



Doğal Gazlı Isıtma Cihazlarında Hidrojen Kullanımının Performansa Etkisi

Doğukan KARACA^{1*}, Tayfun MENLİK²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara
e-posta : dogukankaraca@outlook.com,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-3454-786X>

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara
e-posta : tmenlik@gazi.edu.tr,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0970-6600>

Anahtar Kelimeler

Öz

Hidrojen oranı, Kompozit yakıt, Yanma analizi, Emisyon

Küresel enerji dönüşümü sürecinin hız kazanmasıyla birlikte, fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ve sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması günümüzün en kritik mühendislik problemleri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, temiz enerji taşıyıcısı olarak önemi artan hidrojen, mevcut enerji altyapısına entegrasyonu açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu çalışmada, hidrojenin doğal gazla belirli oranlarda karıştırılmasının bir kombi ısıtıcısının yanma karakteristiği, emisyon performansı ve malzeme uyumluluğu üzerindeki etkileri araştırılmış ve sistem performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, bir yanma odası geometrisi referans alınarak, farklı ısı güç seviyeleri ve hava fazlalık katsayıları altında hidrojen-metan kompozit yakıtının yanma süreçleri sayısal olarak incelenmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilen modellemede, türbülanslı akış koşulları ve kimyasal reaksiyon mekanizmaları birlikte ele alınmıştır. Bu çerçevede, yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları, hız alanları ve NO_x oluşum bölgeleri sistematik bir yaklaşımla modellenmiştir. Elde edilen veriler, kompozit yakıtın yanma verimine etkilerini ortaya koymak ve optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Hidrojenin yüksek reaksiyon hızı, geniş tutuşma sınırları ve düşük karbon içeriği, yanma verimini artırırken karbon kaynaklı emisyonların önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamıştır. Kompozit yakıttaki hidrojen oranının artışına bağlı termal etkiler, malzeme davranışları ve alev yapısındaki değişimler yüzdesele olarak değerlendirilmiştir. Sayısal analizler sonucunda, hacimsel hidrojen oranının %0'dan %40'a yükselmesiyle maksimum alev sıcaklığının %5 oranında arttığı, CO₂ emisyonlarının %59 oranında azaldığı, buna karşın NO_x emisyonlarının 15,93 ppm'den 58,57 ppm'e yükseldiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, 48,09 MJ/m³ Wobbe indeksi değeriyle uluslararası standartların kabul edilebilir aralığında kalan hacimsel %20 hidrojen karışım oranı, mevcut sistem bileşenlerinde yapısal modifikasyon gerektirmeksizin uygulanabilecek optimum çalışma noktası olarak tespit edilmiştir.

* dogukankaraca@outlook.com

doi : 10.46399/muhendismakina.1835424



The Effect of Hydrogen Usage on Performance in Natural Gas Heating Appliances

Keywords

Hydrogen ratio, composite fuel, combustion analysis, Emission

Abstract

With the acceleration of the global energy transition, reducing fossil fuel dependency and limiting greenhouse gas emissions have become among the most critical engineering challenges of our time. In this context, hydrogen, whose importance as a clean energy carrier is increasing, constitutes a significant research area in terms of its integration into existing energy infrastructure. In this study, the effects of blending hydrogen with natural gas at specific ratios on the combustion characteristics, emission performance, and material compatibility of a domestic boiler were investigated, with the aim of improving system performance. Within the scope of this study, the combustion processes of hydrogen-methane composite fuel were numerically examined under various thermal power levels and excess air ratios, taking a combustion chamber geometry as reference. In the modeling performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) based software, turbulent flow conditions and chemical reaction mechanisms were addressed simultaneously. Within this framework, temperature distributions, velocity fields, and NO_x formation zones inside the combustion chamber were modeled through a systematic approach. The obtained data were evaluated to reveal the effects of composite fuel on combustion efficiency and to determine optimum operating conditions. The high reaction rate, wide flammability limits, and low carbon content of hydrogen contributed to enhancing combustion efficiency while significantly reducing carbon based emissions. The thermal effects, material behaviors, and flame structure variations arising from the increase in hydrogen ratio in the composite fuel were evaluated in percentage terms. Numerical analyses revealed that as the volumetric hydrogen ratio increased from 0% to 40%, the maximum flame temperature increased by 5%, CO₂ emissions decreased by 59%, while NO_x emissions increased from 15.93 ppm to 58.57 ppm. Consequently, a volumetric 20% hydrogen blending ratio, with a Wobbe Index of 48.09 MJ/m³ compliant with international standards, was identified as the optimal operating point that can be implemented without requiring structural modifications to existing system components.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 03.12.2025

