Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(2): 914-928 (2026)

Renksiz Dağıtılmış Yanma Şartlarının Laboratuvar Ölçekli Bir Yakıcıda Sentetik Yakıt Yanma Karakteristiklerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Sevgi FETTAH[1*], Serhat KARYEYEN[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Faületesi, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/04/2026
Düzeltme: 15/04/2026
Kabul: 20/04/2026

Anahtar Kelimeler

Renksiz Dağıtılmış Yanma
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAD
Yanma
Sentetik Yakıt

Article Info

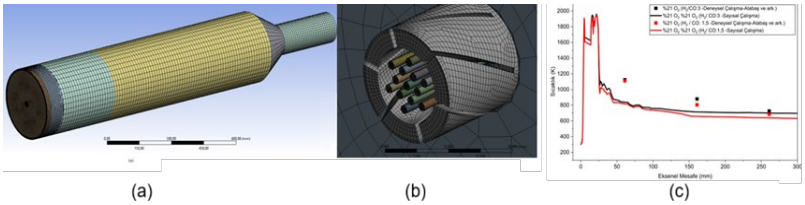
Research article
Received: 07/04/2026
Revision: 15/04/2026
Accepted: 20/04/2026

Keywords

Colourless Distributed Combustion
Computational Fluid Dynamics
CFD
Combustion
Synthetic Fuel

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

3 kW ısıl güce ve S = 1 girdap sayısına sahip laboratuvar ölçekli yanma odasının 3B sayısal modeli oluşturulmuştur. H_2/CO = 3 ve H_2/CO = 1,5 sentetik yakıt karışımları için elde edilen eksensel sıcaklık dağılımları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak model doğrulanmıştır. /A 3D numerical model of a laboratory-scale combustor with a thermal power of 3 kW and a swirl number of S = 1 was developed. The numerical model was validated against experimental axial temperature distributions available in the literature for H_2/CO = 3 and H_2/CO = 1.5 synthetic fuel mixtures.



Şekil A: *3 kW girdap destekli yanma odasına ait sayısal model ve doğrulama çalışması; (a) yanma odasının 3B ağı yapısı, (b) girdap üreteci görünümü, (c) H_2/CO = 3 ve H_2/CO = 1,5 sentetik yakıt karışımları için elde edilen sayısal eksensel sıcaklık dağılımlarının deneysel verilerle karşılaştırılması. (Numerical modeling and validation study of a 3 kW swirl-assisted combustion chamber; (a) 3D mesh structure of the combustion chamber, (b) view of the swirl generator, (c) comparison of the numerical axial temperature distributions obtained for synthetic fuel mixtures with H_2/CO ratios of 3 and 1.5 with experimental data.)*

Önemli noktalar (Highlights)

- *H_2/CO oranı ve O_2 konsantrasyonunun yanma ve emisyon özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. /The effects of H_2/CO ratio and O_2 concentration on combustion and emission characteristics were evaluated.*
- *O_2 konsantrasyonunun azalmasıyla daha homojen sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. /More uniform temperature distributions were achieved with decreasing O_2 concentration.*
- *Maksimum sıcaklıklar ve NO_x emisyonları RDY koşullarında azaltılmıştır. /Peak temperatures and NO_x emissions were reduced under CDC conditions.*

Amaç (Aim): *Farklı H_2/CO oranlarına sahip sentetik yakıtların RDY koşullarındaki yanma ve emisyon karakteristiklerini sayısal olarak incelemektir. /The aim is to numerically investigate the combustion and emission characteristics of synthetic fuels with different H_2/CO ratios under CDC conditions.*

Özgünlük (Originality): *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımıyla sayısal olarak incelenen sentetik yakıtların RDY koşullarında yanma davranışlarının incelenip, sayısal modelin sıcaklık dağılımları kullanılarak doğrulanmasıdır. /The numerical investigation of the combustion and emission behavior of synthetic fuels with different H_2/CO ratios under CDC conditions; and the validation of the numerical model using experimental temperature distributions.*

Bulgular (Results): *O_2 konsantrasyonunun %21'den %17'ye düşürülmesi sıcaklığı azaltmış ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır. Ayrıca türlerin kütle oranları yanma odası boyunca azalmıştır. /Reducing the O_2 concentration from 21% to 17% lowered the temperature and promoted a more uniform temperature field. Additionally, species mass fractions decreased along the combustor.*

Sonuç (Conclusion): *Sonuçlar, sentetik yakıtların düşük emisyonlu yanma uygulamalarında etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. /The results show that synthetic fuels can be effectively used in low-emission combustion applications.*

*Corresponding author, e-mail: 23833504802@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1924775

GU J Sci, Part C, 14(2): 914-928 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Renksiz Dağıtılmış Yanma Şartlarının Laboratuvar Ölçekli Bir Yakıcıda Sentetik Yakıt Yanma Karakteristiklerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Sevgi FETTAH[1*], Serhat KARYEYEN[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Faületesi, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/04/2026
Düzeltme: 15/04/2026
Kabul: 20/04/2026

Anahtar Kelimeler

Renksiz Dağıtılmış Yanma
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAD
Yanma
Sentetik Yakıt

Öz

Bu çalışmada, alevsiz yanma teknolojileri arasında yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkan Renksiz Dağıtılmış Yanma (RDY) koşullarında sentetik yakıtların yanma karakteristikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, CH_4 yakıtına CO ve H_2 ilavesiyle oluşturulan H_2/CO=3 (%25 CH_4–%56,25 H_2–%18,75 CO) ve H_2/CO=1,5 (%25 CH_4–%45 H_2–%30 CO) sentetik yakıt karışımlarının yanma davranışları, ϕ=0,7 eşdeğerlik oranında, 3 kW gücünde ön karışımlı ve girdap destekli (S=1) laboratuvar ölçekli bir yanma odasında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımıyla sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal modelde CO, CH_4 ve H_2 oksidasyonunu içeren global reaksiyon mekanizmaları ANSYS Fluent kullanılarak uygulanmıştır. Elde edilen eksensel sıcaklık dağılımları literatürde rapor edilen deneysel verilerle karşılaştırılarak model doğrulanmıştır.

RDY koşulları, oksitleyici akışındaki O_2 konsantrasyonunun N_2 ile seyreltilerek %21'den %17'ye düşürülmesiyle oluşturulmuştur. Bu koşullar altında eksensel ve radyal sıcaklık dağılımları ile O_2, CO, CO_2 ve NO_x türlerinin radyal kütle oranı dağılımları incelenmiştir.

Sonuçlar, O_2 konsantrasyonunun %21'den %17'ye azaltılmasıyla maksimum sıcaklıkların düştüğünü, sıcaklık alanının daha homojen hale geldiğini ve reaksiyon bölgesinin genişlediğini göstermiştir. Ayrıca CO_2, CO, NO_x ve O_2 türlerine ait kütle oranlarının yanma odası boyunca ve radyal mesafe arttıkça azaldığı belirlenmiş, bu davranışın RDY rejiminin karakteristik özellikleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Numerical Investigation of Colorless Distributed Combustion Characteristics of Synthetic Fuel in a Laboratory-Scale Combustor

Article Info

Research article
Received: 07/04/2026
Revision: 15/04/2026
Accepted: 20/04/2026

Keywords

Colourless Distributed Combustion
Computational Fluid Dynamics
CFD
Combustion
Synthetic Fuel

Abstract

In this study, the combustion characteristics of synthetic fuels under Colorless Distributed Combustion (CDC) conditions, an innovative approach among flameless combustion technologies, were investigated. Two synthetic fuel mixtures were prepared by adding CO and H_2 to CH_4 fuel: H_2/CO = 3 (25% CH_4–56.25% H_2–18.75% CO) and H_2/CO = 1.5 (25% CH_4–45% H_2–30% CO). The combustion characteristics of these mixtures were numerically analyzed at an equivalence ratio of ϕ = 0.7 in a 3 kW premixed, swirl-stabilized (S = 1) laboratory-scale combustor using Computational Fluid Dynamics (CFD). Global reaction mechanisms including CO, CH_4, and H_2 oxidation were implemented in ANSYS Fluent. The predicted axial temperature distributions were compared with experimental data reported in the literature for similar fuel compositions, and model validation was performed.

CDC conditions were established by diluting the oxidizer stream with N_2 and reducing the O_2 concentration from 21% to 17% in 1% increments. Under these conditions, axial and radial temperature distributions together with the radial mass fraction distributions of O_2, CO, CO_2, and NO_x were investigated to evaluate CDC behavior.

The results showed that reducing the O_2 concentration from 21% to 17% decreased the maximum temperature while promoting a more uniform temperature field and a wider reaction zone. Furthermore, radial temperature profiles and the mass fraction distributions of CO_2, CO, NO_x, and O_2 decreased along both the combustor length and radial direction, consistent with the characteristic behavior of CDC.

*Corresponding author, e-mail: 23833504802@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1924775

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda dünyada hızlı endüstrileşme ve yaşam standartlarının yükselmesi küresel enerji tüketiminde önemli bir artışa neden olmaktadır. Artan enerji talebi, özellikle fosil yakıtların yanması sonucu oluşan karbondioksit (CO_2) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarının yükselmesine yol açmakta ve bu durum günümüzde çözüm gerektiren çevresel sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik küresel stratejilerde fosil yakıt kaynaklı emisyonların azaltılması önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Fosil yakıtların yanması sonucunda azot oksitler (NO_x) ile karbon bazlı CO ve CO_2 gibi emisyonlar oluşmaktadır. Bu tür emisyonların azaltılmasına yönelik geliştirilen yenilikçi yaklaşımlardan biri de son yıllarda öne çıkan Renksiz Dağıtılmış Yanma (RDY) tekniğidir. RDY, yanma havasının CO_2 ve N_2 gibi gazlarla seyreltilmesi sonucu genişlemiş bir reaksiyon bölgesi oluşturmakta ve yanma odasında daha düşük, homojen sıcaklık dağılımı oluştururken alev stabilitesini arttırmaktadır. Bununla birlikte CO ve NO_x emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması mümkün olmaktadır. Ayrıca RDY koşullarında yanma sistemlerinde görülen termo-akustik kararsızlıkların ve yanma gürültüsünün de önemli ölçüde azaldığı literatürde rapor edilmiştir [1]. Bu özellikler RDY yanmasını çevre dostu ve düşük emisyonlu yanma sistemleri için önemli bir aday teknoloji hâline getirmektedir. Literatürde RDY rejiminin çeşitli yakıt bileşenleri, yakıcı tipleri, girdap üreteci varlığı, eşdeğerlik oranı değişiminin etkisi vb. inceleyen çok sayıda çalışma yer almaktadır. Özellikle endüstride sıklıkla kullanılan; biyokütle, kömür ve doğal gaz dahil çeşitli ham maddelerden elde edilen CO_2, SOx ve partikül madde gibi zararlı emisyonları azaltma potansiyeline sahip olması nedeniyle sürdürülebilir bir yakıt seçeneği olarak öne çıkan sentetik yakıtın, RDY altındaki davranışı araştırmacıların dikkatini çekmektedir [2].

