerekli O₂ miktarları değiştirilmemiş olup, seyreltici ilavesi ile hava bünyesindeki O₂ konsantrasyonu azaltılmış, bu sayede reaksiyon hızı azaltılarak yanmanın tüm yanma odasına daha uniform bir şekilde yayılması hedeflenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkilerini daha iyi anlayabilmek için, yanma odasının altından itibaren belirlenen yüksekliklerde (h=15mm, h=30mm, h=45mm, h=60mm) çizilen hayali çizgilerin olduğu kısımlardaki yanma sonu sıcaklık emisyon karakteristikleri sonuçlarda sunulmuştur.

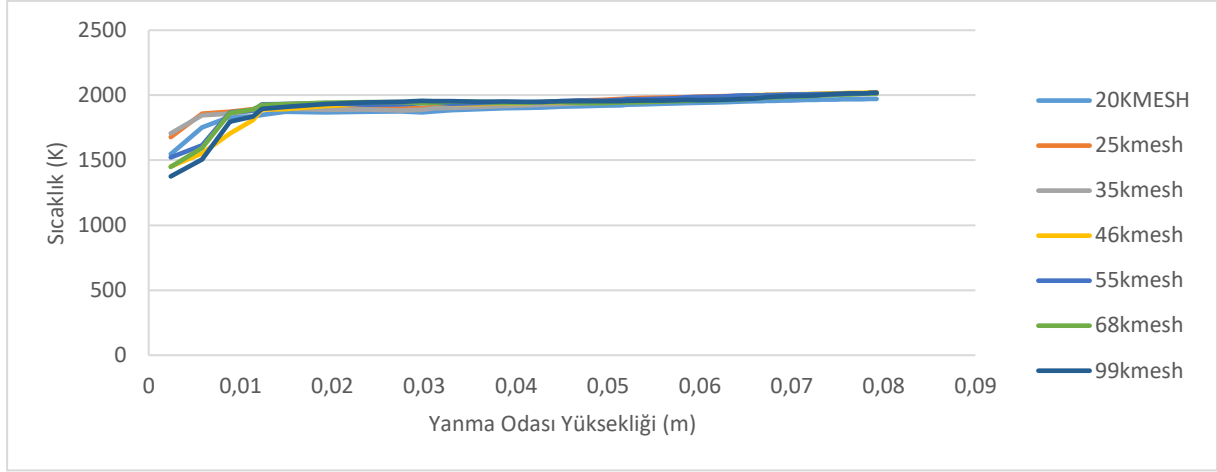
2.3. Modelleme Detayları

Modellemelerin tamamı momentum, kütle, enerji ve türler dahil olmak üzere genel denklemler üzerinden Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı kullanılarak çözümlenmiştir. Yanma modeli için program üzerine varsayılan Eddy Dissipation Concept'e, Chemkin yardımıyla elde edilen GRI-MECH 3.0 reaksiyon basamakları entegre edilmiştir (64 basamak). Türbülans modeli olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Radyasyon modeli için ise 1000 K'den fazla alev sıcaklıklarında hatalı modelleme sonucu almamak için P-1 modeli seçilmiştir. Tüm modellemeler 10 kW ısı güç (yaklaşık 70 MW/m³.atm'lık ısı yoğunluk) için yapılmıştır. $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ için elde edilen hesaplama sonuçları Tablo-1' de detaylı olarak gösterilmiştir.

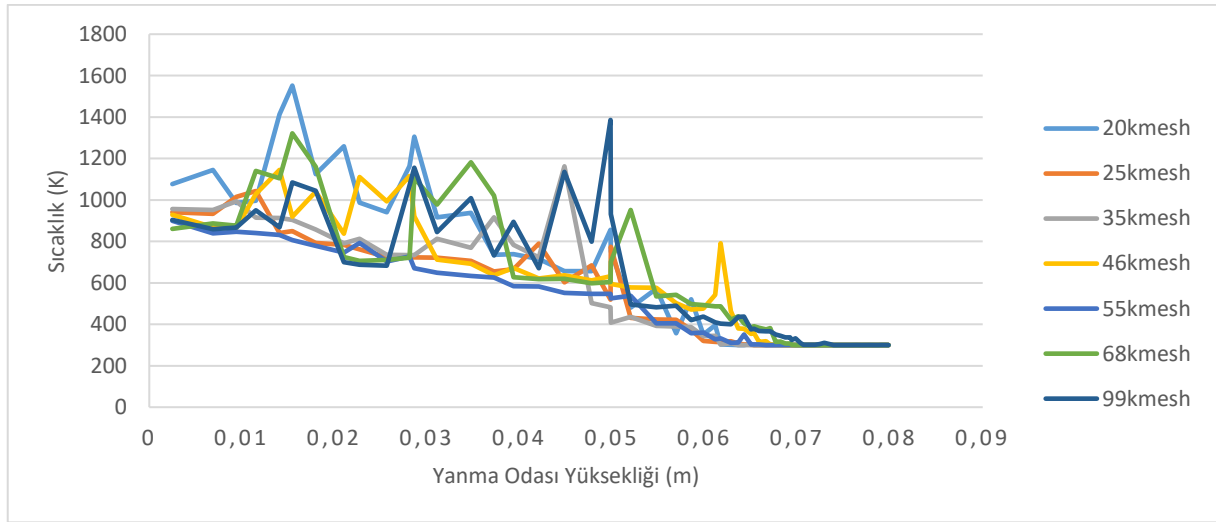
3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

3.1. Ağ Sayısından Bağımsızlaştırma

Modelleme yapılırken gereksiz fazla ağ yapısı ile çalışmak, hem modellemenin yapıldığı bilgisayar gücü açısından sorun olabilmekte hem de zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle de genellikle modelleme çalışmalarında ağ yapısından bağımsızlaştırma yapmak işlemleri daha kolaylaştırmakta ve devam eden modellemeler için zaman kazandırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada da yedi farklı ağ yapısı ile modellemeler gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısından bağımsızlaştırma yapılırken 20000, 25000, 35000, 46000, 55000, 68000 ve 99000 ağ sayılı ağ yapıları kullanılarak ayrı ayrı modellemeler gerçekleştirilmiş ve yanma odası alt kısmından yanma odasına kadar ve yanma odası girişinden yanma odası alt kısmına kadar olan sıcaklık değişim profilleri Şekil 3 ve Şekil-4'te karşılaştırılmıştır. Bu modellemeler sonucunda 55000 ağ sayılı ağ yapısının uygun ve yeterli olacağına karar verilmiştir.



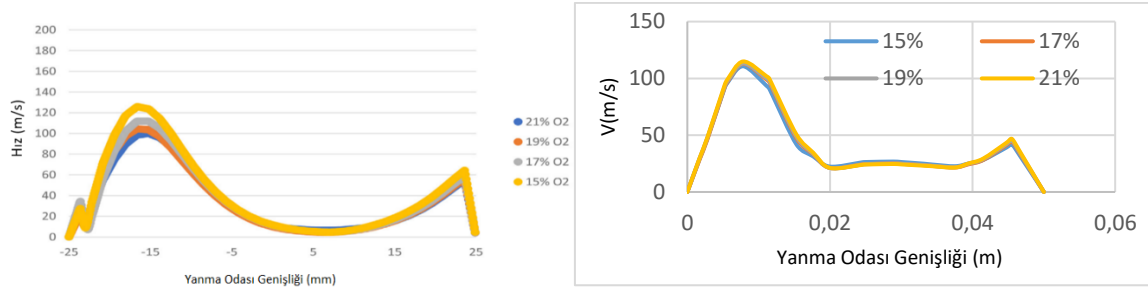
Şekil-3. Yanma Odası Alt Kısmından Çıkış Bölgesine Doğru Ağ Sayısının Etkisi



Şekil-4. Giriş Bölgesinden Yanma Odası Alt Kısmına Doğru Ağ Sayısının Etkisi

3.2. Modelin Doğrulanması

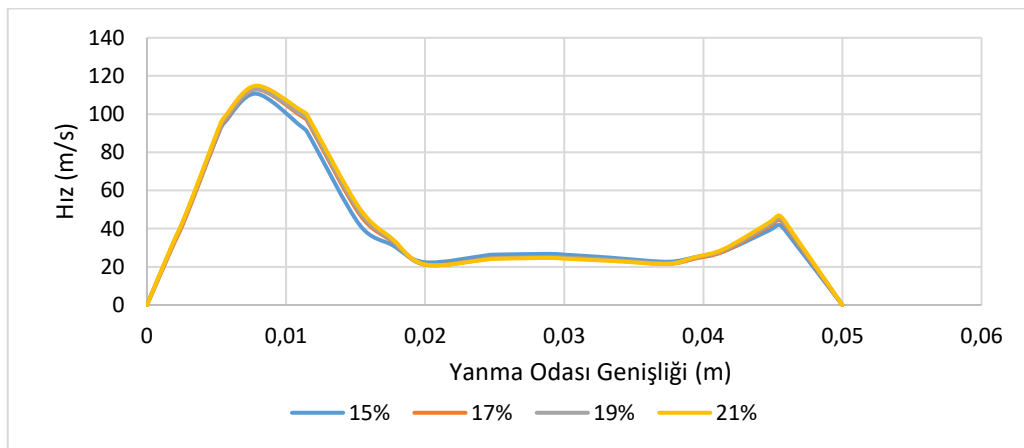
Yanma modellemelerine başlanmadan önce, daha önce yapılmış aynı ya da benzer deneysel ve/veya sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapmak, yapılacak modellemelerin doğrulanması için esastır. Bu amaçla Ilbas vd. [19] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada (bu çalışmada benzer bir yanma odası kullanılmıştır) elde edilen modelleme sonuçları ile bu çalışmadaki modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde yanma ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız dağılım profillerinin birbirine oldukça benzediği, ancak, değerler açısından değerlendirildiğinde ise mevcut çalışma için hız değerlerinin biraz düşük olduğu görülmektedir. Buradaki farklılığın temel nedeninin ise Ilbas vd. [19] tarafından yapılan çalışmadaki yanma odasının ön-karışimsız, mevcut çalışmada kullanılan yanma odasının ise ön karışimli yanma odası olması ve bu nedenle yanma odası içerisindeki jet momentumlarının az da olsa farklı olmasıdır.



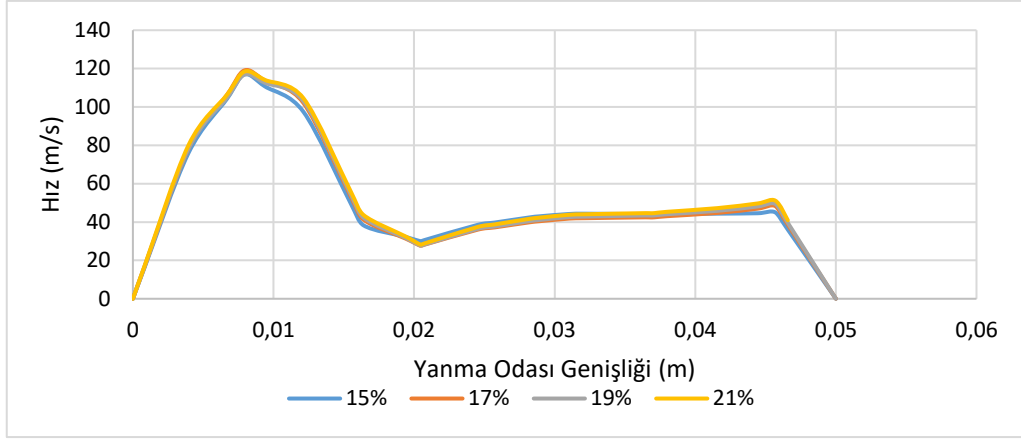
Şekil-5. Referans çalışma (soldaki) [19] ile mevcut çalışma [sağdaki] modelinin doğrulanması

3.3. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

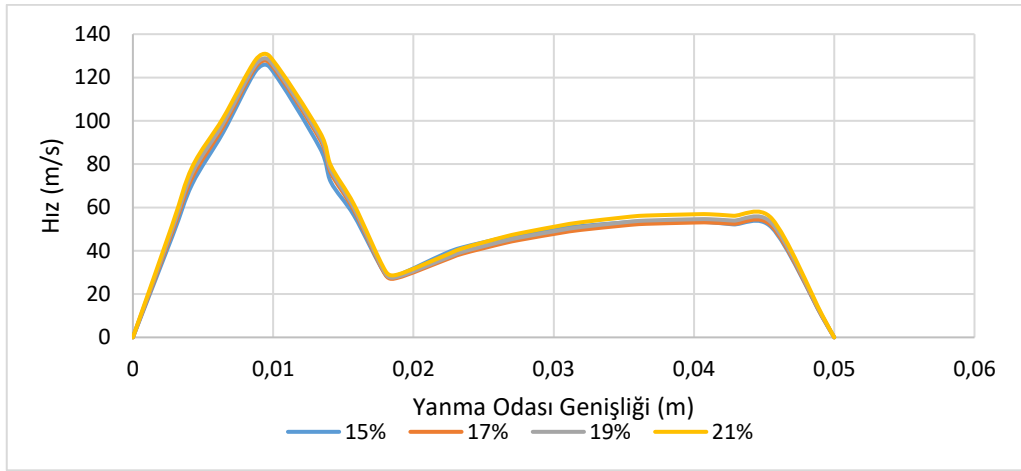
Hava fazlalık katsayısının $\lambda=1.2$ olarak alınması ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarının uygulanması sonucu elde edilen bulguların ilkinde yanma sonu ürünlerinin yanma odasındaki dağılımları için hız modelleme sonuçları, farklı yükseklikler için ($h=15$ mm, $h=30$ mm, $h=45$ mm ve $h=60$ mm) Şekil 6 ila Şekil 9'da sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, yanma odası giriş kesitine denk gelen 0.01 m genişlikte hız profillerinin değerleri daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Yanma odasının orta bölümlerine ilerlendikçe (0.02 m – 0.04 m), yanma sonu ürünleri çıkışa doğru ilk döngüden dolayı hız profillerinin değerleri, tüm oksijen konsantrasyonları için azalmıştır. Ardından, yanma odası çıkışına doğru yönelen yanma sonu ürünlerinin hızları, yanma odası yüksekliği arttıkça tekrar artarak yanma odasını terk etmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma şartları için hız profilleri değerlendirildiğinde, yanma odası giriş ve çıkış kısımlarında önemli sayılabilecek bir değişiklik olmamıştır. Yanma sonu ürünlerinin hız profillerini daha iyi anlamak için Şekil 10'da hız konturları gösterilmiştir. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu azaldıkça (seyreltici beslendikçe), Şekil 10'da soldan sağa doğru hız değerlerinin arttığı, özellikle de yanma odası çıkış bölgesinde görülmektedir. Şekil 10'da ayrıca, yanma odası çıkış bölgesinde, yanma sonu ürünlerinin bir kısmının, yüksek iç resirkülasyon nedeniyle yanma odası içerisinde doğru resirküle oldukları da anlaşılmaktadır. İç resirkülasyon ile renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasına katkı sağlanmaktadır.