Submission Date : 03.12.2025

Kabul Tarihi : 06.01.2026

Accepted Date : 06.01.2026

Extended Abstract

Introduction

A two-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) model was developed to simulate the combustion processes of hydrogen-methane composite fuels in a representative domestic boiler combustion chamber. The combustion chamber geometry was based on a typical 25 kW residential combi heater configuration, featuring a 4 mm nozzle diameter, 1200 mm length, and 200 mm width. The symmetrical burner arrangement allowed for simplified computational domain while maintaining physical representativeness. The Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulence model was employed to capture the turbulent flow characteristics, providing accurate predictions of near-wall behavior and free-stream turbulence. The radiation heat transfer was modeled using the P1 radiation model. The combustion process was simulated using the Probability Density Function (PDF) model coupled with the species transport equations.

Simulations were conducted at constant total mass flow rate with varying hydrogen content (0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by volume) and three excess air coefficients ($\lambda = 1.0, 1.1, \text{ and } 1.2$), resulting in 15 distinct operating scenarios. The stoichiometric air requirements were calculated for each mixture composition, and corresponding inlet boundary conditions were defined accordingly. Temperature distributions, velocity fields, turbulent kinetic energy, total pressure, and species concentrations (CO_2 , CO, NO_x) were systematically extracted and analyzed. The convergence of solutions was verified through residual monitoring for continuity, momentum, energy, turbulence, and species transport equations.

Objectives

The primary objective of this study was to investigate the effects of hydrogen blending with natural gas at various ratios on the combustion characteristics, emission performance, and material compatibility of a domestic combi heater through numerical analysis. Specifically, the study aimed to analyze the influence of hydrogen addition (0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by volume) on flame temperature distribution, velocity fields, and turbulence characteristics within the combustion chamber. Additionally, the emission behavior, particularly NO_x , CO_2 , and CO concentrations, was evaluated under different hydrogen blending ratios and excess air coefficients ($\lambda = 1.0, 1.1, \text{ and } 1.2$). The study also sought to determine the optimal hydrogen blending ratio that achieves improved combustion efficiency and reduced carbon emissions without requiring structural modifications to existing system components. Furthermore, the thermal loading implications on typical combustor materials (stainless steel, Al-Si alloys, brass) were assessed to identify safe operational boundaries for hydrogen-enriched natural gas utilization.

Methods

A two-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) model was developed to simulate the combustion processes of hydrogen-methane composite fuels in a representative domestic boiler combustion chamber. The combustion chamber geometry was based on a typical 25 kW residential combi heater configuration, featuring a 4 mm nozzle diameter, 1200 mm length, and 200 mm width. The symmetrical burner

arrangement allowed for simplified computational domain while maintaining physical representativeness. The Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ turbulence model was employed to capture the turbulent flow characteristics, providing accurate predictions of near-wall behavior and free-stream turbulence. The radiation heat transfer was modeled using the P1 radiation model. The combustion process was simulated using the Probability Density Function (PDF) model coupled with the species transport equations.

Simulations were conducted at constant total mass flow rate with varying hydrogen content (0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by volume) and three excess air coefficients ($\lambda = 1.0, 1.1, \text{ and } 1.2$), resulting in 15 distinct operating scenarios. The stoichiometric air requirements were calculated for each mixture composition, and corresponding inlet boundary conditions were defined accordingly. Temperature distributions, velocity fields, turbulent kinetic energy, total pressure, and species concentrations (CO_2 , CO , NO_x) were systematically extracted and analyzed. The convergence of solutions was verified through residual monitoring for continuity, momentum, energy, turbulence, and species transport equations.

Results and Discussions

The numerical analysis revealed significant effects of hydrogen enrichment on combustion characteristics and emission behavior across all investigated operating conditions. Flame temperatures exhibited a systematic increase with rising hydrogen content at $\lambda = 1.0$, the maximum flame temperature increased from 1966°C (pure methane) to 2066°C (40% H_2), representing approximately a 5% increase. This temperature rise was attributed to hydrogen's higher adiabatic flame temperature and enhanced reaction kinetics. The excess air coefficient effectively moderated temperature peaks, with $\lambda = 1.2$ producing temperatures approximately $10\text{-}15^\circ\text{C}$ lower than stoichiometric conditions across all mixture compositions.