Bouziane ve ark. [3], %80 H_2, %4 CH_4, %10 CO_2, %2 CO ve %2 N_2 bileşiminden oluşan sentetik yakıt karışımını kullanarak ön karışımsız bir yakıcıda alev yapısını ve farklı eşdeğerlik oranlarındaki yanma karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada eşdeğerlik oranının azalmasıyla birlikte CO emisyonlarının arttığı; bu artışın, yalın koşullarda reaksiyon hızlarının düşmesi ve CO oksidasyonunun tamamlanamaması ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Hasan [4], girdap destekli bir yanma sisteminde farklı yakıt türleri olarak metan, hidrojen ve H_2/CO tabanlı sentetik yakıt karışımları kullanılmış, yanma karakteristikleri HAD yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modellemede türbülanslı akışın modellenmesinde RNG k–ε türbülans modeli ve türbülans–kimya etkileşimini temsil etmek amacıyla Eddy Dissipation Concept (EDC) yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar girdap akışının oluşturduğu geri akış bölgelerinin yüksek sıcaklık seyreltmesi sağlayarak reaksiyonların hacimsel olarak gerçekleşmesine ve dağıtılmış yanma rejiminin oluşmasına katkı sağladığını göstermiştir.

Karyeyen ve ark. [5], %10 N_2 ve %10 CO_2 ile seyreltilmiş CH_4 ve H_2 karışımları kullanılarak oluşturdukları sentetik yakıt karışımlarına oksi-renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulamışlardır. Girdap destekli bir yakıcıda ϕ = 0,9 eşdeğerlik oranında, elde edilen dağıtılmış yanmanın alev geri tepmesini azalttığı; yüksek H_2 içeren yakıtta alev kararlılığının arttığı, CO emisyonunun çok düşük seviyede elde edildiği bildirilmiştir.

H. Yılmaz ve İ. Yılmaz [7], çalışmalarında geliştirdikleri deneysel düzenek yardımıyla CNG/H_2/CO/CO_2 içerikli sentetik yakıt kullanarak (H_2/CO: 1 olacak şekilde) girdap sayısının (0,2'den 1,6'ya 0,2 aralıklarla) ve eşdeğerlik oranı değişiminin etkisi (0,6, 0,8 ve 1,0) sentetik yakıtların, sıcaklık dağılımı ve NO_x ve CO emisyon oluşumu gibi yanma karakteristikleri açısından incelemişlerdir. Sıcaklık ve emisyon oluşumlarında girdap sayısının ve eşdeğerlik oranı değişiminin önemli etkisi olduğu bildirilmiştir. Kullanılan sentetik yakıt karışımının kararlı yanma aralığı (patlama ve geri tepme eşdeğerlik oranları) belirlenmiş ve en geniş çalışma aralığına sahip karışım (%20 CNG-%30 H_2) tespit edilmiştir [6]. Ayrıca Çam tarafından yapılan çalışmada sentetik yakıtların alev kararsızlıkları akustik yanma düzeneği kullanılarak incelenmiştir.

Türkkahraman ve Alabaş [8], gaz türbin yakıcılarında, metan yakıtının oksi-dağıtılmış yanma metodu altında NO_x emisyonlarını ve alev karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu metotta oksitleyici olarak kullanılan hava içindeki O_2 oranı, seyreltici olarak N_2 yerine CO_2 gazı kullanarak seyreltilmiş, N_2'nin kullanılmaması kaynaklı yanma sonucu oluşacak NOx in teorik olarak sıfır çıkması beklenmiştir. 3 kW ölçeğindeki önkarışımlı, girdap destekli (girdap sayısı:1) yakıcıda, ϕ=0,7 eşdeğerlik oranında, hacimce %26, %21, %19, %17 ve %15 O_2 içerecek şekilde yapılan denemelerde CO_2 oranı arttıkça RDY koşullarının

sağlandığı; NOx seviyelerinin ise beklendiği şekilde sıfıra yakın elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, karışımdaki O_2 oranının artmasıyla alev sıcaklığında gözle görülür seviyede düşüş tespit edildiği raporlanmıştır.

İlbaş ve Karyeyen [9], H_2 zenginleştirilmiş düşük kalorifik değerli kömür gazlarının yanma davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, akış alanı Reynolds Average Navier–Stokes (RANS) denklemleri ile çözülmüş ve türbülanslı akış yapısı realizable k–ε türbülans modeli, reaksiyon etkileşimi "EDC" modeli ile temsil edilmiştir. Çalışmada metan sonuçları doğrulama amacıyla kullanılmıştır. H_2 ilavesiyle düşük kalorifik değerlikli gazların yanma özellikleri iyileşmiş, NOx emisyon seviyelerinde bir artış gözlenmiştir.

Salem [10], CH_4, H_2 ve CO'dan oluşan sentetik yakıt karışımlarını CHEMKIN yazılımı kullanılarak oluşturduğu, 2, 5 ve 10 basamaklı reaksiyon mekanizmalarıyla Ansys Fluent programı aracılığıyla 40 cm uzunluğunda ve 2 cm çapında 2B silindirik yanma odası kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Alev hızı, yakıt bileşenlerinin kütle fraksiyonları belirlenmiştir. Reaksiyon basamak sayısının artmasıyla maksimum sıcaklık değerlerinin azaldığını; H_2–CH_4 karışımlarında oksitleyici olarak kullanılan hava oranının değiştirilmesiyle H_2 miktarındaki artışın alev hızını artırdığını bildirmiştir.

Habib ve ark. [11], güneş enerjisi kullanılarak buhar reformasyonu sonucu üretilen sentetik yakıtın endüstriyel boyutta uygulanabilirliğine yönelik yaptığı çalışmada, sentetik yakıtın yanma ve emisyon özellikleri sayısal olarak incelemiş ve iki brülörlü 200 MW ölçeğindeki kazanda metan yakması sonucu elde edilen verilerle kıyaslamışlardır. Modellemede 21 adım ve 11 türden oluşan reaksiyon seti kullanılmış; yanma modeli "tür taşınım (species transport)" denklemi, standart k-Ɛ modeli türbülans modeli, Finite-rate chemistry yanma modeli ve Discrete Ordinates (DO) radyasyon modeli uygulanmıştır. %67 CO-%33 H_2, %50 CO-%50 H_2 ve %33 CO-%67 H_2 yakıt karışımları incelenmiş; %33 CO-%67 H_2 yakıt bileşiminin, diğer sentetik yakıt en kısa alev süresine sahip olduğu görülmüştür. Yakıttaki H_2 artmasıyla Brülör sıcaklığının arttığı; sisteme beslenen fazla havanın artmasının NOx emisyonu azalttığı bildirilmiştir.

Ammar ve Farag [12] ise denizcilikte kullanılan gaz türbininde yanma davranışı, Standart k–ε türbülans modeli, species transport yanma modeli ve Eddy Dissipation Model (EDM) kullanılarak modellenmiş ve termal NO_x oluşumunu Zeldovich mekanizması ile hesaplanmıştır. Sonuçlar, yakıt karışımındaki H_2 artışının reaksiyon hızını ve maksimum sıcaklık değerlerini yükselttiği, CO oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı ve yanma verimini artırdığı belirlenmiştir. Buna karşılık NO_x oluşumunu arttırdığı, CO_2 ve N_2 gibi seyreltici türlerin sıcaklığı düşürerek emisyonları azaltabildiği bildirilmiştir.

Chen ve ark. [13], çalışmalarında H_2/CO sentetik yakıtının mikrokarışımlı girdaplı yanma odasındaki yanma karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Sayısal analizlerde türbülanslı reaktif akışın modellenmesi için k–ε türbülans modeli ve Species Transport reaksiyon modeli kullanılmıştır. Çalışmada H_2 içeriği %30–70 aralığında değiştirilmiş ve eşdeğerlik oranı φ = 0,5–0,9 aralığında ön karışımlı yanma koşulları incelenmiştir. Sonuçlar H_2 oranının artmasıyla alev sıcaklığının yaklaşık 1700–2000 K aralığına yükseldiğini ve yanma bölgesinde güçlü bir geri akış oluştuğunu göstermiştir. Mikro karışımlı girdap üreteci konfigürasyonu sayesinde alev stabilitesi iyileşmiş ve fakir karışım sönme sınırı limitinin yaklaşık ϕ:0,55 seviyesine kadar düştüğü belirlenmiştir. Emisyon sonuçlarında fakir yanma koşullarında NOx emisyonlarının 10–30 ppm, CO emisyonlarının ise 40–150 ppm aralığında olduğu rapor edilmiştir.

Kümük [14] çalışmasında, H_2 zenginleştirilmiş metan yakıtlarının RDY koşulları altındaki yanma karakteristikleri laboratuvar ölçekli bir yakıcıda incelenmiştir. Sonuçlar, H_2 ilavesinin reaksiyon hızlarını artırarak alev stabilitesini iyileştirdiğini ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturduğunu göstermektedir. RDY koşullarında maksimum sıcaklıkların düştüğü ve yanma bölgesinin genişlediği belirlenmiş olup, bu durumun NO_x emisyonlarının azalmasına katkı sağladığı ifade edilmiştir. Ayrıca, yüksek hidrojen içeriğinin difüzyon etkisiyle reaksiyon bölgesini genişlettiği ve daha yayvan bir alev yapısı oluşturduğu rapor edilmiştir.