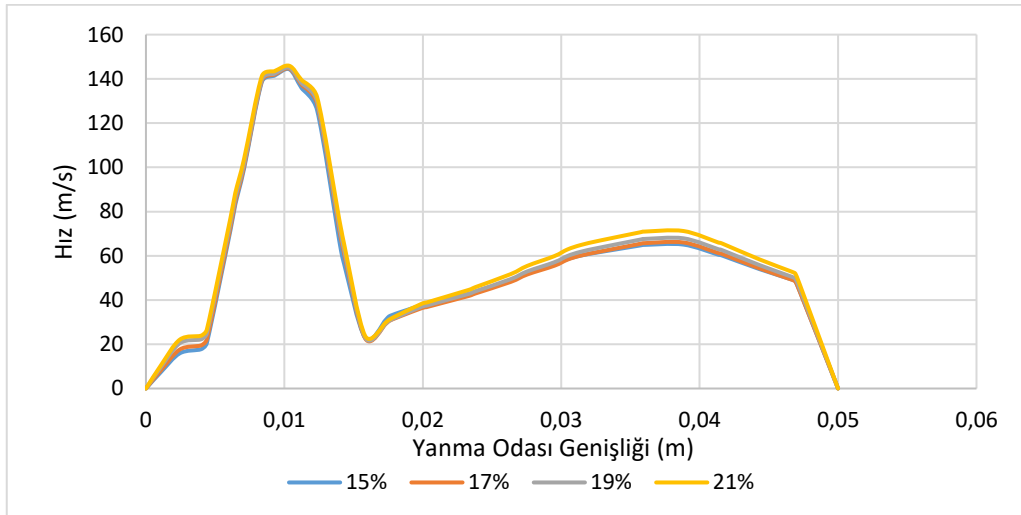
Şekil-6. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



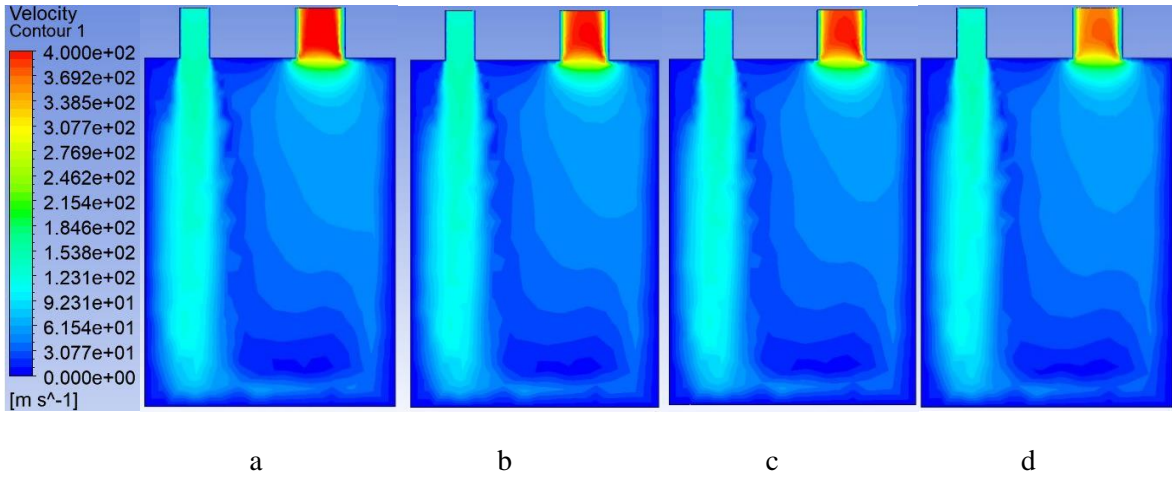
Şekil-7. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil-8. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



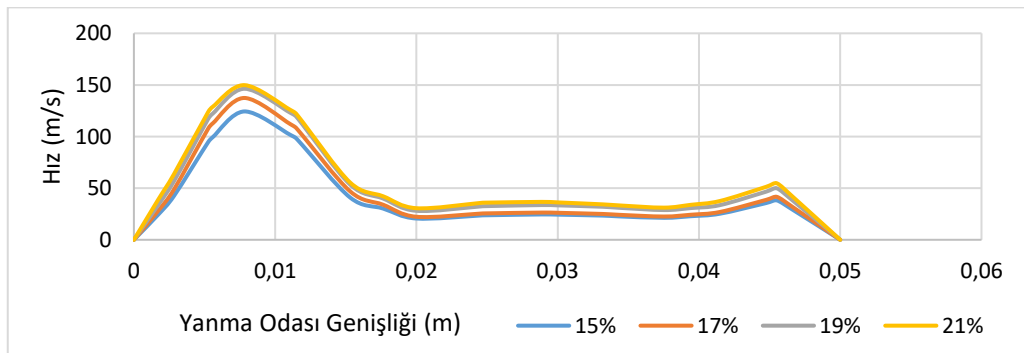
Şekil-9. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



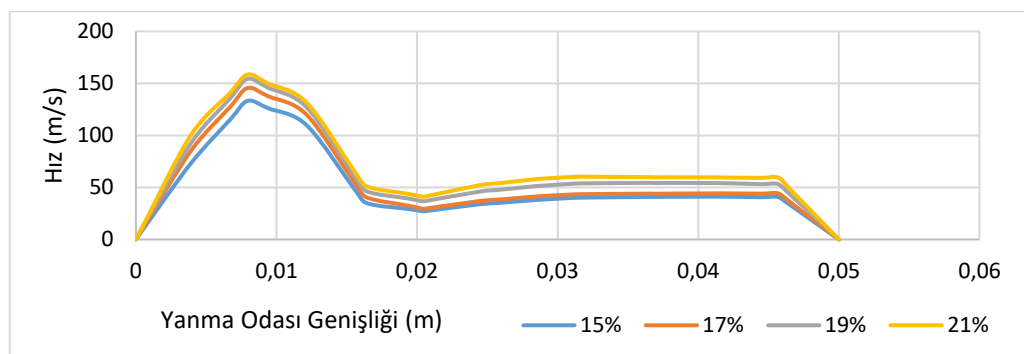
Şekil-10. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

3.4 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

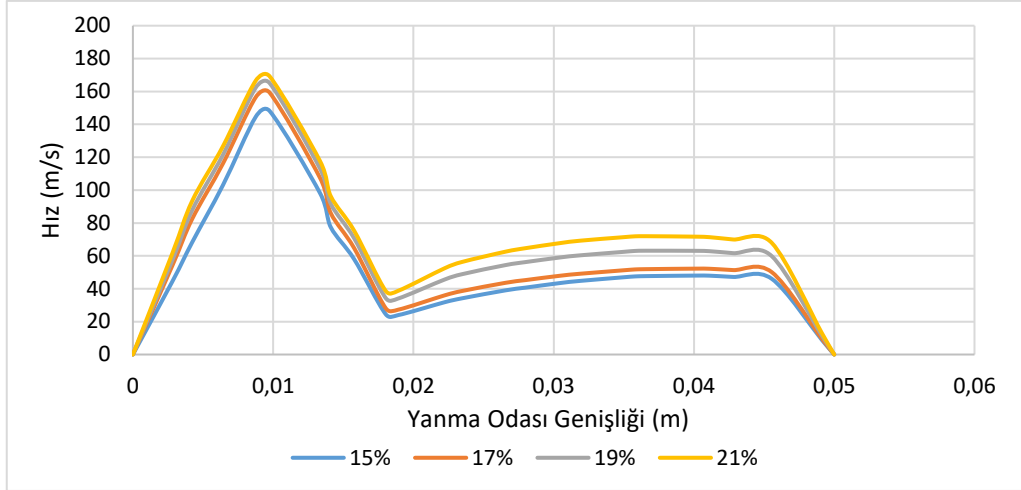
Hava fazlalık katsayısını artırıp, renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulandığında ve elde edilen bulgular yeniden değerlendirildiğinde, yanma odası içerisinde tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin hızlarında, analiz edilen her yükseklik için artışlar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 11 ila Şekil 14). Bu durumun temel nedeninin yanma odasına gönderilen hava-yakıt karışımının debisinin artırılmış olduğu değerlendirilmektedir. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında ise, seyreltici beslenmesinin de etkisiyle yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız değerlerinde belirgin bir artış olmuştur. Şekil 15'te ise yanma sonu ürünlerinin hız profilleri sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisinin yanı sıra iç resirkülasyon etkileri de Şekil 15'te gösterilen yanma sonu ürünlerinin hız konturlarından anlaşılmaktadır.



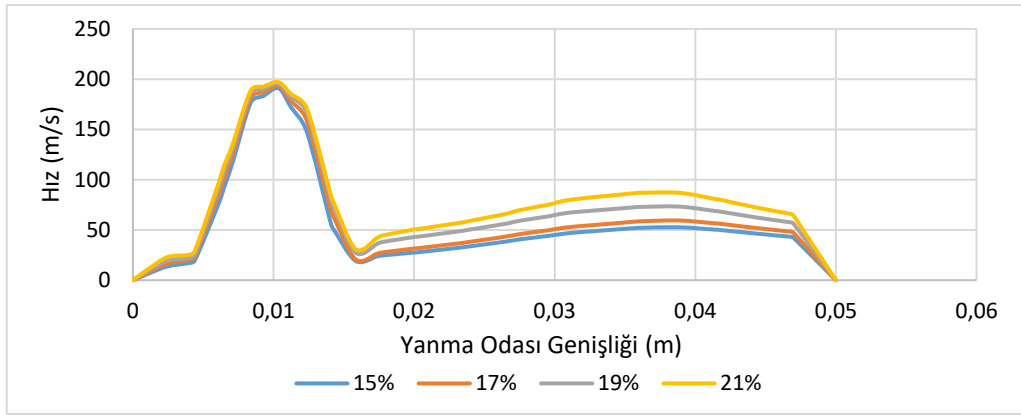
Şekil-11. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



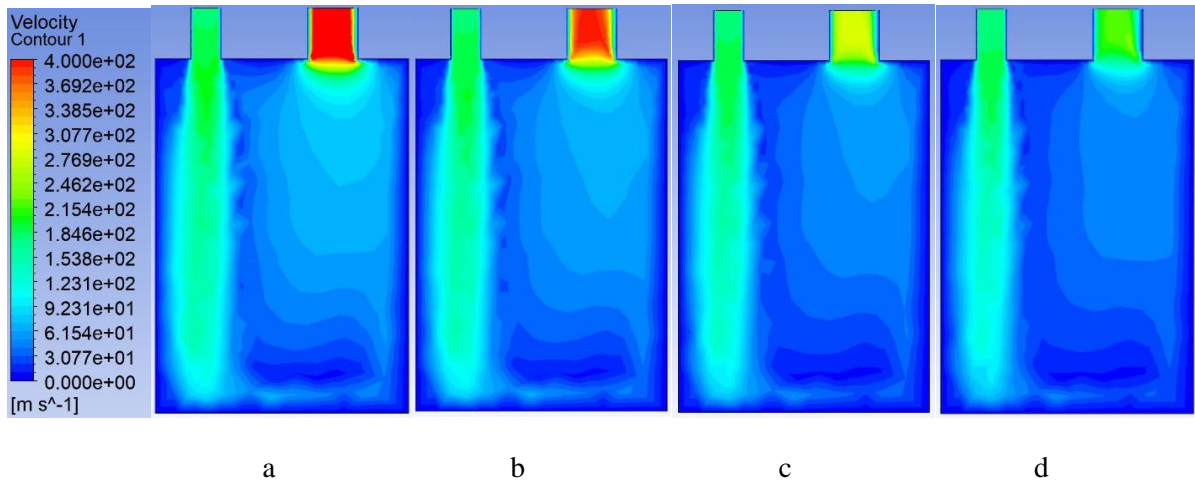
Şekil-12. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil-13. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