Hydrogen addition substantially influenced the flow field dynamics. The total pressure increased from 68.2 Pa (0% H_2) to 231.2 Pa (40% H_2) at $\lambda = 1.0$, reflecting the higher volumetric flow rates required to maintain constant mass flow with lower-density hydrogen-enriched mixtures. Turbulent kinetic energy exhibited a pronounced increase, rising from $25.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ to $385.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ as hydrogen content increased from 0% to 40%. This enhancement in turbulence intensity improved mixing quality but introduced potential stability concerns at higher hydrogen fractions.

Regarding emission performance, CO_2 emissions decreased systematically with increasing hydrogen content, from 0.138 (mass fraction) at 0% H_2 to 0.057 at 40% H_2 , directly corresponding to the reduced carbon content in the fuel mixture. Similarly, CO emissions showed a declining trend, indicating improved combustion completeness facilitated by hydrogen's enhanced reactivity. However, NO_x emissions exhibited an increasing trend with hydrogen enrichment, rising from 15.93 ppm (0% H_2) to 58.57 ppm (40% H_2) at $\lambda = 1.0$. This increase was attributed to the elevated flame temperatures exceeding 1800°C , which accelerate thermal NO_x formation through the Zeldovich mechanism. Increasing the excess air coefficient partially mitigated this effect at $\lambda = 1.2$, NO_x levels were reduced by approximately 10-15% compared to

stoichiometric conditions for equivalent hydrogen contents.

The analysis identified approximately 20% hydrogen blending as the optimal operating point, balancing multiple performance criteria. At this ratio, flame temperature increases remained within acceptable bounds (approximately 2-5% above pure methane), and turbulence characteristics maintained stable patterns. From a burner design perspective, fuels with similar Wobbe Index values are considered compatible without requiring significant modifications to fundamental parameters such as air-fuel ratio, nozzle diameter, and gas pressure. However, when the Wobbe Index decreases substantially, combustion stability issues may emerge, including variations in flame length and speed, deviations in flame temperature and NO_x formation potential due to carbon/hydrogen ratio changes, and risks of flashback or flame lift-off. According to European standards (EN 437) and MARCOGAZ recommendations, the acceptable Wobbe Index range for high-calorific natural gases is 45.7–54.7 MJ/m³. The calculated value of 48.09 MJ/m³ for the 20% H₂ blend (by volume) remains within the acceptable limits of this range, although it is positioned in the lower region of the EN 437 band considering the modulation capability of current combi systems and the tolerance levels of commonly used materials (stainless steel, Al-Si alloys, brass), fundamental safety can be preserved with fine-tuning of excess air settings and periodic inspection of sealing element H₂ compatibility.

Based on the thermal analysis results and published material property data, the study evaluated the implications for typical combustor components. At 20% hydrogen enrichment, the estimated wall temperature increase of 10-20°C remained within the tolerance limits of common materials including AISI 316L stainless steel, Al-Si alloy coatings, and brass components. However, at 40% hydrogen content, localized hot spots and rapid temperature gradients were observed, suggesting potential risks for thermal fatigue and material degradation under prolonged operation. The predicted flame temperature increases of 3-6% for moderate hydrogen enrichment levels aligned well with experimental findings reported in the literature.

In conclusion, the findings demonstrated that hydrogen addition affects combustion behavior in a multidimensional manner. While pure methane combustion exhibited a wider, slower, and lower-temperature regime, increasing the hydrogen ratio resulted in faster reaction zone formation, easier flame stabilization, and improved combustion efficiency due to hydrogen's high laminar flame speed, rapid reaction potential, and high diffusion coefficient. The 20% H₂ ratio was identified as the optimal performance point in terms of balanced temperature distribution, stable flow field characteristics, acceptable emission levels, Wobbe Index compliance, and material compatibility. At 30% H₂ levels, localized hot spot formations, irregularities in turbulence intensity, and sudden velocity changes near the burner exit were observed, indicating that hydrogen ratios above this threshold pose risks regarding material durability, flow stability, and heat transfer. Therefore, for hydrogen levels of 40% and above, combustion chamber geometry, burner configuration, and material durability strategies need to be reconsidered.