Costa ve ark. [15], H_2/CO sentetik yakıt karışımlarının yanma karakteristiklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada RNG k–ε türbülans modeli, Species transport yaklaşımı ve P-1 radyasyon modeli kullanılmış; yakıt karışımındaki H_2 oranının artmasının alev sıcaklığını ve reaksiyon hızını artırdığını; bunun aynı zamanda yüksek alev sıcaklıklarına bağlı olarak NOx emisyonlarının artmasına neden olduğu bildirilmiştir. CO oranının daha yüksek olduğu durumlarda ise yanma

sıcaklığının nispeten düştüğü ve CO emisyonlarının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca çalışma, yakıt bileşiminin alev stabilitesi ve yanma verimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Ashini ve ark. [16], CH_4–H_2–CO içeren sentetik gaz karışımlarının küçük ölçekli gaz türbini sistemlerinde yanma kararlılığı, sıcaklık dağılımı ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, farklı H_2 ve CO oranlarına sahip yakıt karışımları deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen veriler, türbülans–kimya etkileşimini dikkate alan HAD tabanlı reaktif akış modelleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, H_2 oranının artmasıyla birlikte tutuşma gecikme süresinin azaldığını ve alev stabilitesinin belirgin şekilde iyileştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek H_2 içeriğinin bazı çalışma koşullarında lokal sıcaklık artışlarına neden olduğu ve buna bağlı olarak termal NO oluşum mekanizmasının yeniden etkinleşebileceği değerlendirilmiştir. Çalışmada, düşük sıcaklık koşullarında CO oksidasyon kinetiğinin sınırlanmasına bağlı olarak çıkış CO konsantrasyonlarında artışa yol açmıştır. Mikro türbin sistemlerinde kalış sürelerinin kısa olması, kimyasal reaksiyonların tamamlanmasını zorlaştırmakta ve bu durum CO emisyonunu kritik bir parametre getirdiği raporlanmış; bulgunun RDY benzeri yüksek seyrelme koşullarında gözlenen kinetik sınırlama davranışı ile uyumlu olarak değerlendirilmiştir.

Literatürde RDY rejimi üzerine yapılan çalışmaların, yanma karakteristikleri, sıcaklık dağılımı ve emisyon oluşum mekanizmalarının anlaşılmasına önemli katkılar sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, farklı H_2/CO oranlarına sahip üç bileşenli sentetik yakıt karışımlarının, N_2 seyreltmesi ile kontrollü olarak oluşturulan RDY koşulları altında sistematik biçimde incelendiği ve özellikle sayısal yöntemlerle ele alınıp deneysel verilerle doğrulandığı çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu çalışma, söz konusu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlayarak, CH_4–H_2–CO içeren çok bileşenli sentetik yakıt karışımlarının RDY koşulları altında hem yakıt bileşimi (H_2/CO oranı) hem de oksitleyici içerisindeki O_2 konsantrasyonunun birlikte ve kademeli olarak incelendiği kapsamlı bir sayısal analiz sunmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanması, çalışmanın güvenilirliğini artırmakta ve RDY rejiminde sentetik yakıtların yanma davranışına yönelik daha derin fiziksel içgörüler sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada H_2/CO oranı 3 olan **(**%25 CH_4–%56,25 H_2–%18,75 CO**)** ve 1,5 olan **(**%25 CH_4–%45 H_2–%30 CO**)** sentetik yakıt karışımlarının RDY şartları altında davranışları sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalar 3 kW ısıl güce sahip, ön karışımlı ve girdap destekli (S = 1) laboratuvar ölçekli bir yakıcıda eşdeğerlik oranı φ = 0,7 sabit tutulmuş, oksitleyici olarak kullanılan hava içerisindeki O_2 konsantrasyonu hacimce %21, %20 %19 %18 ve %17 olacak şekilde N_2 ile seyreltilerek RDY şartları elde edilmiştir.

Her iki yakıtın %21 O_2 oranında yanmasına ait sayısal çalışmalar sonucu elde edilen eksenel sıcaklık dağılım değerleri, Alabaş ve ark. yaptığı CH_4, CO ve H_2'den oluşan ve H_2/CO oranları 3 ve 1,5 olan, S:1 , ϕ = 0,7 ve 3 kW ısıl güçteki yakıcıda %21 O_2 oranında gerçekleştirdiği deneylere ait veriler ile karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir [17]. Sayısal çalışmalarda Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yanma Laboratuvarı'nda bulunan paslanmaz çelikten üretilmiş, 1650 mm uzunluğunda ve 330 mm dış çapa sahip yanma odası 3 boyutlu modellenmiştir [6-8,17]. Çalışmada, alev stabilitesini arttırması, yanma kararsızlıklarını azaltması ve homojen karışımı sağlamak amacıyla S:1; d_h/d_o oranı 0,5; θ ise 52,1˚ olan girdap üreteci kullanılmıştır [17,18].

$$S = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left[\frac{\left(1-\left(\frac{d_h}{d_o}\right)^3\right)}{\left(1-\left(\frac{d_h}{d_o}\right)^2\right)}\right] \cdot tan(\theta) \quad (1)$$

S: girdap sayısı, d_h girdap üreteci merkez çapını, d_o girdap üreteci dış çapını ve θ girdap üreteci kanatçık açısıdır.

Sayısal modelin doğrulanmasında, yanma odasının dikey ekseni boyunca 113 mm, 213 mm ve 313 mm konumlarına yerleştirilen K ve B tipi ısıl çiftlerden elde edilen deneysel sıcaklık verileri kullanılmıştır [17]. Ancak yakıcının yanma odası içerisine uzanan geometrik yapısı nedeniyle, deneysel ölçümler 0 mm'den değil, alevin yakıcı çıkışından itibaren başlamaktadır. Buna karşılık sayısal modelde yanma süreci 0 mm'den başlatıldığından, deneysel ve sayısal veriler arasında eksenel bir referans farkı oluşmaktadır. Bu farkın giderilmesi için karşılaştırmalarda alev çıkış konumu esas alınmış ve deneysel ölçümlerin girdap üreteci çıkışına göre 63 mm'den başladığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda deneysel 113 mm, 213 mm ve 313 mm noktaları, sayısal modelde sırasıyla 63 mm, 163 mm ve 263 mm konumları ile eşleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda kullanılan sentetik yakıt karışımına ait

parametreler ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de verilmektedir.

Tablo 1. Sayısal analizlerde kullanılan yakıtlara ait parametreler (Parameters of the synthetic fuel mixtures used in the numerical analyses)

(%) CH_4	(%) H_2	(%) CO	H_2/CO	%O_2	Sayısal Çalışmalarda Kullanılan Değerler						
					Kütle Oranı CH_4	Kütle Oranı H_2	Kütle Oranı CO	Kütle Oranı O_2	Kütle Oranı N_2	Yakıt Kütle Akış Hızı (kg/s)	Hava Kütle Akış Hızı (kg/s)
25	56,25	18,75	H_2/CO :3	21	0,0210	0,0026	0,0736	0,2102	0,6924	0,000138	0,00128
				20	0,0201	0,0025	0,0705	0,2014	0,7053	0,000138	0,001342
				19	0,0193	0,0024	0,0673	0,1924	0,7183	0,000138	0,001411
				18	0,0183	0,0023	0,0642	0,1834	0,7316	0,000138	0,001487
				17	0,0174	0,0021	0,0610	0,1742	0,7450	0,000138	0,001572
25	40	35	H_2/CO :1,5	21	0,0216	0,0049	0,0454	0,2161	0,7118	0,000101	0,001306
				20	0,0207	0,0046	0,0434	0,2068	0,7242	0,000101	0,001370
				19	0,0197	0,0044	0,0414	0,1974	0,7368	0,000101	0,001440
				18	0,0188	0,0042	0,0394	0,1879	0,7494	0,000101	0,001518
				17	0,0178	0,0040	0,0374	0,1783	0,7622	0,000101	0,001605

2.1 Sayısal Model Kurulumu (Numerical Model Setup)

Türbülanslı yanma süreçlerinin sayısal olarak incelenmesinde, akış alanındaki hız, basınç, sıcaklık ve tür dağılımlarının belirlenmesinde Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri (RANS) kullanılmaktadır [19]: Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{2}$$

ρ akışkan yoğunluğu, uj ise zaman ortalama hız bileşenidir. Momentum Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i' u_j') \tag{3}$$

P basınç; $-\rho u_i' u_j'$ Reynolds gerilme tensörüdür. Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho u_j e)}{\partial x_j} = -P\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \sigma_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_t\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho D_t \sum_m h_m\left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_j}\right)\right] + S \tag{4}$$

e özgül iç enerji, Tsıcaklık, k_t türbülanslı ısıl iletkenliği, D_t türbülanslı difüzyon katsayısı, Y_m türlerin kütle kesri, h_m türlerin özgül entalpisi ve S kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan enerji kaynak terimidir. Bu çalışmada, dönme içeren akışlar, jet akışları, güçlü ters basınç gradyanı altındaki sınır tabakaları ve resirkülasyon bölgeleri içeren akışların modellenmesinde sıklıkla kullanılan realizable k–ε türbülans modeli kullanılmıştır [20-22]. Arghode ve ark. [23] tarafından yapılan çalışmada, türbülans modellemesinde realizable k–ε modeli standart duvar fonksiyonları ile birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada da benzer şekilde, giriş sınır şartı olarak hem hava hem de yakıt jetleri için türbülans şiddeti %5 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığı için de realizable k–ε türbülans modeli seçilmiştir [9,24]. Türbülans etkileri, kinetik enerji k ve türbülansın dağılma oranı ε olmak üzere iki denklemle çözülmektedir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon \tag{5}$$

$\boldsymbol{G_k}$ hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans üretimi, $\boldsymbol{G_b}$ kaldırma kuvveti etkisi, $\boldsymbol{\mu_t}$ türbülans viskozitesini ve $\boldsymbol{\sigma_k}$türbülans Prandtl sayısıdır. Türbülansın dağılma oranı için taşınım denklemi:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} \tag{6}$$

Girdap destekli yanma sistemlerinde güçlü türbülans ve resirkülasyon bölgeleri oluşturması sebebiyle bu çalışmada Species Transport ve Eddy Dissipation Model (EDM) yaklaşımı kullanılmıştır [21, 25] Species Transport denklemi:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v}Y_i) = -\nabla\cdot\vec{J_i} + R_i + S_i \tag{7}$$