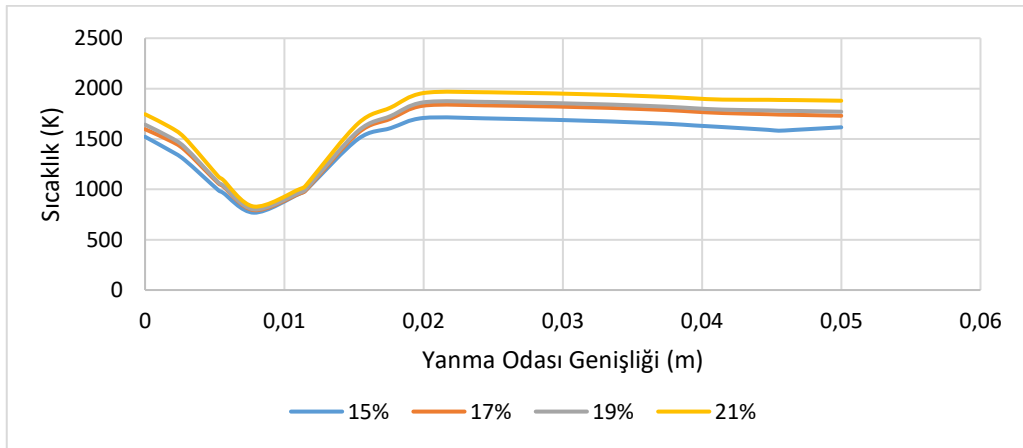
Şekil-14. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



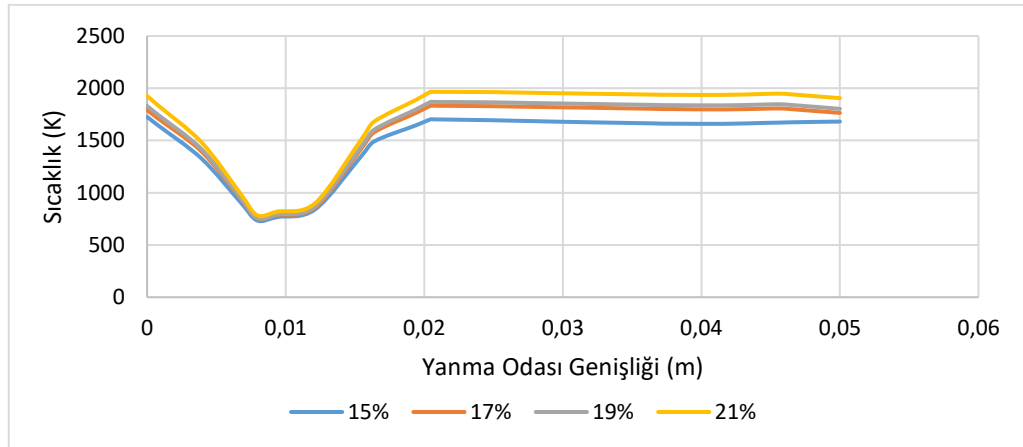
Şekil-15. $\lambda=1.7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

3.5 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları

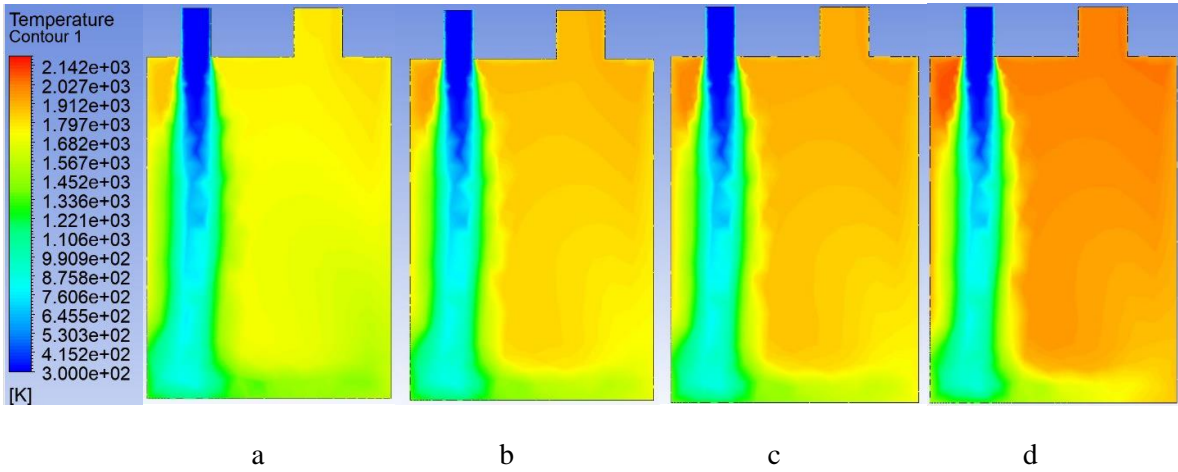
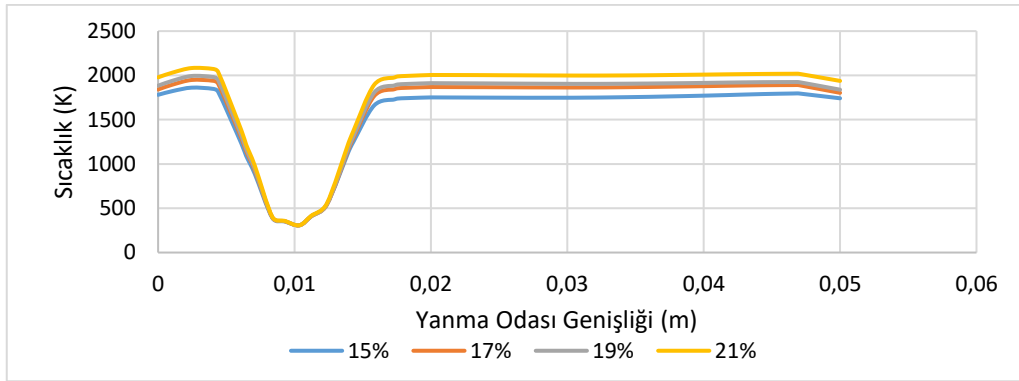
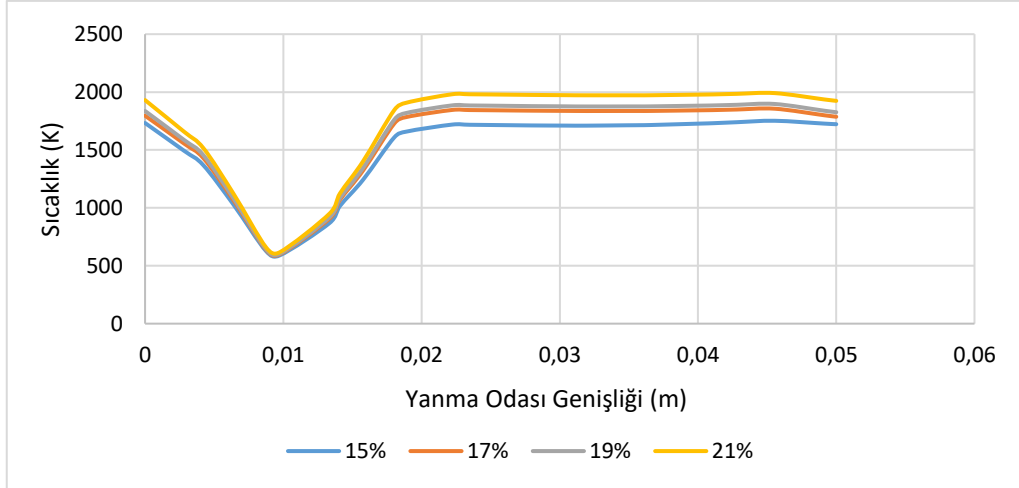
Modellemeler sonucu tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları bu bölümde sunulmuştur. Şekil 16 ila Şekil 19'da farklı yüksekliklerdeki yanma odası genişlikleri boyunca sıcaklık profilleri, konvansiyonel (%21 O₂) ve renksiz dağıtılmış yanma şartları için gösterilmiştir. Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde, yanma odasının tamamı için, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe sıcaklık değerlerinin bir miktar düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumun temel sebebinin, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılabilmesi için yanma odasına beslenen azot seyrelticisinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık değerlerinin, beklenmedik şekilde düşmemesini sağlayan en önemli etken ise, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılırken, stokiyometrik olarak hesaplanan ve gerekli olan, hava bünyesindeki oksijen miktarının değiştirilmemesidir. Burada sağlandığı görünen en temel durum, yanma hızının yavaşlatılması ve yanmanın yanma odasına daha efektif bir şekilde yayılımının başarılmasıdır. Bu sonuç, yanma sonu ürünlerinin sıcaklık konturlarının gösterildiği Şekil 20'den daha da iyi anlaşılmaktadır. Şekil 20'de konvansiyonel yanma (en sağdaki) neticesinde elde edilen sıcaklık konturunda, yanma odasının farklı bölgelerinde bazı farklı sıcaklık değerli bölgeler oluşurken, oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonunun azaltılması neticesinde yanma, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına doğru geçmeye başlamış (sağdan sola) ve %15 O₂ içeren oksitleyici için yapılan modelleme sonuçlarına göre sıcaklık dağılımı oldukça uniform bir görüntü çizmiştir. Bu sonuca göre renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu anlaşılmakla birlikte, kirletici emisyon seviyelerine de bakmak ve onların sonucuna göre değerlendirmek daha doğru olacaktır. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu, alevin sürdürülebilirliği noktasında sorun teşkil edebileceğinden %15'in altına indirilmemiştir.



Şekil-16. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri

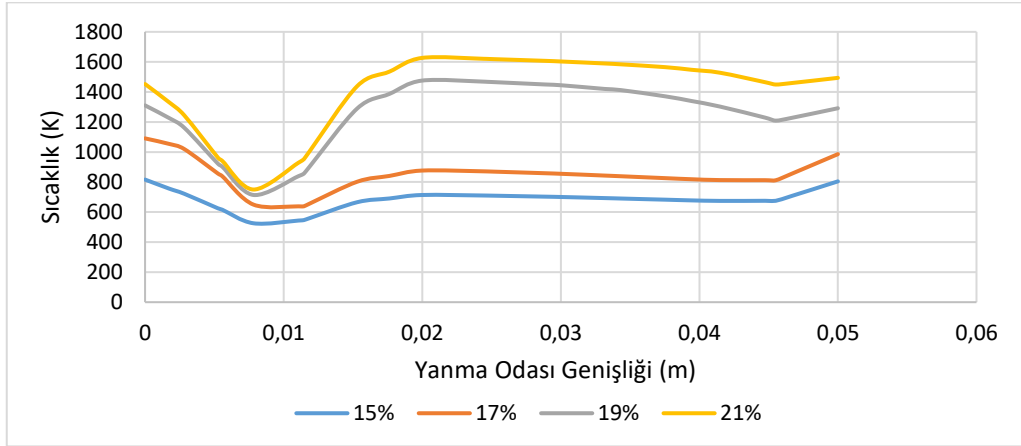


Şekil-17. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri

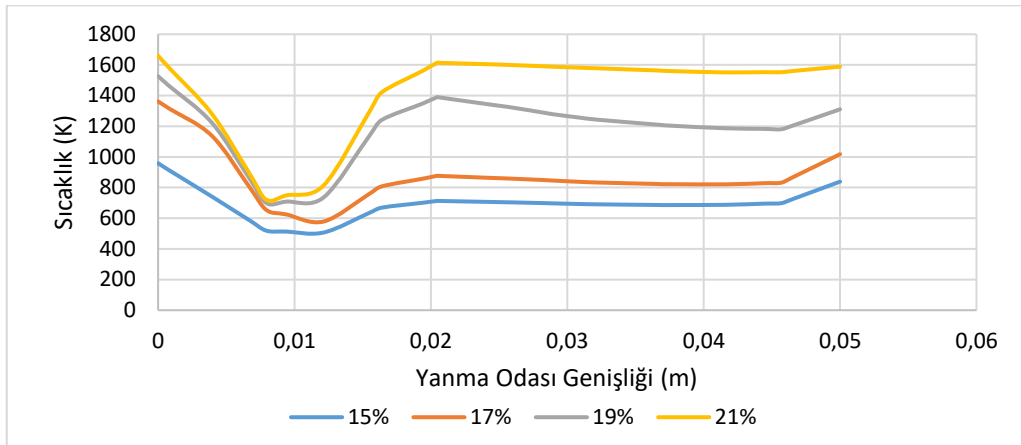


3.6 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık

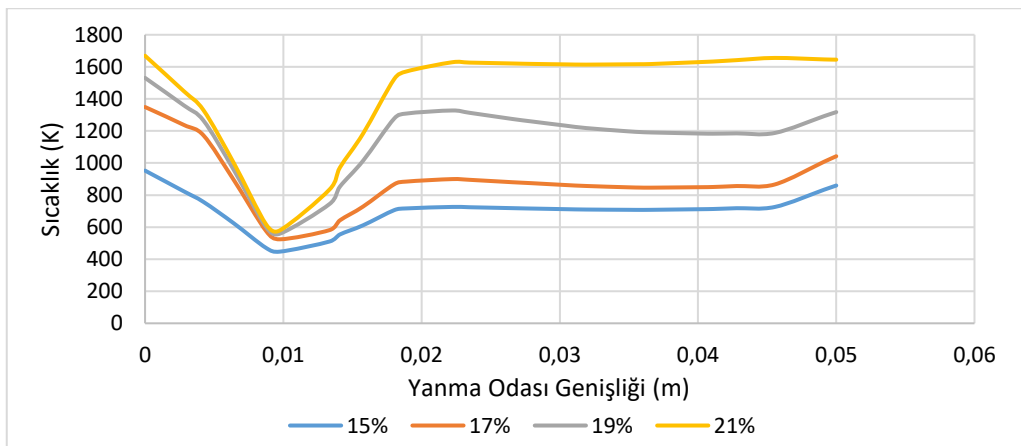
Şekil 21 ila Şekil 24'te 1.7 hava fazlalık katsayısı için tüm yanma şartlarındaki yanma sonu ürünlerinin sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe yanma hızı yavaşlatılmış ve yanmanın tüm yanma odasına yayılımı sağlanmıştır. Bu sonuç Şekil 25'ten de anlaşılmaktadır. Sıcaklık seviyelerinin, bir önceki bölümde sunulan ($\lambda=1.2$) sıcaklık seviyelerinden daha düşük olması, yanma sonu ürünlerinde daha fazla azot bulunmasıdır.