1. Giriş

Küresel ölçekte enerji talebinin yükseliş trendi, demografik büyüme, teknolojik gelişmelerin yaygınlaşması ve endüstriyel kapasite artışı gibi çok boyutlu faktörlerin etkileşimiyle şekillenmektedir. Söz konusu talep artışı, bir yandan toplumların ekonomik kalkınma düzeyini ve yaşam standartlarını yansıtan pozitif bir gösterge olarak yorumlanırken, diğer yandan sonlu karakterdeki konvansiyonel enerji kaynaklarının hızla tükenmesi sorununu beraberinde getirmektedir. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, fosil kaynak rezervleri bakımından yalnızca linyit yatakları açısından öz yeterlilik sağlanabildiği görülmektedir (Yılmaz, 2012). Enerji dönüşüm ve kullanım süreçlerinin ekolojik sistem üzerinde yarattığı olumsuz baskılar göz önünde bulundurulduğunda, hem mevcut kaynakların daha etkin kullanımına hem de alternatif enerji çözümlerinin geliştirilmesine yönelik bilimsel çalışmaların stratejik önemi belirginleşmektedir. Bu bağlamda enerji araştırmalarının temel motivasyonu artan talebi karşılama kapasitesini korurken çevresel ayak izini minimize etmek, hatta mümkün olduğunca sıfırlamak ve düşük enerji girdisiyle maksimum performans elde edebilecek sistemler tasarlamak şeklinde özetlenebilir.

Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji alanındaki araştırmalar kapsamında, fosil yakıtlara alternatif oluşturabilecek temiz enerji taşıyıcılarının geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu arayış içerisinde hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve çevre dostu yanma karakteristiği ile ön plana çıkmaktadır. Hidrojen; su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi farklı hammaddelerden, birincil enerji kaynakları kullanılarak elde edilebilmektedir. Yanma ürünü olarak yalnızca su açığa çıkaran hidrojen, içten yanmalı motorlar ve yakıt hücrelerinde kullanıma uygundur. Toplu taşıma araçlarında uzun süredir uygulama alanı bulan hidrojen yakıt hücreleri, son yıllarda binek araçlarda da ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra uzay araçlarının tahrik sistemlerinde de hidrojen yakıtından yararlanılmaktadır. Günümüzde üretilen hidrojenin yaklaşık %99 a kadar buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon ve kömür gazlaştırması gibi fosil yakıt temelli proseslerle sağlanmaktadır (IEA, 2025), kalan kısım ise büyük ölçüde elektroliz yoluyla karşılanmakta olup, yenilenebilir enerji kaynaklı elektroliz ve güneş termokimyası gibi sürdürülebilir hidrojen üretim teknolojileri de maliyet etkinliklerinin artmasıyla birlikte geleceğin önemli alternatifleri olarak değerlendirilmektedir (Middleton, Larson, Nicklas ve Collins, 2003).

Dünya genelinde yıllık hidrojen üretimi yaklaşık 100 milyon ton düzeyindedir. Bu üretimin sınırlı bir bölümü enerji ve ısı eldesi amacıyla değerlendirilirken, önemli bir kısmı endüstriyel proseslerde tüketilmektedir. Sektörel dağılım incelendiğinde, küresel hidrojen talebinin yaklaşık %52'sinin rafineri işlemlerinde, %43'ünün amonyak üretiminde ve kalan kısmının metanol üretimi ile diğer endüstriyel uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir. Bu yoğun endüstriyel talep, mevcut üretim altyapısının fosil yakıt temelli proseslere bağımlılığını pekiştirmektedir (IEA, 2025). Ancak bu teknolojilerin temel dezavantajı, dönüşüm sürecinde karbondioksit emisyonuna yol açmasıdır. Bu nedenle, saf hidrojen kullanımına geçiş sürecinde mevcut doğal gaz altyapısından yararlanılarak hidrojen-doğal gaz karışımlarının değerlendirilmesi, dekarbonizasyon hedeflerine ulaşmada önemli bir geçiş stratejisi olarak kabul görmektedir.