$\boldsymbol{Y_i}$ türün kütle kesrini, $\boldsymbol{J_i}$ difüzyon akısını, $\boldsymbol{R_i}$ kimyasal reaksiyon hızını ve $\boldsymbol{S_i}$ kaynak terimidir. EDM'ye göre reaksiyon hızı:

$$R_i = \min\left(\frac{A\rho\varepsilon}{k}Y_{R'}, \frac{B\rho\varepsilon}{k}Y_P\right) \tag{8}$$

$\boldsymbol{A}$ ve $\boldsymbol{B}$ model sabitleri, $\boldsymbol{Y_R}$ reaktanların kütle kesrini ve $\boldsymbol{Y_P}$ürünlerin kütle kesridir. Yanma odasında radyasyonla olan ısı transferi etkisini modellemek amacıyla, reaksiyona giren türlerin (CO_2 ve H_2O)

etkisini daha doğru şekilde hesaplayan, geniş optik kalınlık aralığında güvenilir sonuçlar veren Discrete Ordinates (DO) radyasyon modeli kullanılmıştır [26,27]. Ansys Fluent'te kullanılan parametreler ise Tablo 2'de verilmiştir:

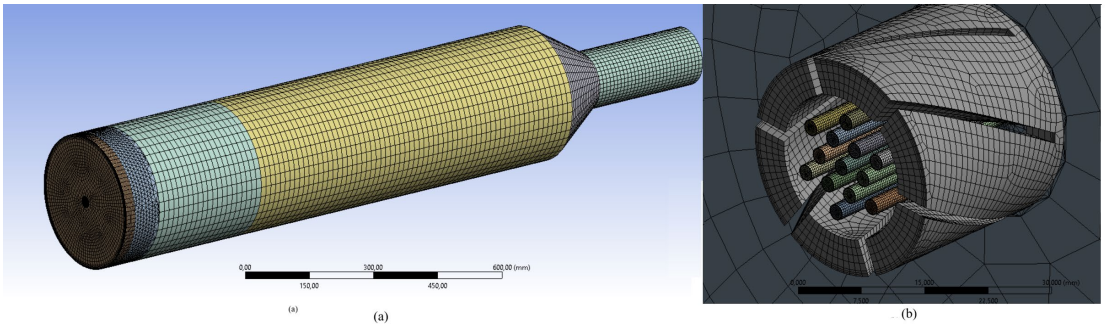
Tablo 2. Sayısal modellemede kullanılan denklemler ve parametreler (Equations and parameters used in the numerical model)

Kategori	Parametre	Değer	Kategori	Parametre	Değer
Yakıt özellikleri	Kullanılan yakıt	CH_4–H_2–CO (sentetik yakıt)	**Yakıcı özellikleri**	Yakıcı gücü	3 kW
	Eşdeğerlik oranı (ϕ)	0,7		Duvar kalınlığı	0,001 m
Yanma modeli	Yanma modeli	Species Transport + EDM		Taşınımsal ısı transfer katsayısı	40 W/m²K
	Türbülans modeli	Realizable k–ε	**Sayısal yöntem**	Çözücü	Pressure-based
	Duvar yaklaşımı	Standard wall function		Basınç–hız etkileşimi	Coupled
	Radyasyon modeli	Discrete Ordinates (DO)		Ayrıklaştırma yöntemi	Second-order upwind
Sınır şartları	Giriş sıcaklığı (yakıt/hava)	300 K		Gradyan yöntemi	Least squares cell based
	Duvar sıcaklığı	300 K		Basınç şeması	Standard
	Giriş gösterge basıncı	0 Pa	**Ağ yapısı**	Hücre sayısı	331482
	Türbülans yoğunluğu	%5			

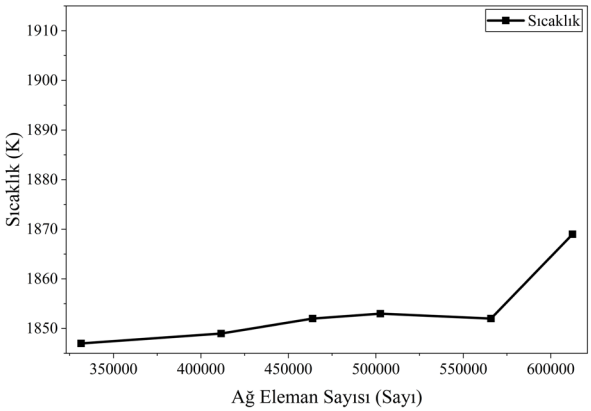
Çözümler basınç tabanlı çözücü ile elde edilmiş olup, bu yaklaşım düşük Mach sayısına sahip ve büyük ölçüde subsonik karakterde olan akışlar için uygunluğu nedeniyle tercih edilmiştir. Basınç–hız etkileşimi için "Coupled" algoritması kullanılmıştır. Ayrıklaştırma işlemlerinde second-order upwind şeması, sayısal difüzyonu azaltmak ve özellikle sıcaklık ile tür dağılımlarındaki keskin gradyentleri daha doğru temsil edebilmek amacıyla tercih edilmiştir. Gradyan hesaplamalarında, düzensiz ağ yapılarında daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağlaması nedeniyle "least squares cell-based" yöntemi kullanılmıştır.

Çözümün yakınsaması; süreklilik ve hız denklemleri için 10^{-5}, enerji denklemi için 10^{-6}, türbülans (k ve ε) ve tür taşınım denklemleri için 10^{-5} yakınsama kriterleri esas alınmıştır. Sınır şartları kapsamında, yakıt ve hava giriş sıcaklıkları ortam koşullarını temsil etmek amacıyla 300 K olarak belirlenmiştir. Duvar sıcaklığı, ısı kayıplarını dikkate almak ve gerçekçi sınır şartlarını sağlamak amacıyla 300 K'da sabit tutulmuştur. Giriş basıncı 0 Pa (gösterge basıncı) olarak tanımlanmış olup, bu durum atmosferik çalışma koşullarına karşılık gelmektedir. Girişte türbülans yoğunluğu %5 olarak alınmış olup, bu değer benzer yanma çalışmaları için yaygın olarak kullanılan türbülans seviyesini temsil etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan 3B yanma odası ağ yapısı ve girdap üreteci görünümü Şekil 1'de verilmektedir.

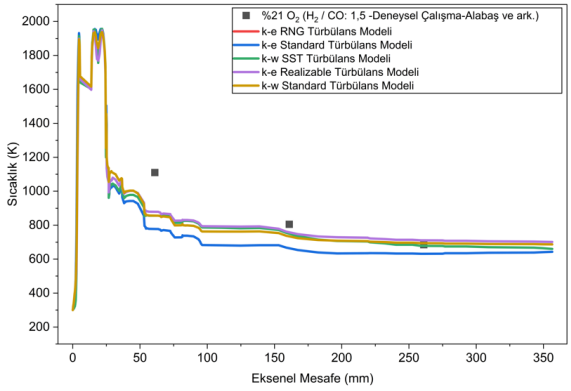


Şekil 1. (a) Yanma odası 3B ağ yapısı görünümü (b) girdap üreteci ağ yapısı ve giriş sınır şartı ((a) Three-dimensional mesh structure of the combustion chamber, (b) mesh structure of the swirl generator and inlet boundary conditions)



Şekil 2. Ağ bağımsızlaştırma grafiği (Mesh independence study)

Sonuçların kullanılan ağ yapısına (hücre boyutu ve yoğunluğu) bağlı olmadığını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilen ağ bağımsızlaştırma çalışmasında (Şekil 2**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**), 331482, 411569, 463884, 502601, 565833 ve 612440 olan ağ yapıları denenmiş, örnek bir model yanma şartında sıcaklıklar 1847 K, 1849 K, 1852 K, 1853 K, 1852 K ve 1869K olarak elde edilmiş, 331482 adet ağ elemanı çözüm pratikliği açısından kabul edilmiştir. Modelde, giriş bölgesinde akış gradyentlerini doğru yakalayabilmek için daha küçük elemanlar; yanma hacminde ise akış ve tür dağılımını daha iyi temsil etmek amacıyla tetrahedral elemanlar tercih edilmiştir. Geometri genelinde Quad/Tri ağ yapısı kullanılarak yüksek hız ve sıcaklık gradyentlerinin bulunduğu kritik bölgelerde çözüm hassasiyeti artırılmıştır. Hesaplama kolaylığı ve doğruluğu açısından kademeli geçiş yapıları tercih edilmiştir. Ağ kalite parametreleri olan en-boy oranı (aspect ratio) değeri 2,777 (1–20), ağ çarpıklığı (skewness) değerinin 0,21248 (0–0,25) ve ortogonallik kalitesi (orthogonal quality) değerinin 0,84612 (0,70–0,95) olarak elde edilmiş, tüm değerlerin literatürde önerilen aralıklarda yer aldığı belirlenmiştir [25].



Şekil 3. Türbülans modellerinin deneysel verilerle karşılaştırılması (Comparison of turbulence models with experimental data)

Şekil 3'te modellemede kullanılacak türbülans modeli gösterilmiştir. Deneysel verilere en yakın model "realizable k-Ɛ" olarak belirlenmiştir.