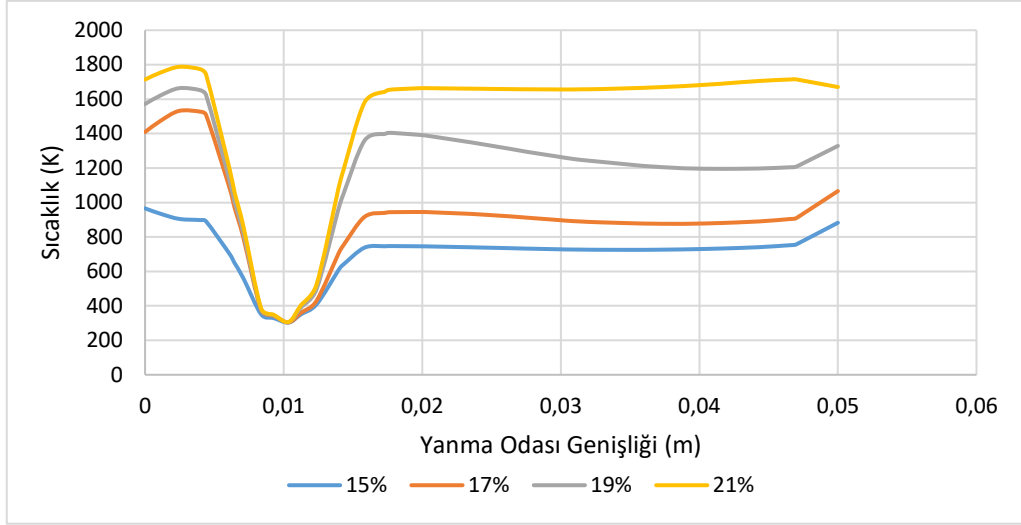
Şekil-21. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



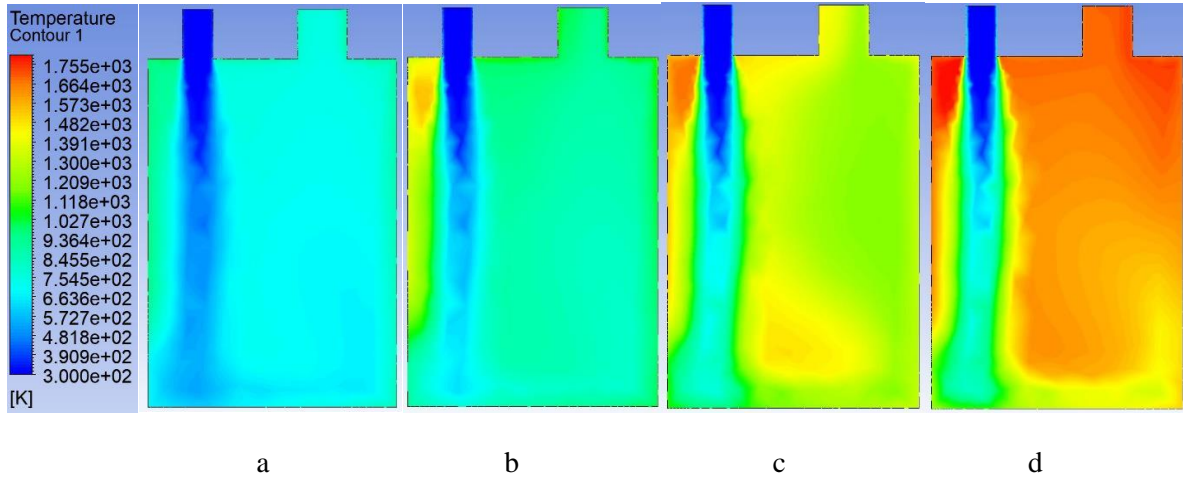
Şekil-22. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil-23. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil-24. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



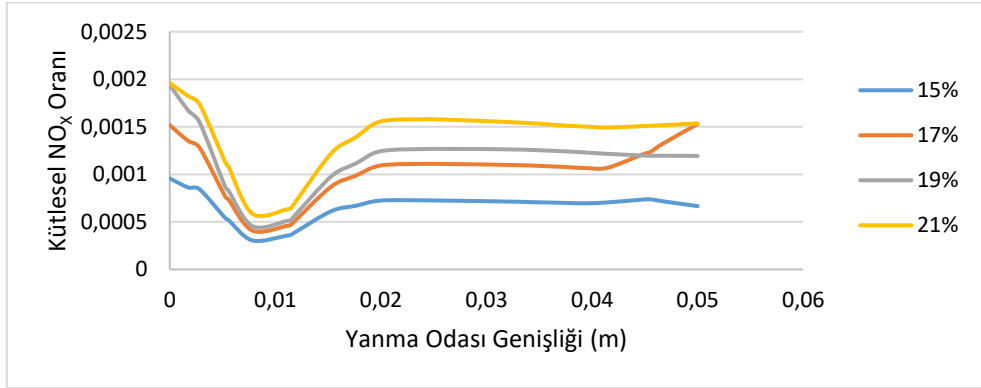
Şekil-25. $\lambda=1.7$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği

Şekil 16 ila Şekil 19 ve Şekil 21 ila Şekil 24 incelendiğinde, yanma odası tüm yükseklik grafikleri için yanma odası genişlik değerinin 0 olduğu bölgedeki sıcaklık değerleri genel olarak yüksektir. Öyle ki, bazı grafiklerde bu değer, yanma odası içerisinde elde edilen en yüksek sıcaklık değerinden daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Bu durumun temel nedeni, hem ön karışımli alev yapısının, yanabilir karışımın merkezinden etrafına doğru alev yapısı oluşturması hem de yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odası kullanımı ile yanma sonu ürünlerinin yanabilir yakıt-hava karışımına doğru resirküle edilmesidir.

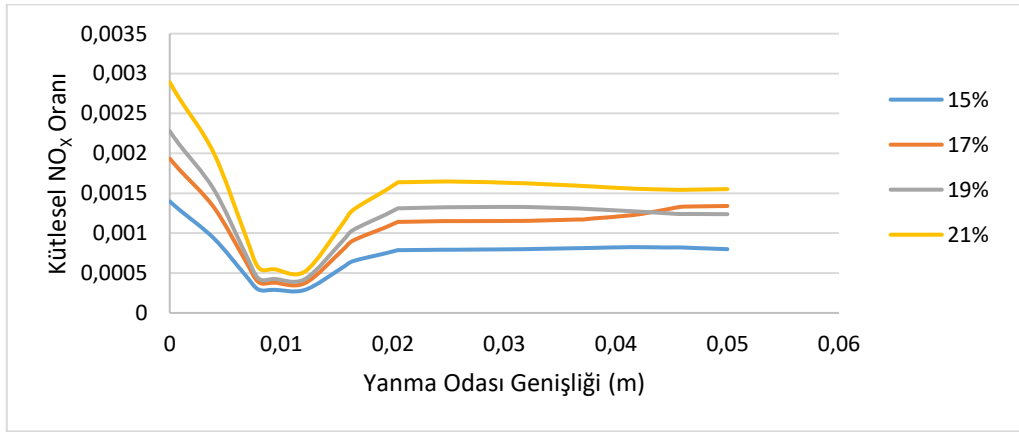
3.7 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

Renksiz dağıtılmış yanmanın önemli başarı kriterlerinden biriside, renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması, bu sayede, yanma odası içerisinde gelişmesi muhtemel, bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasının engellenmesi ve bunun sonucunda da yanma sonu NO_x kirlenici emisyonlarının önemli derecede azaltılmasıdır. Buradaki ana kriter, ısıl NO_x oluşumunun önemli ölçüde baskılanmasıdır. Şekil 26 ila Şekil 30 yanma sonu NO_x kirlenici emisyon profillerini ve NO_x konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli NO_x oranlarının konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılıdır. Kütleli NO_x oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Önceki bölümde verilen sıcaklık profilleri ile NO_x profilleri karşılaştırıldığında ise, önemli sayılabilecek düzeyde benzerlik bulunmaktadır. Isıl NO_x' un, özellikle 1000 K sıcaklıkların üzerindeki sıcaklıklarda daha baskın hale gelmeye başladığı

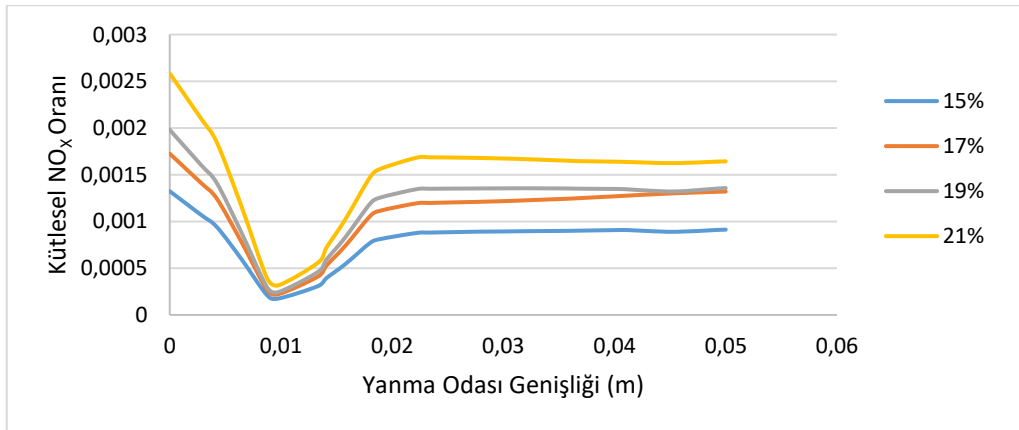
düşünüldüğünde, NO_x oluşum seviyelerinin, 0.01 m'lik yanma odası genişliğinde 0 değerlerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.



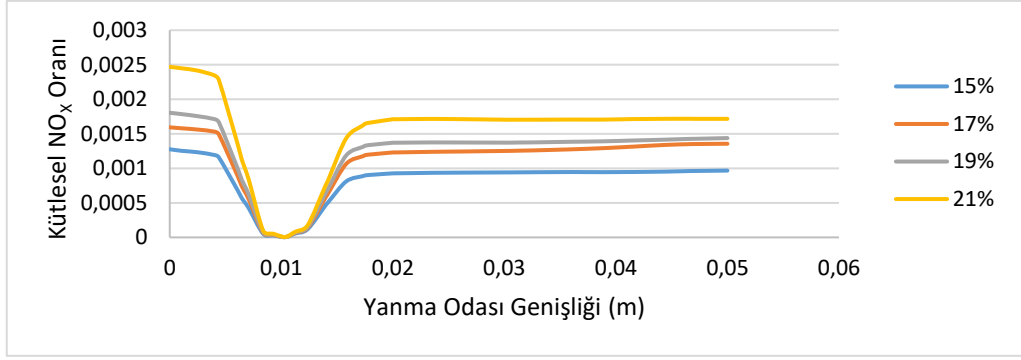
Şekil-26. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



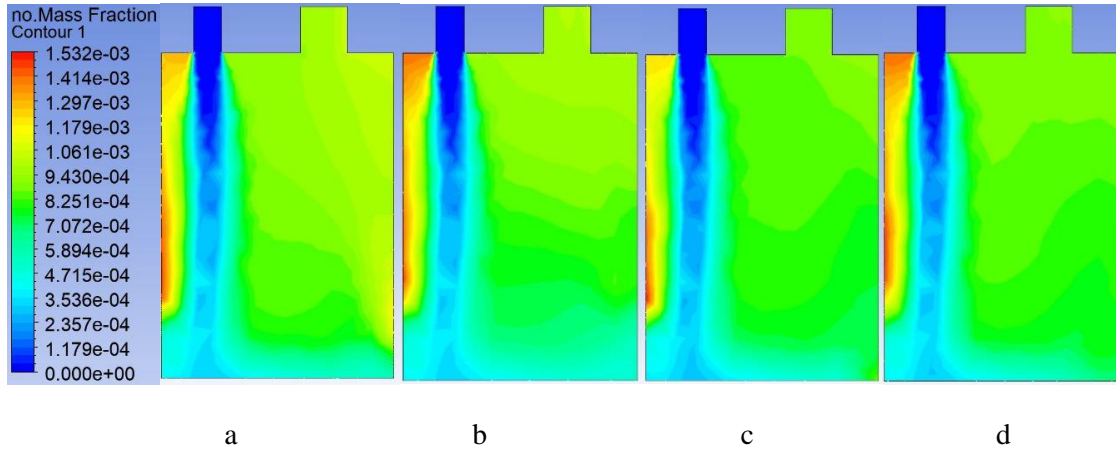
Şekil-27. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil-28. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