Bu geçiş stratejisi kapsamında, hidrojen ve doğal gazın temel özellikleri birlikte değerlendirilmelidir. Doğal gaz, bileşiminde ağırlıklı olarak %95 ve metan düşük oranlarda diğer hidrokarbonlar bulunan fosil kökenli bir yakıttır. Bu baskın bileşim

nedeniyle, özellikle sayısal yanma çalışmalarında doğal gaz yakıtını saf metan temsil etmektedir. Karbon oranının diğer fosil yakıtlara kıyasla düşük olması, sera gazı emisyonlarının görece az olmasını sağlamaktadır. Hidrojen ise yanma sürecinde oksijenle reaksiyona girerek yalnızca su oluşturması nedeniyle çevresel açıdan önemli bir avantaja sahiptir. Bu iki yakıtın karışım halinde kullanılması, hem mevcut altyapının korunmasına hem de emisyonların kademeli olarak azaltılmasına olanak tanımaktadır. Nitekim hidrojen, yakıt hücrelerinde elektrik ve ısı üretimi, gaz türbinlerinde merkezi elektrik üretimi ve içten yanmalı motorların çalıştırılması gibi farklı uygulamalarda değerlendirilebilmektedir.

Hidrojen-metan karışımlarının yanma davranışı, saf hidrokarbon yanmasından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılığın temelinde hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı, düşük moleküler ağırlığı ve yüksek reaktivitesi yer almaktadır. Hidrojen ilavesi, karışımlarda laminar yanma hızını artırarak alevin daha hızlı yayılmasını sağlamaktadır. (Tahtouh, T., Halter, F., Samson, E. ve Mounaïm-Rousselle, C. 2009). Yanma performansını belirleyen önemli parametrelerden biri olan hava fazlalık katsayısı (λ), gerçek hava miktarının stokiyometrik hava miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. $\lambda = 1$ durumunda stokiyometrik yanma gerçekleşirken, $\lambda > 1$ fakir karışımı ifade etmektedir. Hidrojenin yüksek reaktivitesi sayesinde fakir karışımlarda bile kararlı yanma sürdürülebilmektedir.

Karışımındaki hidrojen oranı arttıkça geniş yanabilirlik sınırları ve yüksek reaktivitesi sayesinde fakir karışımlarda bile kararlı yanmanın sürdürülmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığı yanma verimini artırırken, yüksek sıcaklığa bağlı termal NO_x oluşum mekanizmasının hızlanması nedeniyle NO_x emisyonlarının artması riskini de beraberinde getirmektedir (Verhelst ve Wallner, 2009). Ayrıca Türbülanslı alev hızı, laminar yanma hızı ve türbülans şiddeti ile artış göstermektedir (Lipatnikov ve Chomiak, 2002). Bu nedenle hidrojen-doğal gaz karışımlarının mevcut yanma sistemlerine entegrasyonunda, performans artışı ile emisyon ve kararlılık parametreleri arasındaki dengenin sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu dengenin anlaşılabilmesi için öncelikle hidrojen ve doğal gazın temel bileşeni olan metanın fizikokimyasal özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Zira iki yakıt arasındaki yoğunluk, tutuşma sıcaklığı, alev hızı ve ısı değer gibi temel farklılıklar, karışım oranlarının yanma davranışı üzerindeki etkisini doğrudan belirlemektedir. Bu kapsamda her iki yakıtın karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Hidrojen (H_2) ve Metan (CH_4) Karşılaştırması (APERÇ, 2023)

Özellik	Hidrojen (H_2)	Metan (CH_4)
Kimyasal Formül	H_2	CH_4
Moleküler Ağırlık	2,02 g/mol	16,04 g/mol
Tutuşma Sıcaklığı	500-570 °C	580 °C
Alev Sıcaklığı	2045 °C (hava ile)	1963 °C (hava ile)
Alev Hızı	3,4 m/s (hava ile)	0,45 m/s (hava ile)
Alt Isıl Değer (LHV)	120,1 MJ/kg	50,0 MJ/kg
Üst Isıl Değer (HHV)	142,0 MJ/kg	55,5 MJ/kg

Yoğunluk	0,0899 kg/m ³ (0°C, 1 atm)	0,657 kg/m ³ (0°C, 1 atm)
Yanma Ürünleri	H ₂ O	CO ₂ ve H ₂ O
Enerji Verimliliği	Yüksek	Orta