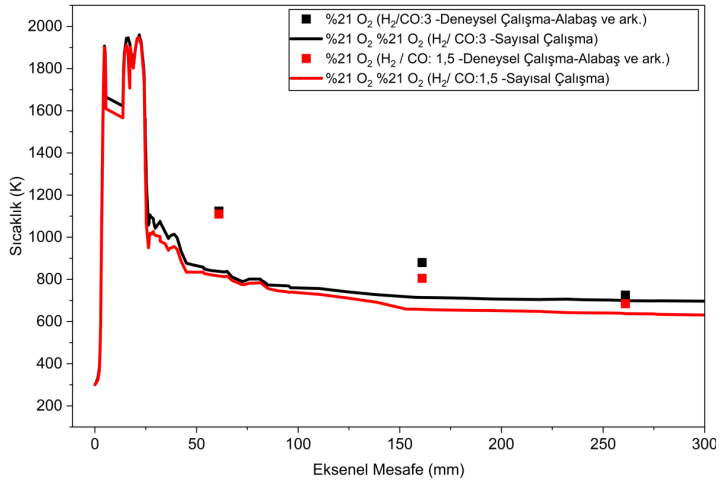
Sentetik yakıt karışımlarının yanma davranışını temsil etmek amacıyla, mikroskobik kimyasal ayrıntılardan ziyade makroskobik termal davranışının ortaya konması amaçlanmış; genel yanma karakteristiklerini tahmin etmede yaygın kullanılan CO oksidasyonu, CH_4 oksidasyonu ve H_2 oksidasyonunu içeren tek adımlı global reaksiyon mekanizmaları kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, yanma sürecinin temel kimyasal kinetiği yeterli doğrulukla temsil edilirken, hesaplama maliyetleri ve süreleri de makul seviyede tutulmuştur. Kullanılan reaksiyonlar ve sabitler Tablo 3'te verilmiştir. Reaksiyonlara ait hız sabiti $k = Ae^{-E_a/RT}$ denklemiyle hesaplanmıştır [28,29]. Yanma modellemesinde, türbülanslı akışlarda, özellikle tek adımlı reaksiyonların modellemesinde basitliği, yakınsama oranı ve doğruluğu nedeniyle yaygın olarak kullanılan Eddy Dissipation Model kullanılmıştır [30, 31, 32].

Tablo 3. Sayısal modellemede kullanılan global reaksiyon mekanizmaları ve kinetik sabitler (Global reaction mechanisms and kinetic constants used in the numerical model)

No	Reaksiyon Denklemi	A	n	Ea (J/kmol)
R1	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$5{,}012 \times 10^{16}$	0	$1{,}25 \times 10^{8}$
R2	$H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O$	$2{,}16 \times 10^{8}$	1,5	$3{,}43 \times 10^{7}$
R3	$CO + 0{,}5O_2 \rightarrow CO_2$	$2{,}24 \times 10^{12}$	0	$1{,}67 \times 10^{8}$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

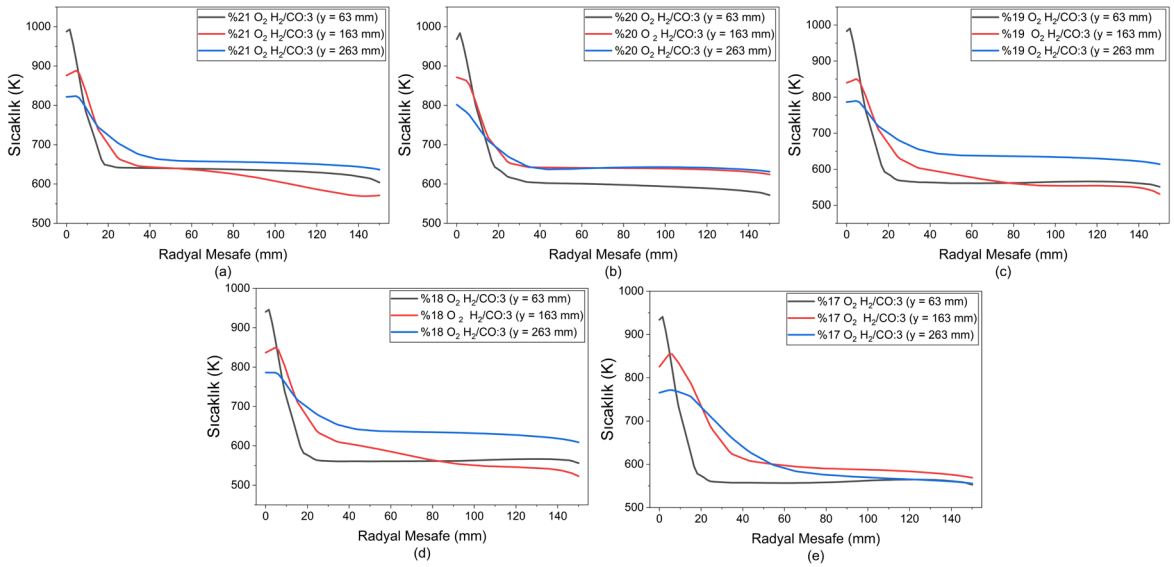
Sayısal modelin doğrulanmasına yönelik oluşturulan sıcaklık dağılım grafiği **Şekil** 4'te verilmektedir.



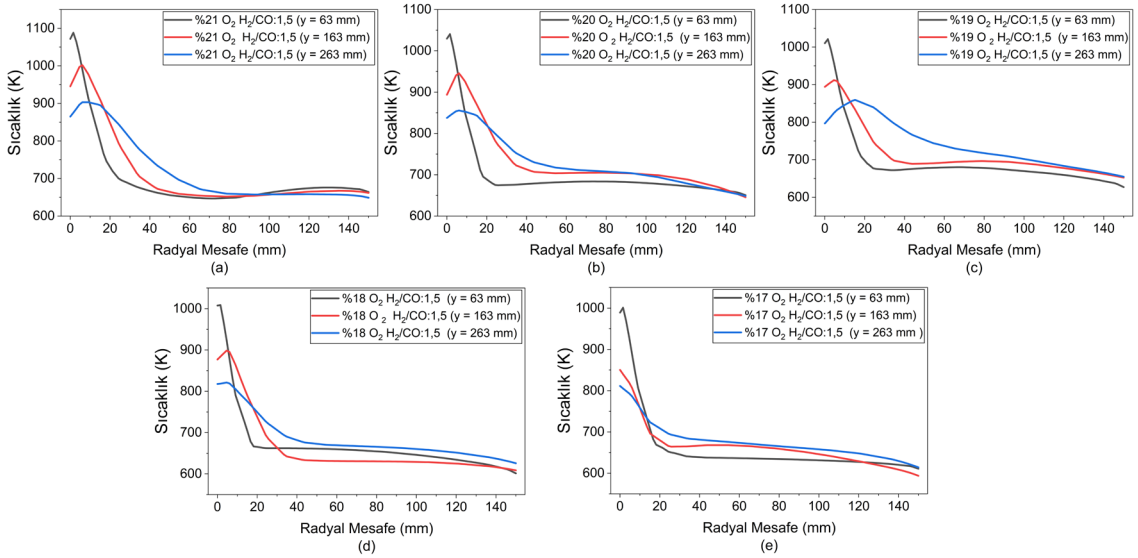
Şekil 4. H_2/CO: 3 ve H_2/CO: 1,5 olan sentetik yakıt karışımlarına ait sayısal sonuçların literatürle doğrulanması (Comparison of numerical predictions with experimental data reported in the literature for synthetic fuel mixtures with H_2/CO ratios of 3 and 1.5.)

Bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçların doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, modelleme sonucu elde eksenel sıcaklık dağılımları, literatürde Alabaş ve ark. [17] tarafından rapor edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, referans çalışmada kullanılan %21 O_2 koşullarında, CH_4, CO ve H_2 içeren ve H_2/CO oranları 3 ve 1,5 olan oranlardaki yakıt karışımları ve içerikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, tahmin edilen sonuçlar ile deneysel veriler arasında küçük farklılıklar gözlenmesine rağmen, modelin iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Modelde, deneysel 1800–1950 K civarında tepe sıcaklık değerleri elde edildiği görülmektedir.

Ön karışımın ve girdap üretecinin etkisiyle, reaksiyonların büyük kısmının yanma odasına girdikten hemen sonra ilk ölçüm noktası olan 63 mm civarında gerçekleştiği; yanma odasında 100 mm sonrasında hem sayısal hem de deneysel sonuçların birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bazı ölçüm noktalarındaki sapmanın sayısal modellemede kullanılan türbülans ve yanma parametrelerinden, ısı transfer modellerinden özellikle radyasyon modeline ilişkin kabuller ve kullanılan denklemlerin karmaşık yanma olayını tam olarak temsil edememesi gibi nedenlerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

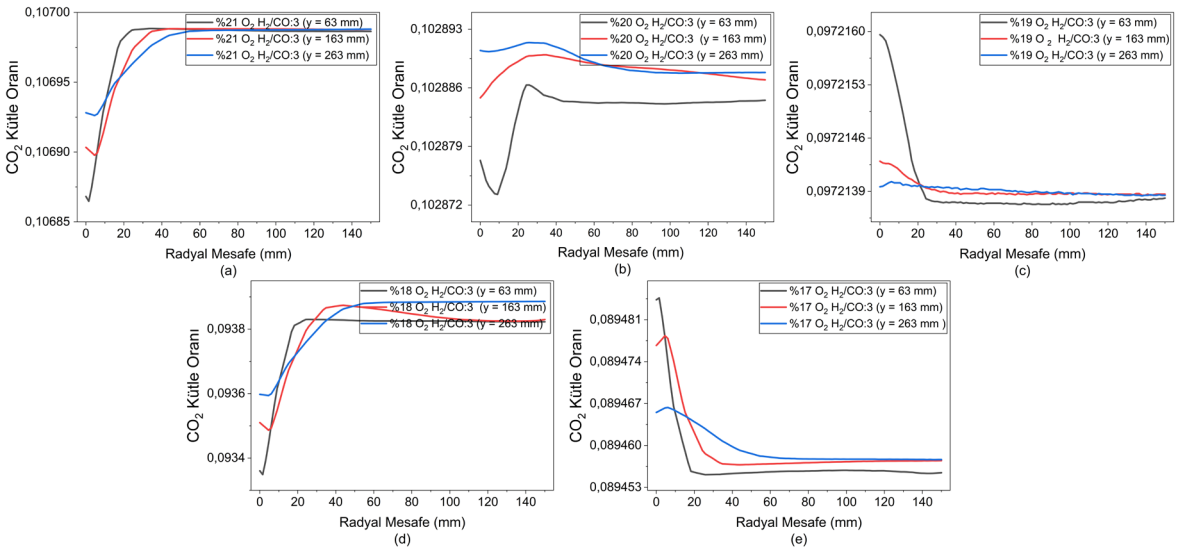


Şekil 5. H_2/CO: 3 olan sentetik yakıt karışımlarına ait radyal sıcaklık dağılımları (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 (Radial temperature distributions for the H_2/CO = 3 synthetic fuel mixture: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