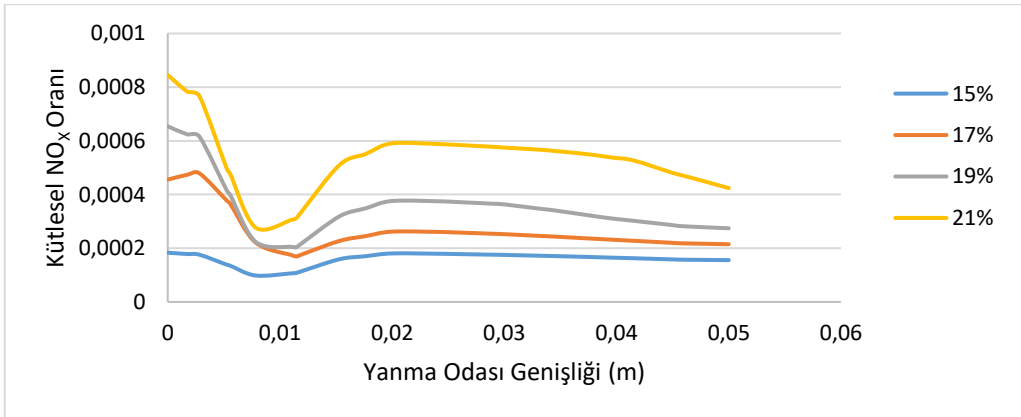
Şekil-29. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



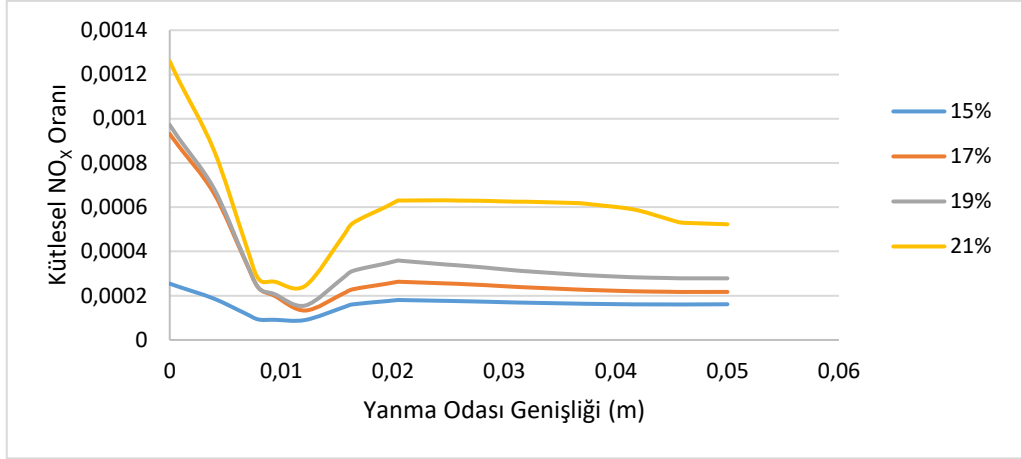
Şekil-30. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

3.8. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

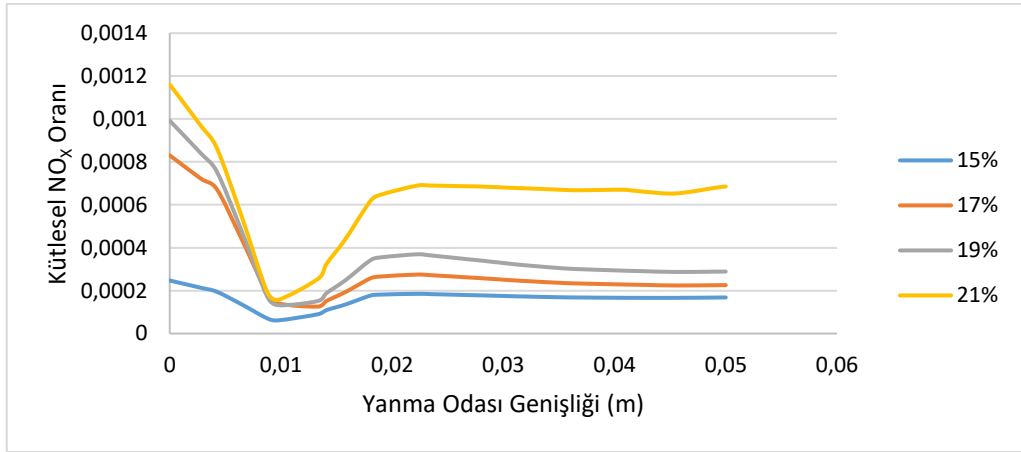
Yanma sonu NO_x kirlenici emisyonlarına hava fazlalık katsayısının artırılma etkileri bu bölümde incelenmiş ve tahmin sonuçları Şekil-31 ile Şekil-35 NO_x profil grafiklerinde ve konturlarında sunulmuştur. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı için yapılan modelleme tahmin sonuçlarına göre, $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen kütleli NO_x oranlarının daha da azaldığı tespit edilmiştir. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen sıcaklık tahmin sonuçları ile paralel profillerin, yanma hızının azaltılması ve buna bağlı olarak bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılmasıyla, oluştuğu ve bunun sonucunda oksitleyici bünyesindeki oksijen oranı azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarıldığı tahmin edilmiştir.



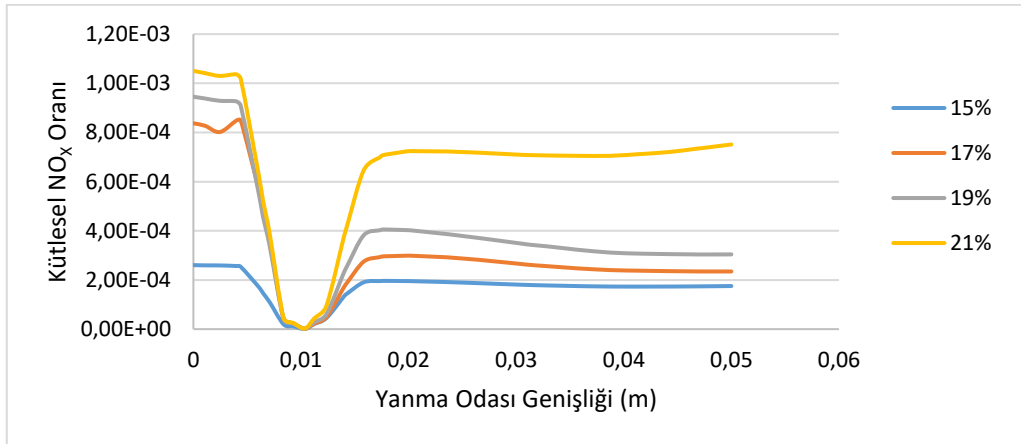
Şekil-31. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



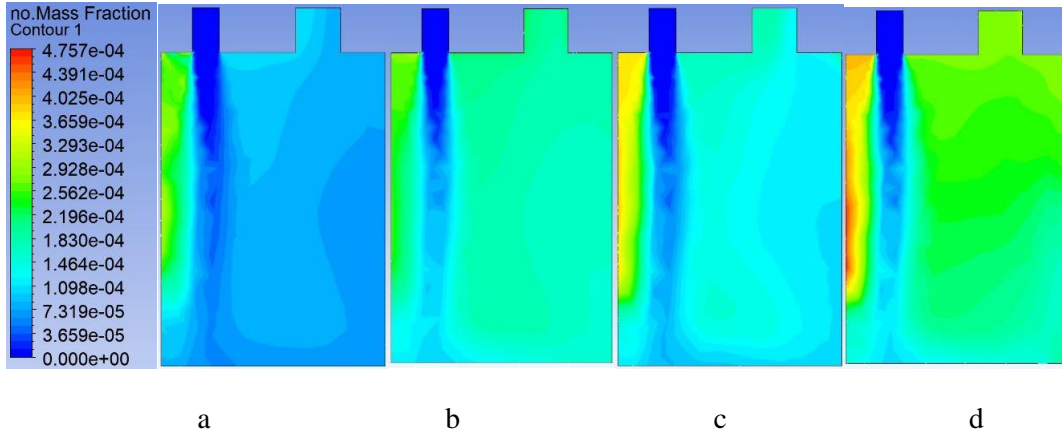
Şekil-32. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil-33. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



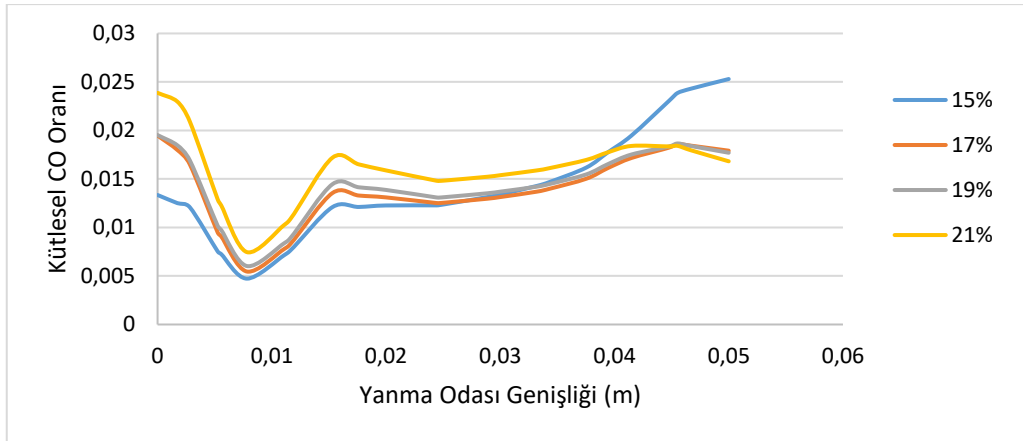
Şekil-34. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



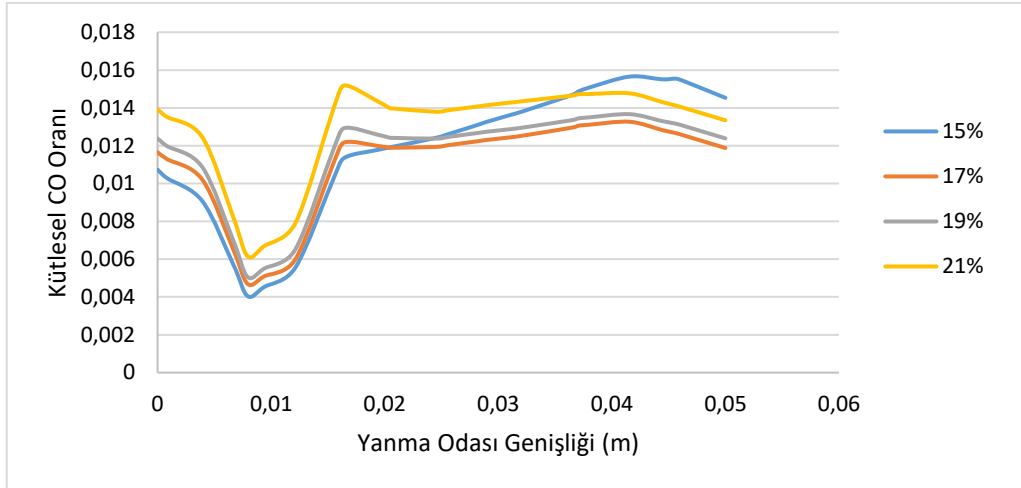
Şekil-35. $\lambda=1.7$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

3.9 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

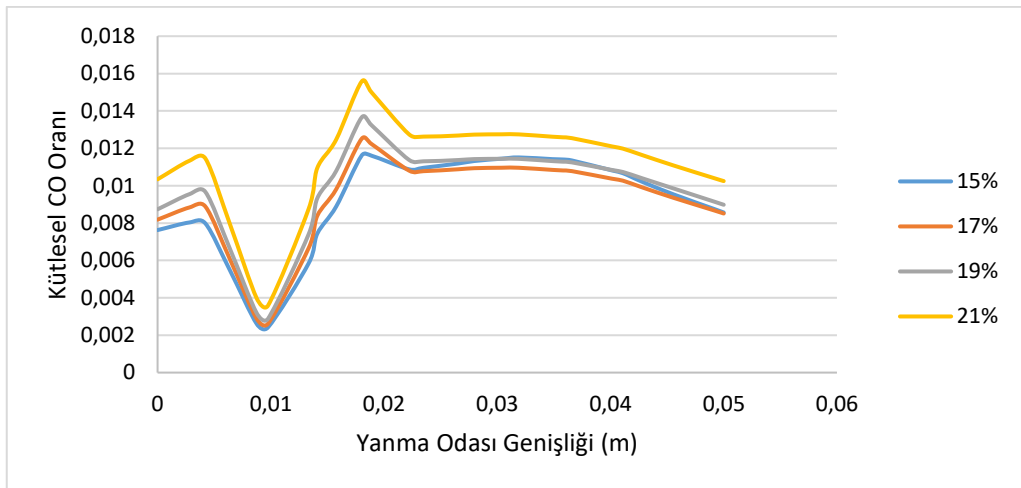
Renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için diğer önemli bir gösterge de, yine renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması sayesinde yanmanın tüm yanma odasına yayılmasına olanak sağlanması, bu sayede, eksik yanma ürünlerinin (örneğin CO) yeniden yakılmasına olanak sağlanmasıdır. Şekil 36 ile Şekil 40 yanma sonu CO kirlenici emisyon profillerini ve CO konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli CO seviyelerinin büyük oranda konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılıkça kütleli CO oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasındaki önemli kriterlerden birisi, oksitleyici bünyesindeki oksijen oranının azaltılması iken diğer önemli bir husus da yüksek iç resirkülasyonlu yanma odasının (gaz türbinlerinde başarılmak istenen şekilde) kullanılmasıdır. Bu sayede, CO eksik yanma ürünü yanma odasına resirküle edilebilmiş ve CO emisyon seviyeleri yüksek değerlerde oluşmamıştır.