Hidrojenin yukarıda açıklanan karakteristik özellikleri ve Tablo 1’de sunulan karşılaştırmalı veriler, mevcut doğal gaz altyapısına entegrasyonu konusunda önemli bir araştırma potansiyeli sunmaktadır. Farklı yakıt gazlarının aynı yanma sisteminde birlikte kullanılabilmesi için öncelikle yanma karakteristiklerinin uyumlu olması gerekmektedir. Bu uyumluluğun değerlendirilmesinde en temel kriterlerden birisi de, yakıtın ısı değeri ile bağlı yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ifade eden Wobbe indeksidir. Genel kabule göre iki yakıt arasındaki farkının %5’i aşmaması, yakıt gazlarının tam değiştirilebilirliğine izin vermektedir. Bununla birlikte, Wobbe indeksi tek başına yakıt değiştirilebilirliğini belirlemede yeterli bir kriter değildir. Alev hızı, tutuşma sıcaklığı ve yanma ürünleri gibi diğer yanma parametreleri de bu değerlendirmede belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle konut tipi ısıtma sistemlerinde hidrojen-doğal gaz karışımlarının kullanımı, mevcut brülör ve yanma odası tasarımlarının uyumluluğu açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı hidrojen karışım oranlarının yanma karakteristikleri ve emisyon performansı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak araştırıldığı görülmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen başlıca çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Li, J., Chou, S. K., Yang, W. M. ve Li, Z. W. (2009). bir mikro yakıcıda doğal gaz hava karışımını ön karışımli şartlarda nümerik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada yakıcı geometrisi, ölçüsü ve sınır şartlarının yanma sıcaklığı üzerindeki etkisini iki boyutlu denklemler kullanarak araştırmışlardır. Araştırma sonucunda daha büyük ölçüdeki yakıcıda, giriş hızının olması gereken hızdan düşük olması durumunda daha yüksek sıcaklıkta alev sıcaklığı elde etmişlerdir.

Schiro, F., Stoppato, A., Benato, A. (2020). doğal gazın hidrojen ile zenginleştirilmesinin yoğunmalı konut tipi ön karışımli kazanlar üzerindeki etkisini modelleyerek incelemişlerdir. Çalışmada, H₂ katkısının yakıt ve hava debileri, CO₂ emisyonları, verimlilik, geri tepme (flashback) ve patlama riski, alev algılama sistemleri ve malzeme seçimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yaklaşık %20’ye kadar hidrojen katkısının mevcut metan yakıtlı ön karışımli kazanlarda önemli bir yeniden tasarım gerektirmeden sürdürülebileceğini, daha yüksek oranlarda ise brülör, kontrol sistemi ve yakıt tarafı bileşenlerinde köklü tasarım değişikliklerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Wright, M. L., Lewis, A. C. (2022) hidrojen-doğal gaz karışımlarının (hacimsel %5-20 H₂) konut tipi kazanların yanmasında NO_x emisyonlarındaki değişimleri meta-analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmada 14 farklı literatür çalışması değerlendirilmiş ve %5 hidrojen karışımı için NO_x emisyonlarındaki değişimin -%12 ile +%39 arasında oldukça geniş bir aralıkta değiştiği tespit edilmiştir. Sonuçların bu denli değişken olması, brülör tasarımı, yanma koşulları ve ölçüm yöntemlerindeki farklılıklara bağlanmıştır.

Lamioni, R., Bronzoni, C., Folli, M., Tognotti, L. ve Galletti, C., (2023) yoğunmalı bir ev tipi kazanda delikli ön karışımli brülör kullanılarak hidrojen katkılı doğal gazın yanmasını HAD simülasyonlarıyla incelemişlerdir. Çalışmada hacimsel olarak %50’ye kadar H₂ karışım oranları değerlendirilmiş, model deneysel CO ve NO ölçüleriyle

doğrulanmıştır. Dikkat çekici şekilde, hidrojen ilavesinin hem CO hem de NO emisyonlarını azalttığı, nominal güçte CO emisyonlarının 154 ppm'den 18 ppm'e, NO emisyonlarının ise 20 ppm'den 5 ppm'e düştüğü rapor edilmiştir. Bu azalma, hidrojen ilavesinin yoğunlaşma kazanlarda doğal olarak daha seyreltik çalışma koşullarına yol açmasına bağlanmıştır.

Al-ajmi, Qazak, Sadeq, Al-Shaghdari ve ark. (2025), endüstriyel brülörlerde hidrojen ve hidrojen-metan karışımlarının alternatif yakıt olarak kullanım potansiyelini sayısal olarak araştırmışlardır. ANSYS Fluent kullanılarak RANS çerçevesinde k-ε türbülans modeli ve karışım oranı/PDF yaklaşımı ile yapılan simülasyonlarda farklı hidrojen karışım oranları incelenmiştir. Sonuçlara göre %50 hidrojen karışımı en düşük pik sıcaklığı (1880 K) verirken, %75 hidrojen karışımının optimal performansı sağladığı, NO_x emisyonlarını düşürürken neredeyse sıfır CO₂ emisyonu elde edildiği belirtilmiştir.