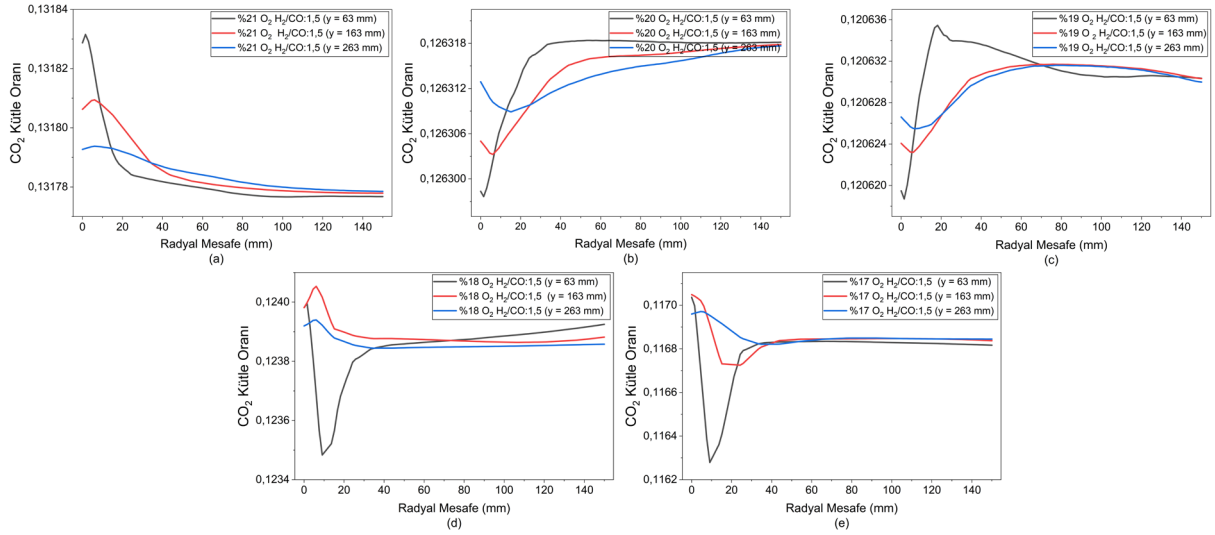


Şekil 6. H_2/CO: 1,5 olan sentetik yakıt karışımlarına ait radyal sıcaklık dağılımları (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 (Radial temperature distributions for the H_2/CO = 1.5 synthetic fuel mixture: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

Şekil 5'te H_2/CO:3 ve Şekil 6'da H_2/CO:1,5 sentetik yakıtların radyal sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. H_2/CO:3 oranında sıcaklık değeri ~1000 K değeriyle %21 O_2 oranında gerçekleşmişken, %17 O_2 oranına doğru sıcaklık değerlerinin ~950 K elde edildiği görülmektedir. H_2/CO:1,5'te ise sıcaklık değeri %21 O_2 ~1100 K, %17 O_2 değerinde ~975 K elde edilmiştir. Yanma odası 63 mm civarında sıcaklık farkları belirginken, 163 mm civarında eğriler birbirine yaklaşmaya başlamıştır. 263 mm civarındaysa ise birbirine yakın, homojen bir dağılım görülmektedir. Ayrıca sıcaklık profillerinin merkez bölgesinde ($r \approx 0$–20 mm) maksimum değerlere ulaştığı ve radyal mesafe arttıkça şekilde azaldığı görülmektedir. O_2 oranının azalmasıyla birlikte maksimum sıcaklık değerlerinde gözlenen düşüşün, tepkimelerdeki reaksiyon hızlarının yavaşlaması şeklinde açıklanmaktadır. Ayrıca yüksek H_2/CO oranında hidrojenin yüksek difüziviteye sahip olması nedeniyle alevin radyal yönde yayılmasına ve enerji salınımının daha geniş bir hacme dağılmasına yol açtığını; buna karşın, daha düşük H_2/CO oranında enerji daha dar bir bölgede yoğunlaşarak daha yüksek lokal sıcaklık tepe değerlerine yol açtığı söylenebilmektedir. Yanma odası boyunca sıcaklık farklarının azaldığı, daha homojen bir yapı oluştuğu görülmektedir.

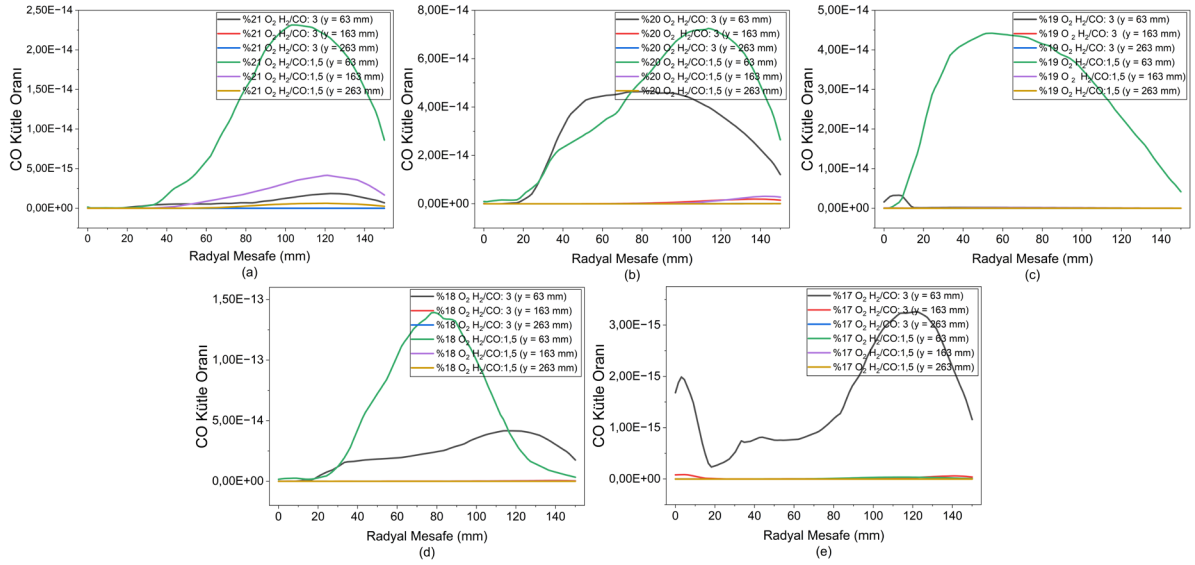


Şekil 7. a) H_2/CO: 3 olan sentetik yakıt karışımı (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 koşullarında karışımlarına ait radyal CO_2 kütle dağılımı (Radial CO_2 mass fraction distributions for the H_2/CO = 3 synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)



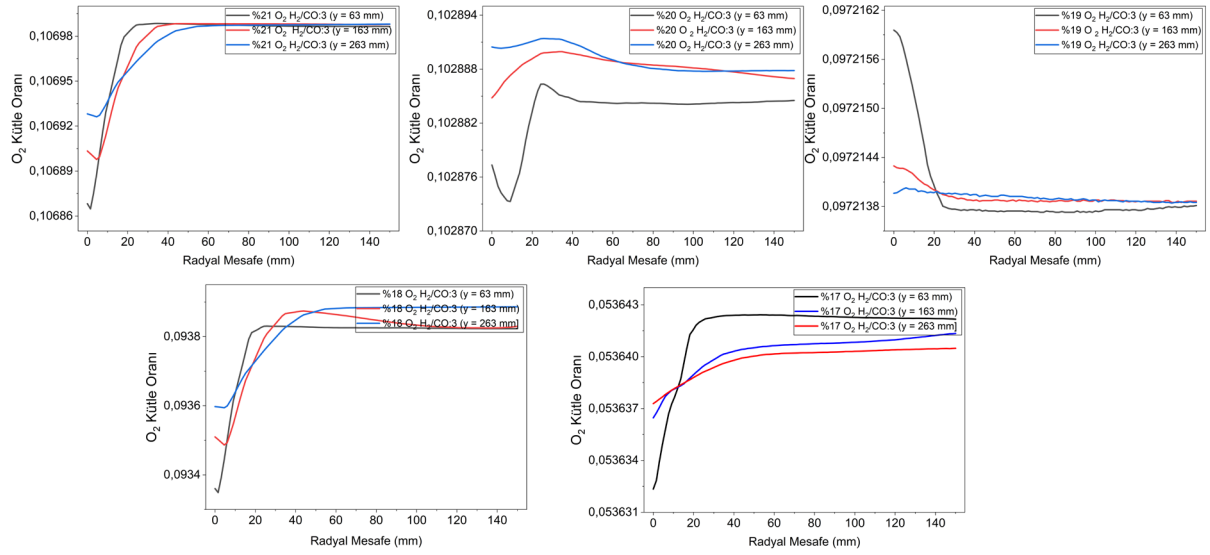
Şekil 8. a) H_2/CO: 1,5 olan sentetik yakıt karışımı (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 koşullarında karışımlarına ait radyal CO_2 kütle dağılımı (Radial CO_2 mass fraction distributions for the H_2/CO = 1.5 synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

Şekil 7'de H_2/CO: 3 ve Şekil 8'de H_2/CO: 1,5 sentetik yakıt karışımlarının radyal CO_2 kütle oranı dağılımları gösterilmektedir. CO_2 emisyonu genel olarak merkez bölgeye yakın keskin değişimler gösterdiği ve radyal mesafe arttıkça daha kararlı halde geldiği görülmektedir. Akış yönünde ilerledikçe CO_2 emisyonu azalmıştır. Ayrıca O_2 oranı azaldığında, CO_2 oranının da azaldığı gözlenmiştir. CO_2 emisyonu H_2/CO=1,5 oranına sahip yakıt karışımında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %21 O_2 koşulunda yaklaşık 0,132 seviyesinde olan CO_2 oranı, H_2/CO=3 karışımında yaklaşık 0,107 seviyesinde kalmıştır. Bu farkın, düşük H_2 içeriğine sahip karışımlarda karbon oranının artmasına bağlı olarak CO oksidasyonu sonucu daha fazla CO_2 oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