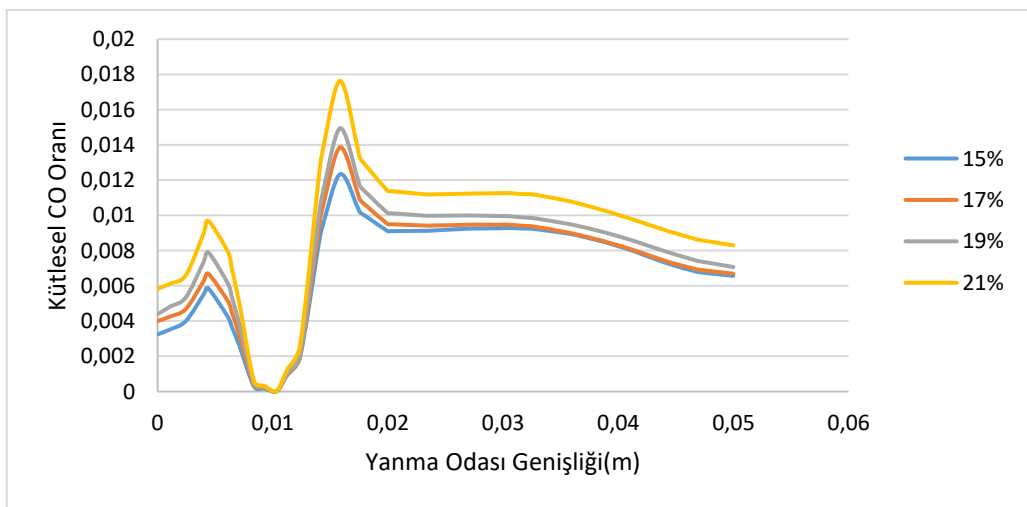
Şekil-36. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



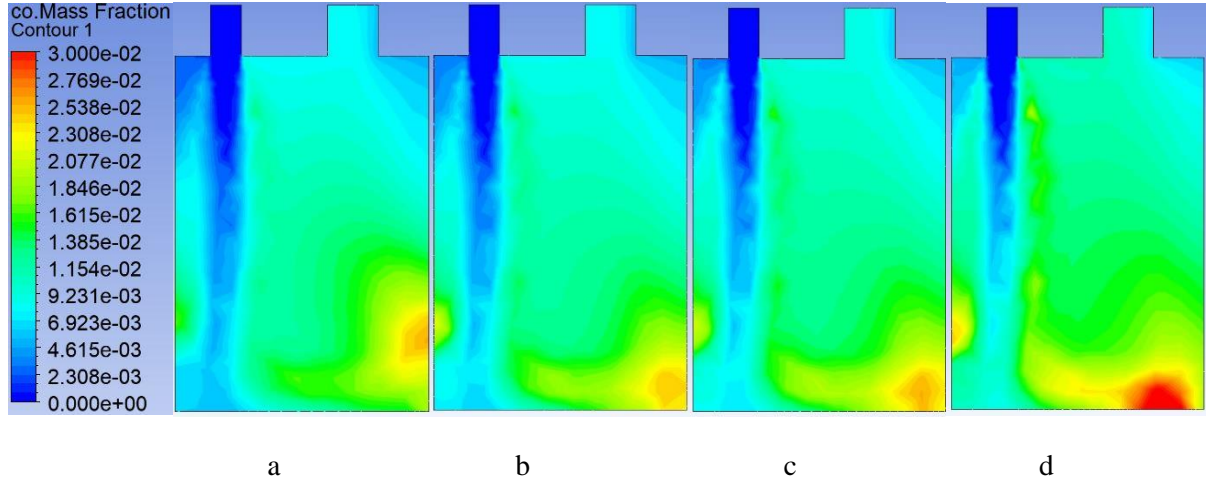
Şekil-37. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil-38. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



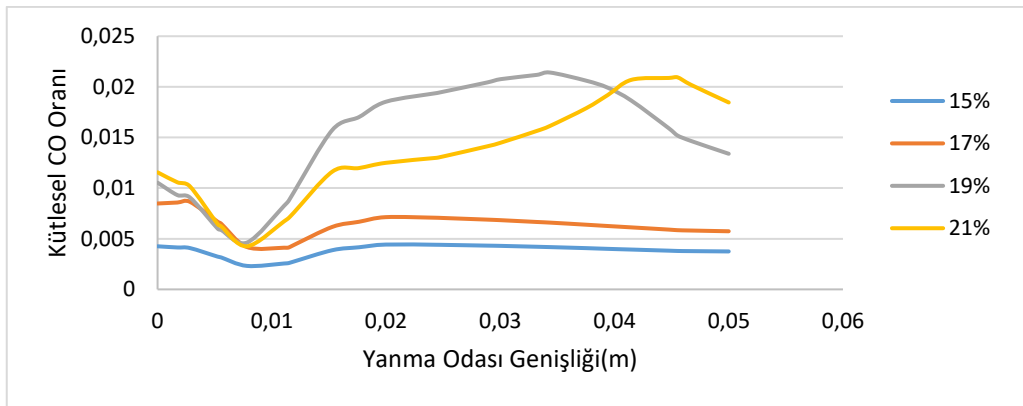
Şekil-39. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



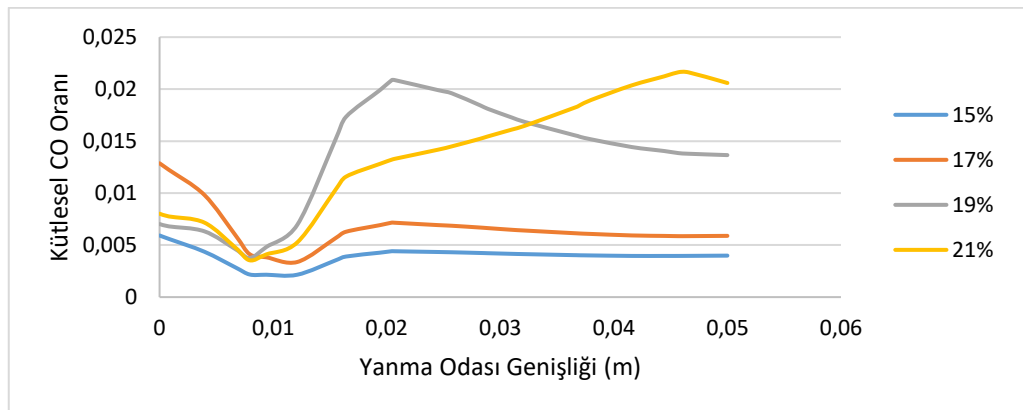
Şekil-40. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

3.10. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

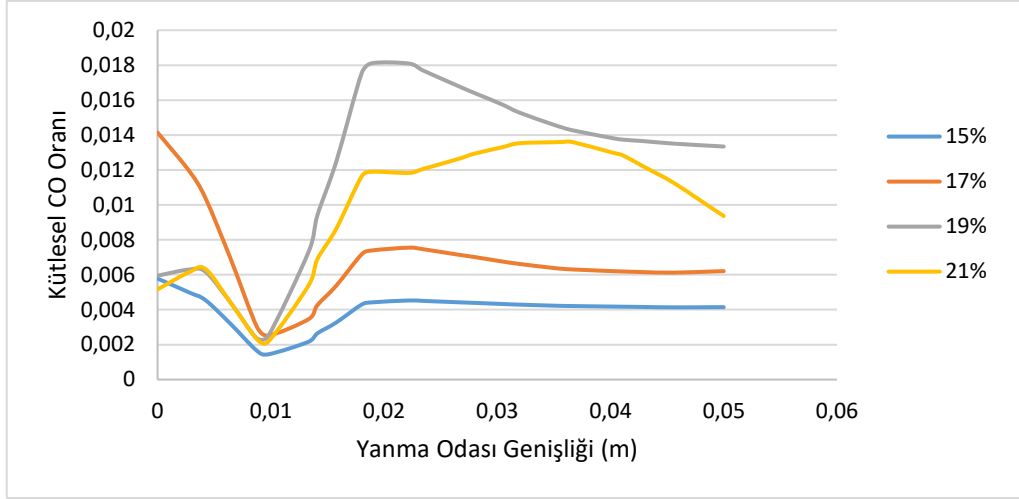
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte yakıt-oksitleyici karışımındaki azot oranı artırılmış, buna karşın yüzde karbon oranı azalmıştır ve bunun sonucu Şekil 41 ilan Şekil 45'te tahmin edilen CO profilleri ve konturlarında sunulmuştur. Yanma odası içerisinde neredeyse tüm bölgelerde $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısı için tahmin edilen CO seviyelerine göre önemli bir değişiklik olmamakla beraber bir miktar düşüş olduğu da gözlemlenmiştir.



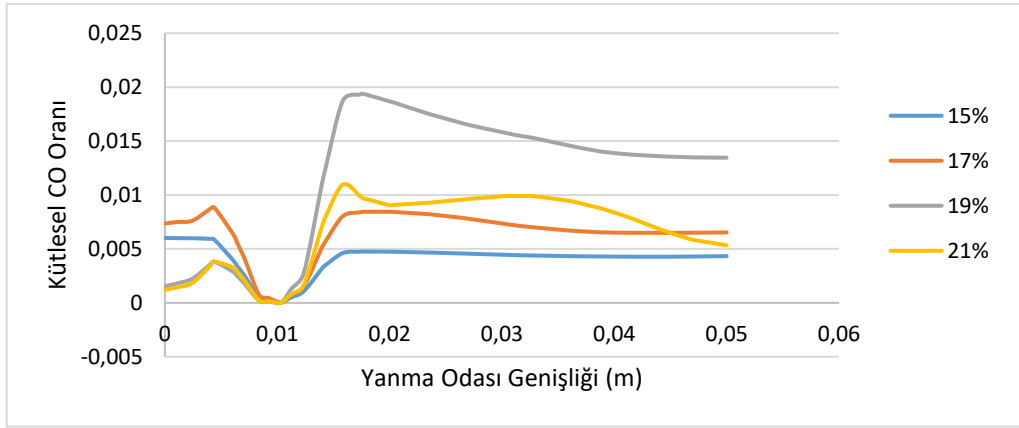
Şekil-41. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



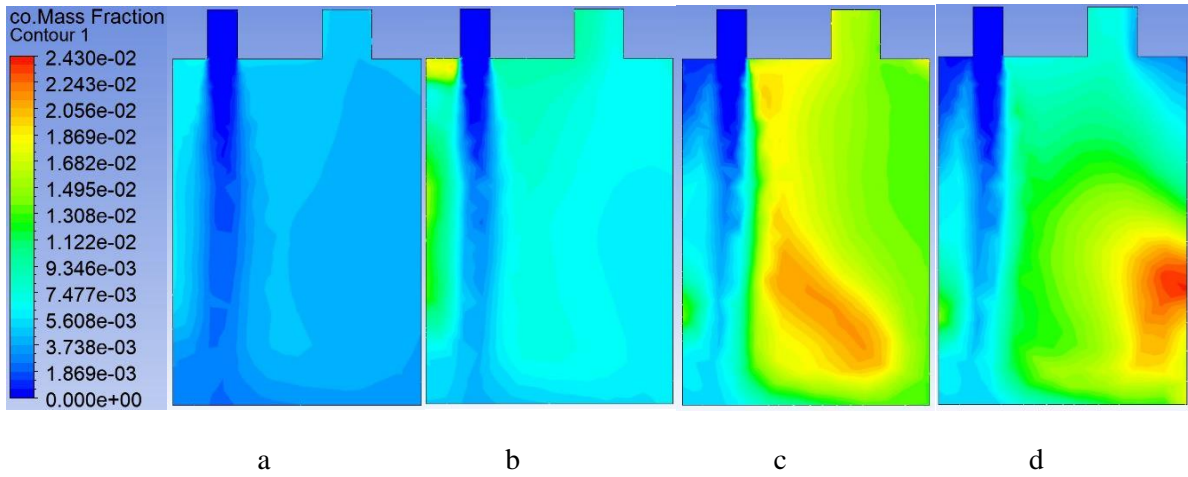
Şekil-42. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil-43. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



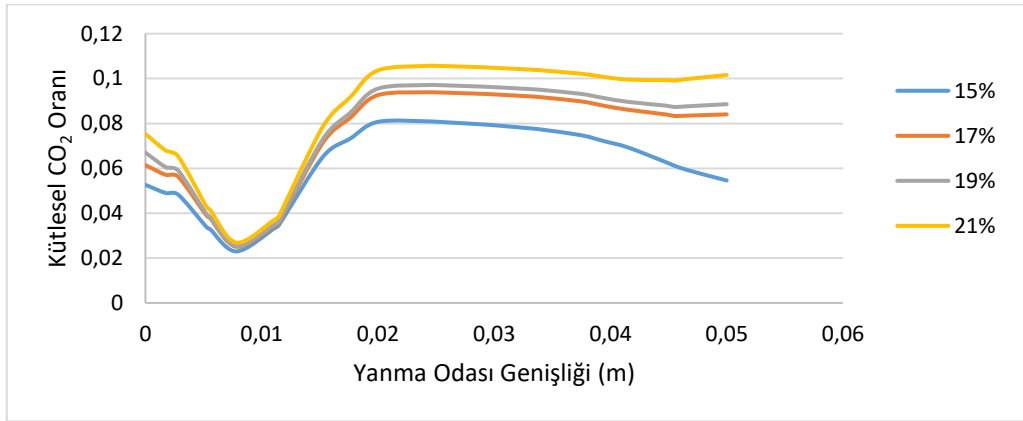
Şekil-44. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