Boulahlib, Medaerts ve Boukhalfa (2021), 15 kW'lık bir ev tipi kombide metan-hidrojen karışımlarının (%0-45 H₂) yakıt zengin kademeli yanmayla ($\Phi = 2,0 \div 4,0$) birleştirildiği deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, hidrojen oranının artmasıyla NO_x ve CO₂ emisyonlarının azaldığını, ancak CO ve C_xH_y emisyonlarının arttığını göstermiştir. Wobbe indeksinin hidrojen oranıyla azaldığı, maksimum sıcaklıkların yaklaşık %20 H₂ ve eşdeğerlik oranı $\Phi \geq 2,0$ koşullarında elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca $\Phi > 2,0$ değerlerinde sıcaklık ve NO_x azalması gözlemlenmiştir.

Literatürde hidrojen katkılı doğal gaz yanması üzerine yapılan çalışmalar genellikle sıcaklık dağılımları, hız alanları ve emisyon konsantrasyonları gibi sayısal çıktıları ortaya koymakta ancak yanma performansı, malzeme uyumluluğu ve emisyon standartlarının birlikte değerlendirildiği bütünlük yaklaşım sınırlı kalmaktadır. Mevcut çalışmada, farklı hidrojen oranlarına bağlı performans değişimlerinin mevcut sistemlere uygulanabilirliği parametrik analiz yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, hidrojen oranının yanı sıra farklı hava fazlalık katsayıları altında yanma davranışı sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, gaz değiştirilebilirliği kriterleri CO, CO₂, NO_x emisyonları ve yakıt uyumluluğu gibi uluslararası standart ve teknik düzenlemeler çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Yanma odası bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik, Al-Si alaşımları ve pirinç gibi malzemelerin termal dayanım sınırları ile hidrojen geçirgenlik özellikleri göz önünde bulundurularak, mevcut sistem altyapısında modifikasyon gerektirmeden uygulanabilecek çalışma aralıkları belirlenmiştir. Ayrıca türbülans kinetik enerji ve toplam basınç dağılımları analiz edilerek akış alanı karakteristikleri üzerindeki etkiler ortaya konmuştur. Çalışmada kütleli debinin sabit tutulması tercih edilmiş olup incelenen parametreler, belirli bir hidrojen oranında eş güdümlü olarak karşılanması gereken kriterler bütünü olarak ele alınarak somut eşik değerlerine dayalı bir değerlendirme çerçevesi oluşturulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada sayısal analizler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemine dayalı yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrojen-metan kompozit yakıt karışımlarının yanma davranışını incelemek amacıyla bir yanma hacmi modellenmiştir. HAD analizlerinde güvenilir sonuçlar elde edebilmek için fiziksel sistemin tanımlanması, uygun türbülans ve yanma modellerinin seçimi, sınır koşullarının belirlenmesi ve sayısal ağ yapısının oluşturulması sistematik bir şekilde ele alınmıştır.

Modellemede yakıt giriş ve çıkış bölgelerinde daha yoğun bir yapıya sahip olacak şekilde 155.155 düğüm ve 154.000 hücre içeren bir grid oluşturulmuştur. Ağ bağımsızlık analizi için Roache (1994) tarafından önerilen Grid Convergence Index (GCI) yöntemi uygulanmış, üç farklı mesh seviyesi kullanılarak yapılan analizde GCI değerleri maksimum sıcaklık için %0,10, NO konsantrasyonu için %0,31, CO ve CO₂ kütle kesri için sırasıyla %0,29 ve %0,13 olarak hesaplanmıştır. Tüm değerler kabul edilebilir üst sınır olan %5'in çok altında olup mesh kalitesi parametreleri (minimum ortogonal kalite: 0,85, maksimum çarpıklık: 0,42) yapısal mesh için önerilen kriterleri karşılamıştır. Sayısal çözümlerinde gaz fazı akışının türbülanslı yapısını temsil etmek için SST k- ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu model, duvar yakını bölgelerde k- ω formülasyonunun üstün performansını serbest akış bölgelerinde k- ϵ modelinin avantajlarıyla birleştirmesi nedeniyle yanma odası gibi karmaşık geometrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyasyon transferinin modellenmesinde ise hesaplama maliyeti ve doğruluk dengesi gözetilerek P1 modeli seçilmiştir. Yanma modellemesinde türler taşınım modeli (species transport) ile birlikte, difüzyon kontrollü yanma sistemlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ve hesaplama verimliliği ile doğruluk arasında optimum denge sağlayan karışım fraksiyonu-PDF (Probability Density Function - Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) yaklaşımı tercih edilmiştir.