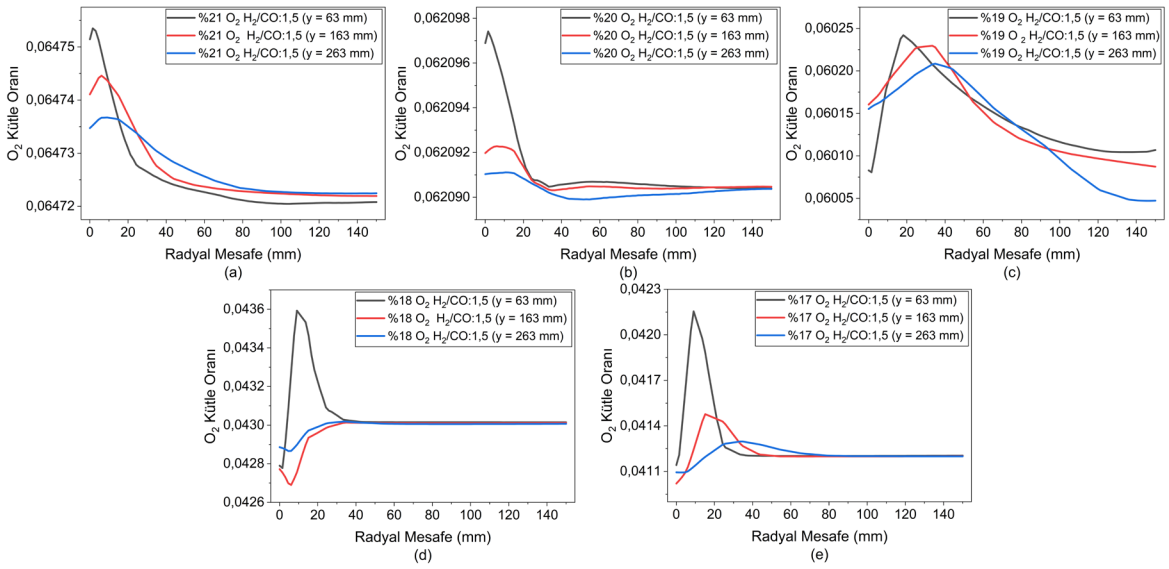


Şekil 9. $H_2/CO = 3$ ve $H_2/CO = 1,5$ sentetik yakıt karışımlarının farklı O_2 konsantrasyonlarındaki radyal CO kütle oranı dağılımları: (a) %21 O_2, (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2 ve (e) %17 O_2 (Radial CO mass fraction distributions for $H_2/CO = 3$ and $H_2/CO = 1.5$ synthetic fuel mixtures at different O_2 concentrations)

Şekil 9' da H_2/CO: 3 ve 1,5 olan sentetik yakıt karışımlarının radyal CO kütle oranı dağılımları gösterilmektedir. Genel olarak, CO emisyonu en yüksek değerlerine yanma bölgesine en yakın konumda (y = 63 mm) ulaşmış, yanma odası boyunca eksenel mesafe arttıkça CO seviyelerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bu durumun CO oksidasyonu sonucu CO_2'ye dönüştüğü şeklinde değerlendirilmektedir. Tüm O_2 konsantrasyonlarında H_2/CO=3 oranına sahip yakıt karışımında CO oluşumunun H_2/CO=1,5 oranına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

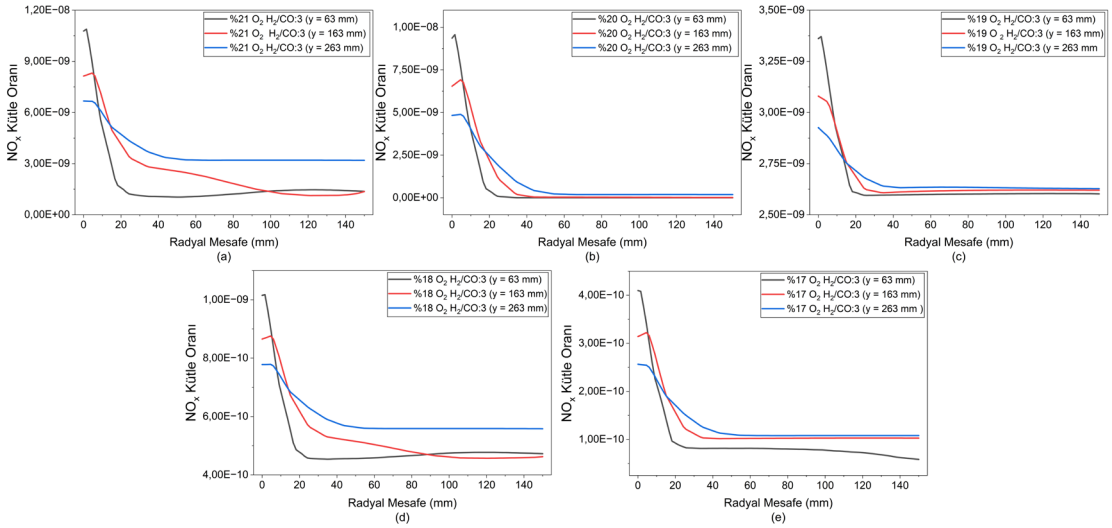


Şekil 10. H_2/CO: 3 olan sentetik yakıt karışımı (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 karışımlarına ait radyal O_2 kütle dağılımı (Radial O_2 mass fraction distributions for the $H_2/CO = 3$ synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

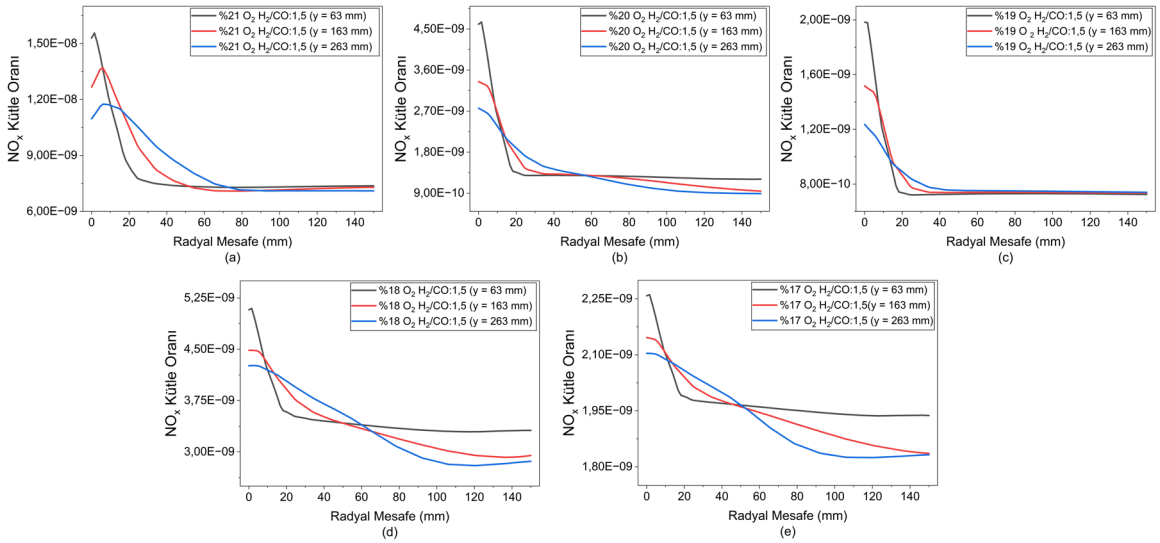


Şekil 11. H_2/CO: 1,5 olan sentetik yakıt karışımı (a) %21 O_2 , (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 karışımlarına ait radyal O_2 kütle dağılımı (Radial O_2 mass fraction distributions for the H_2/CO = 1.5 synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

Şekil 10'da ve **Şekil** 11'de H_2/CO: 3 ve H_2/CO: 1,5 sentetik yakıt karışımlarının radyal O_2 kütle oranı dağılımları gösterilmektedir. Özellikle 0–30 mm aralığında O_2 kütle oranında belirgin değişimler gözlenmiş olup, bu bölgenin reaksiyon ve karışımın en yoğun gerçekleştiği bölge olduğu; radyal mesafe artıkça tüketim stabil hale geldiği görülmektedir. Şekil 10'da O_2 kütle oranının, O_2 konsantrasyonu %21'den %17'ye doğru azaltıldıkça kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Yüksek O_2 konsantrasyonlarında (%21 ve %20), ortamda yeterli oksitleyici bulunmasının yüksek reaksiyon kinetiği nedeniyle daha hızlı gerçekleştiği ve O_2 tüketimi yüksek olmasına rağmen sistem genelinde O_2 seviyesi görece yüksek kaldığı görülmektedir. Buna karşılık, O_2 konsantrasyonu azaldıkça (%19, %18 ve özellikle %17), başlangıçtaki O_2 seviyesi düşük olduğundan reaksiyonların daha sınırlı gerçekleştiği ve sistem genelinde daha düşük O_2 kütle oranları elde edildiği şeklinde yorumlanmıştır. H_2/CO = 3 durumunda O_2 tüketiminin daha geniş bir bölgede gerçekleştiği ve O_2 profillerinin daha yayvan bir dağılım sergilediği, H_2/CO = 1,5 oranında merkez bölgede daha keskin O_2 gradyanları ve ani değişim gösterdiği görülmektedir. Bu durum, düşük H_2 içeriğine sahip karışımlarda reaksiyon bölgesinin daha dar bir alanda yoğunlaştığını ve O_2 tüketiminin daha lokal bir karakter sergilediğini göstermektedir.



Şekil 12. H_2/CO = 3 sentetik yakıt karışımı için farklı O_2 konsantrasyonlarında radyal NO_x kütle oranı dağılımları: (a) %21 O_2, (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2 ve (e) %17 O_2 (Radial NO_x mass fraction distributions for the H_2/CO = 3 synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)



Şekil 13. H_2/CO: 1,5 olan sentetik yakıt karışımı (a) %21 O_2, (b) %20 O_2, (c) %19 O_2, (d) %18 O_2, (e) %17 O_2 karışımlarına ait radyal NO_x kütle dağılımı (Radial NO_x mass fraction distributions for the H_2/CO = 1.5 synthetic fuel mixture at different O_2 concentrations: (a) 21% O_2, (b) 20% O_2, (c) 19% O_2, (d) 18% O_2, and (e) 17% O_2)

Şekil 12'de H_2/CO: 3 ve Şekil 13'te H_2/CO: 1,5 sentetik yakıt karışımlarının radyal NO_x kütle oranı dağılımları gösterilmektedir. Her iki oranda da NOx oluşumunun yüksek sıcaklıkların görüldüğü bölgelerde arttığı, sıcaklığın azalmasıyla birlikte oluşum hızının düştüğü değerlendirilmektedir. RDY koşullarının başarılmasıyla, NOx seviyelerinin düştüğü gözlenmiştir. Yüksek O_2 oranında NOx oluşumunun ısıl NOx oluşumu reaksiyonu yoluyla gerçekleştiği değerlendirilmektedir.