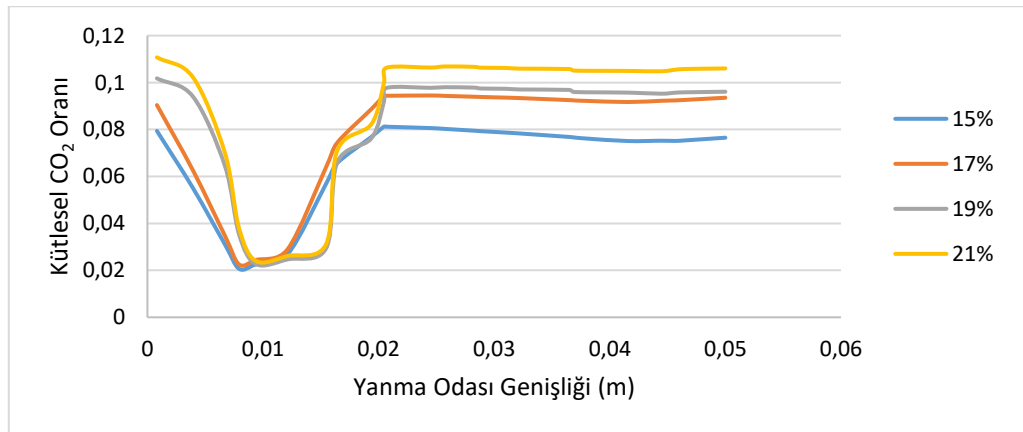
Şekil-45. $\lambda=1.7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

3.11. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

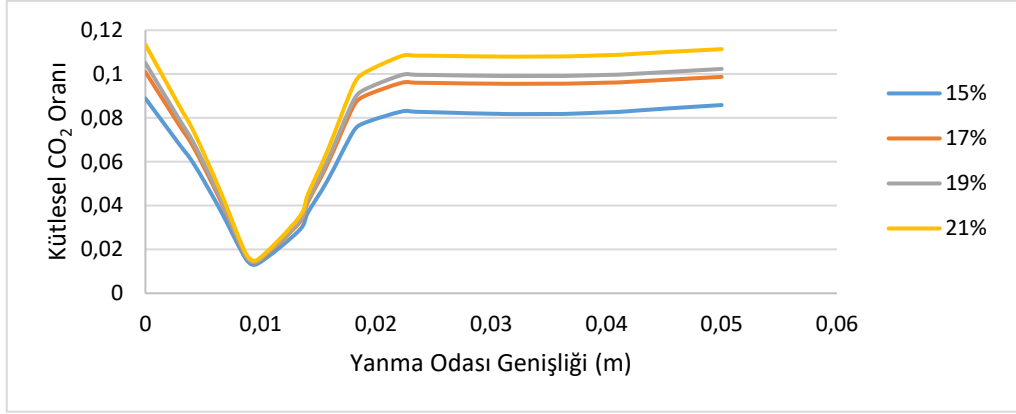
Yanma ve emisyon karakteristiklerinin araştırıldığı çalışmalarda CO₂ emisyonlarını değerlendirmek ve sonuçlarını ortaya koymak önem arz etmektedir. CO₂, küresel ısınmaya neden olan en önemli yanma sonucu emisyonlarından birisidir ve seviyelerinin azaltılması da oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda Şekil 46 ile Şekil 50'de yanma CO₂ emisyon profilleri ve konturları sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçiş sağlandıkça CO₂ seviyelerinin azaldığı ilgili şekillerden anlaşılmaktadır. Bir önceki bölümde yanma sonucu CO emisyonlarının azaldığı belirtilmişti. Bunun sonucu olarak CO₂ emisyonlarının da artması beklenmektedir (CO emisyonlarının CO₂'ye dönüşme hızlarının arttığı anlamına gelir). Buna karşın, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için gerekli seyreltici azotun beslenmesi ile birlikte, karışımda ve bunun sonucunda da yanma sonucu ürünlerinde karbon içerikli ürünlerin kütsel oranlarının da azalmasını beklemek şaşırtıcı olmayacaktır. Şekil 46 ile Şekil 50 değerlendirildiğinde, beslenen seyreltici etkisinin, CO' dan CO₂'ye dönüşen emisyon seviyelerinden daha baskın olduğu ve bunun sonucunda da renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, kütsel CO₂ oranlarının azaldığı sonucunun ortaya çıktığı değerlendirilmektedir.



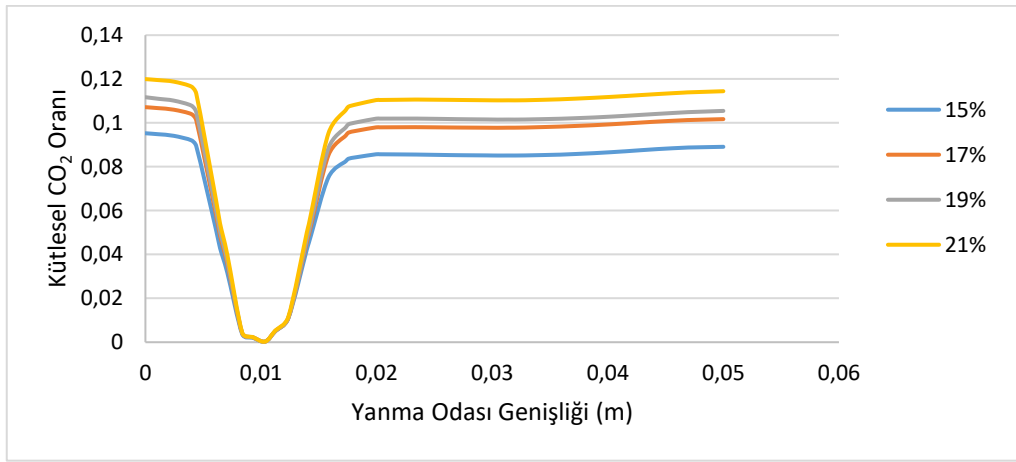
Şekil-46. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



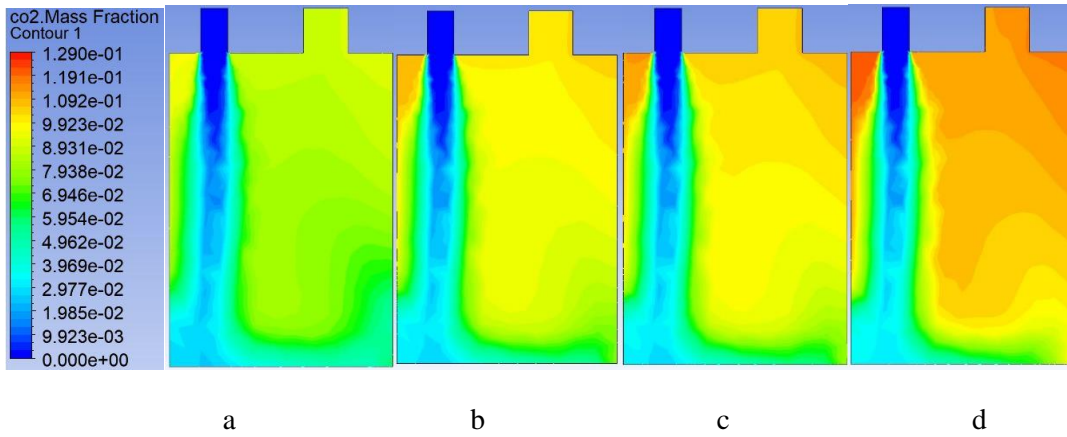
Şekil-47. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil-48. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



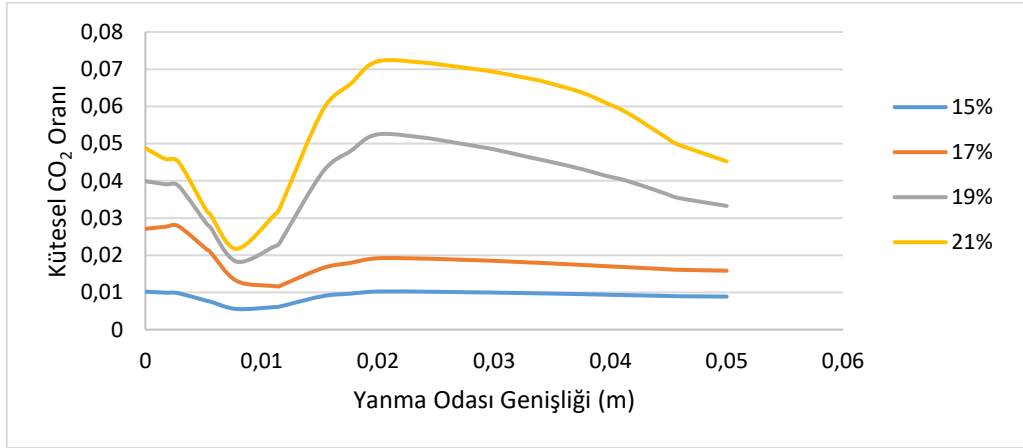
Şekil-49. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



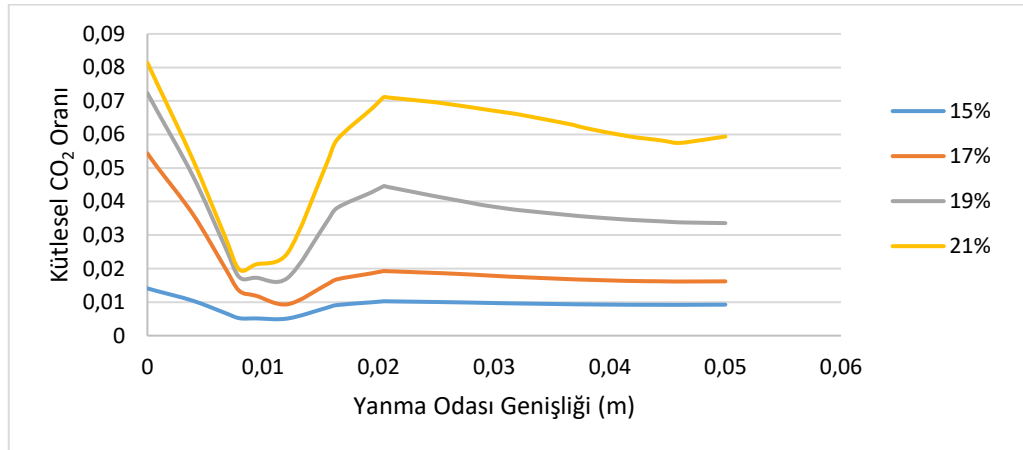
Şekil-50. $\lambda=1.2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

3.12. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

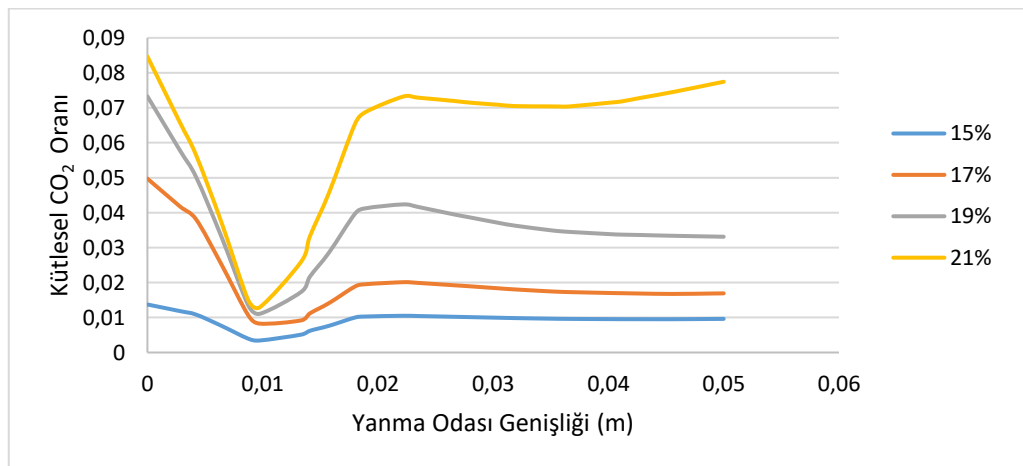
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte CO₂ emisyon seviyelerinin azaldığı Şekil 51 ile Şekil 55'ten anlaşılmaktadır. Yakıt-oksitleyici karışımı bünyesinde azot oranının artması, yanma sonucu ürünlerindeki karbon içerikli emisyonların azalmasına da olanak sağlamış ve CO₂ seviyeleri hem konvansiyonel hem de renksiz dağıtılmış yanma şartları için azalmıştır.



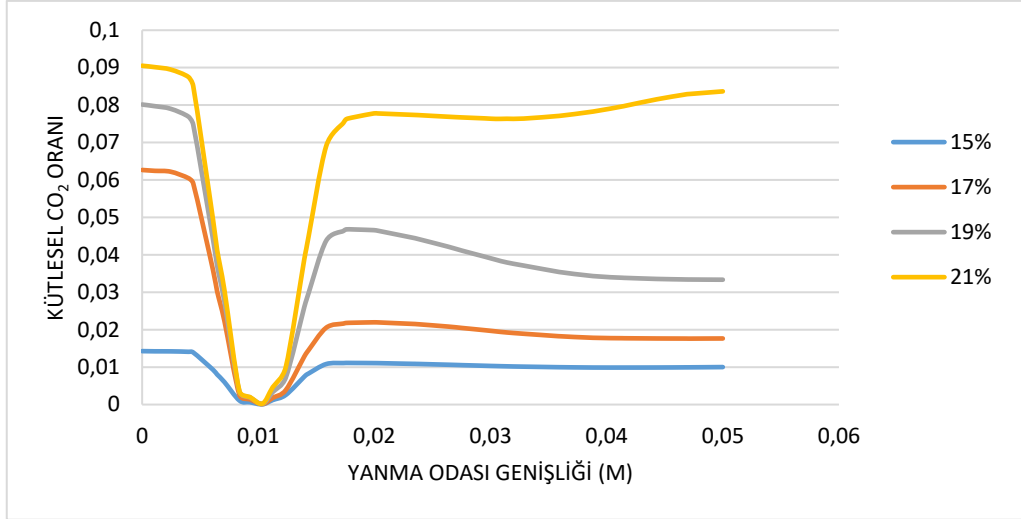
Şekil-51. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



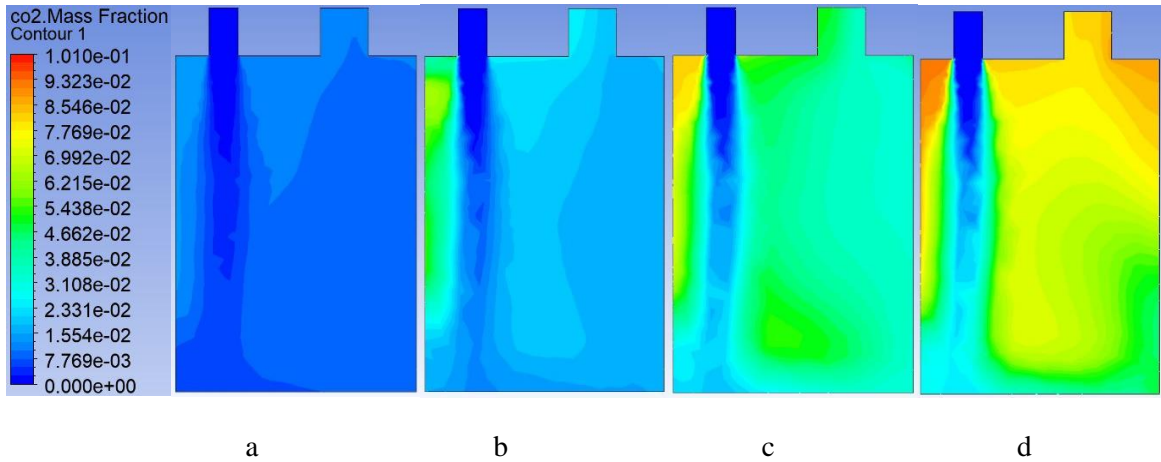
Şekil-52. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil-53. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



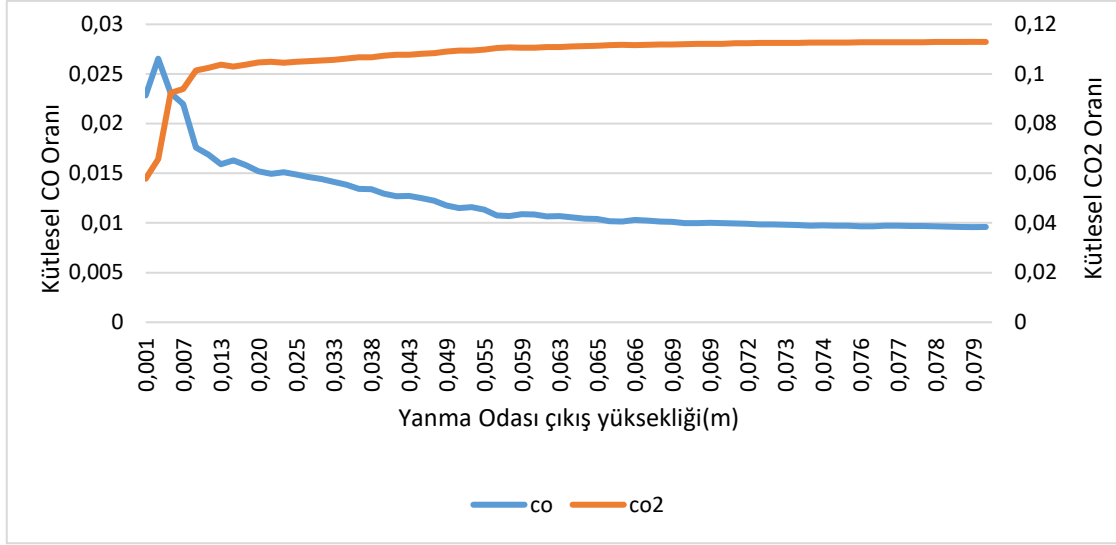
Şekil-54. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



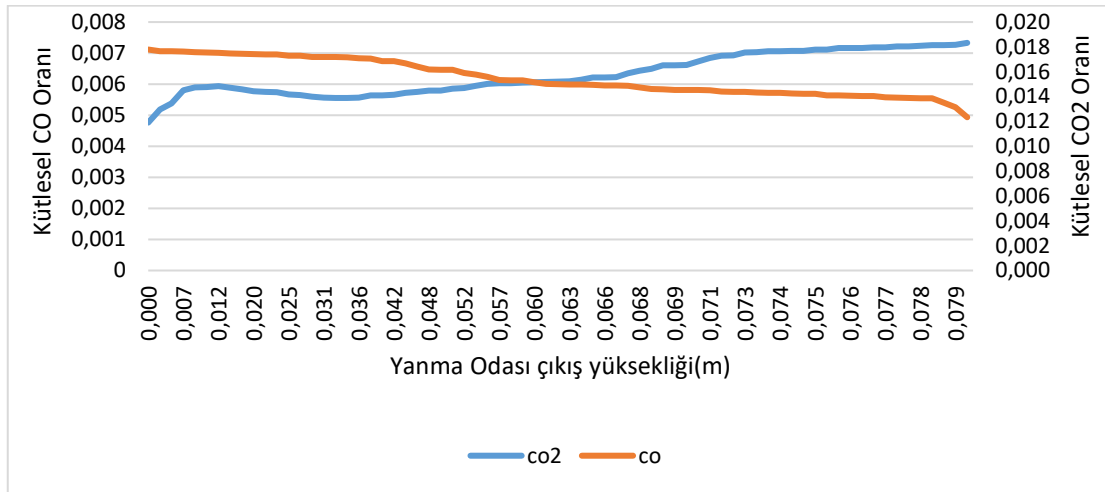
Şekil-55. $\lambda=1.7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

3.13 Çıkış Bölgesi için CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması

Şekil 56 ve Şekil 57’de, % 21 oksijen konsantrasyonu içeren oksitleyici için $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık sayılarında gerçekleştirilen modellemeler neticesinde, yanma odası çıkış kesitine dik ve yanma odasının alt kısmına kadar çizilen hayali, yanma odası çıkış yüksekliği çizgisi için kütleli CO ve CO₂ oranlarının değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere yanma odası çıkışına doğru (yanmanın sonlanmaya başladığı bölgede) yanma sonu CO emisyonları azalırken CO₂ emisyonlarında artış tahminleri ortaya konulmuştur



Şekil-56. $\lambda=1.2$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması



Şekil-57. $\lambda=1.7$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması

4. BULGULAR

Bu çalışmada, ön karışımli, yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında, doğalgazın önemli bir bölümünü oluşturan metan yakıtının yanma ve emisyon parametreleri, $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayılarında, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartları altında sayısal olarak incelenmiştir. Yanma modellemelerinden daha doğru sonuç alınabilmesi için 64 basamaklı metan yanma reaksiyonları oluşturulmuş ve modellemelerin yapıldığı ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programına entegre edilmiştir. Çalışma, 10 kW ısıl güçte, uygulamada kullanılan gaz türbinleri için uygun olabilecek bir ısıl yoğunlukta (yaklaşık 70 MW/m³.atm) gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %15'e azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu, bu sayede odası içerisindeki sıcaklık seviyeleri bir miktar azalırken daha homojen bir dağılım elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Hava fazlalık katsayısının artırılmasıyla sıcaklık seviyelerinin biraz azaldığı tespit edilmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma odası içerisindeki bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ve bunun sonucunda ısıl NO_x'un baskılanması ile yanma sonu kirletici NO_x emisyonlarında düşüş gözlenmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, hem yanma hızının yavaşlaması ile yanmanın tüm yanma odasına yayılması hem de yüksek resirkülasyon sayesinde yanmamış CO'lerin yeniden yanabilmesi ile yanma sonu kirletici CO emisyon seviyelerinde düşüş gözlenmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma sonu CO₂ emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. CO seviyelerinin azalması ile CO₂ seviyelerinde artış beklenirken, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılabilmesi için beslenen seyreltici azot seviyelerindeki artış daha baskın gelmiş ve kütleli CO₂ oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Tüm bulgular değerlendirildiğinde, en uygun çalışma şartları için hava fazlalık katsayısının 1.2 ve %15 O₂ konsantrasyonu içeren oksitleyici yanma şartları için hem sıcaklık hem de emisyonlar bakımından sağlandığı tespit edilmiştir.

Çalışma neticesinde, gaz türbini ya da bir uçak motoru yanma odasını temsilen yüksek ısıl yoğunluklu ve yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında renksiz dağıtılmış yanmanın uygulanmasının sağlayacağı avantajlar ortaya konulmuştur. Gaz türbinlerinin ve uçak motorlarının yanma odası çıkış sıcaklıklarının önemi değerlendirildiğinde, renksiz dağıtılmış yanma tekniğinin, yanma odası sıcaklık seviyelerini önemli derecede azaltmadığı, buna karşın kirletici emisyon seviyelerini önemli derecede düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, farklı yakıtlara da (örneğin, JP-8 veya diğer uçak yakıtları) bu yöntem uygulanabilir ve uygulama alanları daha genişletilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın her anında bana destek olan ve yönlendirmeleriyle başarılı bir şekilde tamamlamamı sağlayan değerli hocam Serhat KARYEYEN' e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] “When Fossil Fuels Run Out, What Then?”, *MAHB*, 23 Mayıs 2019. <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/> (erişim 22 Mayıs 2022).
- [2] “International Energy Outlook 2016”, s. 290, 2016.
- [3] G. Akin, “Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları”, *Ank. Üniversitesi Dil Ve Tar.-Coğrafya Fakültesi Derg.*, c. 46, sy 2, Art. sy 2, Oca. 2006.
- [4] A. S. Reyhan ve H. Reyhan, “KÜRESEL ISINMANIN NEDENLERİ, SONUÇLARI, ÇÖZÜMLERİ ÜZERİNE YENİ DEĞERLENDİRMELER”, s. 24, 2016.
- [5] R. Weber, A. K. Gupta, ve S. Mochida, “High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects”, *Appl. Energy*, c. 278, s. 115551, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115551.
- [6] A. Cavaliere ve M. de Joannon, “Mild Combustion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, c. 30, sy 4, ss. 329-366, Oca. 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
- [7] R. Lückerrath, W. Meier, ve M. Aigner, “FLOX[sup ®] Combustion at High Pressure With Different Fuel Compositions”, *J. Eng. Gas Turbines Power-Trans. Asme - J ENG GAS TURB POWER-T ASME*, c. 130, Oca. 2008, doi: 10.1115/1.2749280.
- [8] V. K. Arghode, A. K. Gupta, ve K. M. Bryden, “High intensity colorless distributed combustion for ultra low emissions and enhanced performance”, *Appl. Energy*, c. 92, ss. 822-830, Nis. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.039.

- [9] Karyeyen, S., Feser, J.S. and Gupta, A.K. (2019). Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels. *Applied Energy*, 251(1), 113354-113362.
- [10] Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2013). Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion. *Applied Energy*, 104 (1), 71-79.
- [11] Yu, Y., Gaofeng, W., Qizhao, L., Chengbiao, M. and Xianjun, X. (2010). Flameless combustion for hydrogen containing fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 2694-2697
- [12] Derudi, M., Villani, A. and Rota, R. (2007). Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 3393-3400.
- [13] Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2016). Fuel property effects on distributed combustion. *Fuel*, 171(1), 116-124.
- [14] Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B.B., Mei, Z., Zhang, J. and Parente, A. (2014) Mechanisms of NO Formation in MILD Combustion of CH₄/H₂ Fuel Blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 19187–19203
- [15] İlbaş, M. ve Karyeyen, S. (2014). Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor, *International Journal of Energy Research*, 38(9), 1171-1180.
- [16] Hashemi, S. A., Skeikhzadeh, G. A., Hajialigol, N. ve Nikfar, M. (2012). Numerical investigation of NOX reduction in a sudden-expansion combustor with inclined turbulent air jet, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3723-3731
- [17] Yilmaz, I. ve Ilbas, M. (2008). An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 178-187.]
- [18] Gupta, S. K. ve Arghode, V. K. (2019). Investigation of a reverse-cross flow combustor with varying fuel injection momentum, *Thermal Science and Engineering Process*, 10, 232-244.
- [19] Ilbas, A, Ozdemir, M. B ve Karyeyen S. (2022). Investigation of colorless distributed combustion regime using a high internal recirculative combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12338-12353.