4.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada farklı oksijen oranları (%21-%17 O_2) ve farklı H_2/CO oranları (3 ve 1,5) için sıcaklık, O_2, CO, CO_2 ve NO_x dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarda, gerçekleşen reaksiyonların girdap üretecinin de etkisiyle de genel olarak merkezde, r = 0–40 mm radyal mesafe, akış yönünde ise yaklaşık 0–100 mm eksenel mesafe aralığında yoğunlaştığı görülmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde, O_2 oranındaki değişiminin; sıcaklık ve CO, CO_2, O_2 ve NO_x emisyonları üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. O_2 konsantrasyonunun %21'den %17'ye azalmasıyla birlikte maksimum sıcaklıkların düştüğü (≈1100 K → 975 K) ve sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği belirlenmiştir. Ayrıca 150 mm sonrası bölgede sıcaklık ve tür dağılımlarının sabitlenmesi, RDY rejiminin karakteristik homojen yapısını doğrulamaktadır. RDY teknolojisinin başlıca hedeflerinden biri, yanma odası içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamaktır. Elde edilen radyal sıcaklık profilleri O_2 konsantrasyonunun azalmasıyla birlikte daha homojen bir termal alanın oluştuğunu ortaya koymaktadır.

CO kütle oranı dağılımları incelendiğinde, tüm O_2 konsantrasyonlarında maksimum CO değerlerinin reaksiyon bölgesine en yakın konum olan 63 mm'de elde edildiği ve eksenel mesafe arttıkça CO seviyelerinin hızla azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, CO'nun akış boyunca ilerledikçe oksidasyon reaksiyonları ile CO_2'ye dönüştüğünü göstermektedir. H_2/CO=3 oranına sahip yakıt karışımında CO kütle oranının H_2/CO=1,5 karışımına kıyasla daha yüksek gerçekleşmesi, yüksek hidrojen içeriğine sahip karışımlarda reaksiyon bölgesinin daha geniş bir hacme yayılması ve RDY koşullarına bağlı olarak sıcaklık seviyelerinin düşmesi ile açıklanmaktadır. Bu koşullar altında CO oksidasyon reaksiyonları kinetik olarak sınırlanmakta; diğer bir ifadeyle, düşük sıcaklık ve yüksek seyreltme etkisi CO'nun CO_2'ye dönüşüm hızını azaltarak sistem içerisinde daha yüksek CO seviyelerinin oluşmasına yol açmaktadır. NO_x emisyonları açısından değerlendirildiğinde ise, O_2 konsantrasyonunun azaltılmasıyla birlikte belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, RDY rejiminin karakteristik özelliği olan düşük sıcaklık ve yayılı reaksiyon bölgesi sayesinde termal NO_x oluşum mekanizmasının baskılanması ile açıklanmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, mevcut HAD modelinin tahmin kabiliyetinin artırılması amacıyla, özellikle $CH_4/H_2/CO$ karışım yakıtlar için tek adımlı global reaksiyon mekanizmaları yerine ayrıntılı kimyasal kinetiklerin kullanılması önerilmektedir. Bu mekanizmalarla gelişmiş türbülans–kimya etkileşimi modellerinin kullanılması, alev yapısı ve NOx oluşumunun daha doğru tahmin edilmesini sağlayabilecektir. Bununla birlikte, farklı oksijen konsantrasyonları, eşdeğerlik oranları ve giriş koşulları altında yapılacak deneysel doğrulamalar, sayısal sonuçların güvenilirliğini artıracaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, bu araştırma süresince sağladığı destekten dolayı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'ye (TUSAŞ) teşekkürlerini sunar. / The authors gratefully acknowledge Turkish Aerospace Industries (TAI) for its support during this research.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Sevgi FETTAH*:** sayısal modelleme çalışmalarını yürütmüş, elde edilen verileri analiz etmiş, sonuçları yorumlamış ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

She conducted the numerical modeling studies, analyzed the obtained data, interpreted the results, and prepared the manuscript.

Serhat KARYEYEN: Modelleme çalışmasını planlamış, araştırma sürecini yönlendirmiş ve makalenin incelenmesi ile düzenlenmesine katkı sağlamıştır.

He conceived and planned the modelling study, supervised the research process, and contributed to the review and editing of the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Khalil, A.E., Gupta, A.K., 2017. Acoustic and heat release signatures for oxy-fuel swirl assisted distributed combustion. Applied Energy, 193, 125–138. https://doi.org: 10.1016/j.apenergy.2017.02.030.

[2] Selvam, C., Devarajan, Y., Nagappan, B., et al., 2025. Sustainable fuel solutions: a comprehensive review of syngas in internal combustion engines. Chemical Papers, 79, 019–4027. https://doi.org/10.1007/s11696-025-04069-6.

[3] Bouziane, A., Cozzi, F., Lahcene, A., Aminallah, M., Khalfi, A., Coghe, A., 2008. Experimental results on swirl-stabilized syngas flames by transverse fuel injection. International Journal of Thermal Sciences, 47(2), 137–142.

[4] Khalil Hasan, A.E.E.D., 2013. Investigation of Colorless Distributed Combustion (CDC) with Swirl for Fuel Flexible Gas Turbine Combustors. PhD Dissertation, University of Maryland.

[5] Karyeyen, S., Feser, J.S., Gupta, A.K., 2019. Hydrogen concentration effects on swirl-stabilized oxy-colorless distributed combustion. Fuel, 253, 772–780. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.008.

[6] Yılmaz, H., Yılmaz, İ., 2019. Combustion and emission characteristics of premixed $CNG/H_2/CO/CO_2$ blending synthetic gas flames in a combustor with variable geometric swirl number. Energy, 172, 117–133. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.153.

[7] Çam, Ö., 2019. Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

[8] Türkkahraman, Z., Alabaş, B., 2026. Effect of oxy-fuel combustion on temperature, flame speed and NOx emission values of methane-ammonia flames in a model gas turbine combustor. Fuel, 422, 139138. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.139138.

[9] İlbaş, M., Karyeyen, S., 2015. A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. International Journal of Hydrogen Energy, 40(44), 15218–15226. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.141.

[10] Salem, E., 2018. Numerical Simulations of Premixed Flames of Multi-Component

Fuels/Air Mixtures and Their Applications. M.S. Thesis, University of Kentucky.

[11] Habib, M.A., Mokheimer, E.M.A., Sanusi, S.Y., Nemitallah, M.A., 2014. Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200MW package boiler. Energy Conversion and Management, 83, 296–305. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.056.

[12] Ammar, N.R., Farag, A.I., 2016. CFD modeling of syngas combustion and emissions for marine gas turbine applications. Polish Maritime Research, 23(3), 39–49. https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0030.

[13] Chen, Z., Li, Y., Wang, J., Zhang, X., 2024. Experimental and numerical investigation of CO/H_2 synthetic fuel combustion in a micromix swirl combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 49, 15432–15445. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.243.

[14] Kümük, O., 2025. Colorless distributed combustion effects on hydrogen-enriched methane fuels combustion in a laboratory-scale combustor. Fuel, 381, 133590. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133590.

[15] Costa, M., Giacomazzi, A., De Iuliis, S.F., 2024. Numerical investigation of combustion characteristics of H_2/CO synthetic fuel blends using CFD modelling. Energies, 17(3). https://doi.org/10.3390/en17030674.

[16] Ashini, H., Tabejamaat, S., Bastani, M., 2025. Experimental and numerical study on combustion of biogas/lean-hydrogen syngas mixtures in a microturbine combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 102, 1–19. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.001.

[17] Alabaş, B., Tunç, G., Taştan, M., Yılmaz, İ., 2020. Experimental investigation of the oxygen enrichment in synthetic gases flames. Fuel, 270, 117482. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117482

[18] Cheng, R.K., 2006. Low swirl combustion. In: The Gas Turbine Handbook. National Energy Technology Laboratory, USA, pp. 241–255.

[19] Turns, S.R., 2000. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, 2nd ed. McGraw-Hill.

[20] Van den Broek, S.A.W., 2017. Towards flameless combustion in gas turbine engines. M.Sc. Thesis, Delft University of Technology.

[21] ANSYS Inc., 2010. ANSYS Fluent Theory Guide – Turbulence Modeling. https://www.academia.edu/36090206/Lecture_7_Turbulence_Modeling_Introduction_to_ANSYS_Fluent, erişim 18.03.2026.

[22] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., 1995. A new k–ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. Computers & Fluids, 24, 227–238.

[23] Arghode, V.K., Gupta, A.K., 2011. Hydrogen addition effects on methane–air colorless distributed combustion flames. International Journal of Hydrogen Energy, 36, 6292–6302.

[24] Yılmaz, H., 2020. Assessment of combustion and emission characteristics of various gas mixtures under different combustion techniques. International Journal of Energy Studies, 5(1), 13–41. https://izlik.org/JA38UR24NP.

[25] ANSYS Inc., 2010. ANSYS Meshing User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=////////Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/msh_book_wb.html erişim 18.03.2026.

[26] Modest, M.F., 2013. Radiative Heat Transfer, 3rd ed. Elsevier.

[27] Peng, Q., Lou, X., Wu, X., Zhang, Y., Ma, C., Hu, F., et al., 2026. Progress in CFD numerical study on hydrogen and its blended homogeneous fuels combustion. International Journal of Hydrogen Energy. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153806.

[28] Arrhenius, S., 1889. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 4, 226–248. https://doi.org/10.1515/ZPCH-1889-0116.

[29] Westbrook, C.K., Dryer, F.L., 1981. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. Combustion Science and Technology, 27, 31–43. https://doi.org/10.1080/00102208108946970.

[30] Wang, P., 2016. The model constant A of the Eddy Dissipation Model. Progress in Computational Fluid Dynamics, 16(2). https://doi.org/10.1504/PCFD.2016.075154.

[31] Halouane, Y., Debhi, A., 2017. CFD simulations of premixed hydrogen combustion using the Eddy dissipation and the turbulent flame closure models. International Journal of Hydrogen Energy, 42, 21990–22004. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.075.