Çalışmada sabit kütleli debilerde hacimsel olarak %0, %10, %20, %30 ve %40 H₂ karışım oranları ile $\lambda = 1, 1,1$ ve $1,2$ hava fazlalık katsayıları belirlenerek her bir durum için sayısal sonuçlar analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Farklı çalışma koşulları altında en verimli, en düşük emisyon değerlerinin elde edildiği ve sistemin sürdürülebilirliğini sağlayabilecek optimum parametreler belirlenmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımları, yanma odası bileşenlerinde kullanılan malzemelerin termal dayanım sınırları açısından da değerlendirilmiştir. HAD yazılımı aracılığıyla tanımlanan tüm girdiler ve yüzdeler değişimler gerçek fiziksel ve kimyasal temellere dayandırılarak incelenmiş olup elde edilen sonuçlar, modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmada $\lambda=1$ koşulunda %40 H₂ ilavesiyle saf metana kıyasla maksimum sıcaklıkta %5 artış ve NO_x emisyonlarında yaklaşık 3,7 kat yükseliş gözlemlenmiştir. Bu bulgular, El-Ghafour, S. A. A., El-dein, A. H. E., Aref, A. A. R.. (2010) tarafından türbülanslı difüzyon alevinde %50 H₂ ilavesiyle elde edilen sıcaklık artışı ve Büyükakın ve Öztuna (2020) tarafından konut tipi kazan sistemlerinde raporlanan NO_x artışı eğilimi ile bazı benzer eğilimler sergilemektedir. **Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.**

2.1. Sistem Tasarımı

Konut tipi kombi ısıtıcısı yanma sistemlerindeki yanma odası yakıcılarında genel olarak brülör ve nozullar simetrik yapılardır. Bu kapsamda model bir yanma hacmi oluşturulmuş ve farklı hidrojen-metan karışım oranlarının yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Modelin alt yüzeyinde yalnızca, yakıcı elemana ait hava-yakıt karışımlarının üflendiği ve ikincil havanın yanma odasına beslendiği açıklıklar bulunmaktadır. Modellemede yakıcı elemanlar, çözüm bölgesi dışında bırakılmışlardır. Türkiye şartlarında doğal gaz kombilerinin kapasitesi, kullanım alanına ve ihtiyaca bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ancak, yaygın olarak konut tipi doğal gaz kombilerinin ısı ihtiyacına göre ısı kapasitesi 20 kW ile 35 kW aralığında değişmektedir. Yapılan bu çalışmada yaklaşık 25 kW kapasiteli bir yakıcının metan ile yanması için gerekli olan toplam yakıt debisi ve toplam hava

debisi hesaplanmıştır. İhtiyaç duyulan yakıt debisi kütleli olarak 0,00056 kg/s olarak belirlenmiştir. Yakıcılarda genel olarak brülör ve nozul yapısının simetrik ve eş ölçülerde olması, hesaplamalarda kullanılacak olan modelin sadeleştirilmesine olanak sağlamıştır. Sayısal analizlere başlamadan önce hava ve yakıt debileri belirlenmiş ve toplam yakıt debisi sabit tutularak içeriğindeki yakıt miktarları oransal olarak değiştirilmiş dolayısıyla ısı gücü sabit tutulmamıştır.

Farklı yakıt karışımları için stokiometrik hava debisi hesaplamalarında, öncelikle hacimsel karışım oranlarının kütleli orana dönüştürülmesi gerekmektedir. Hacimsel oranın (x) kütleli orana (y) dönüşümü Eşitlik 1 ile gerçekleştirilmiştir:

$$y_{H_2} = (x_{H_2} \cdot M_{H_2}) / (x_{H_2} \cdot M_{H_2} + x_{CH_4} \cdot M_{CH_4}) \quad (1)$$

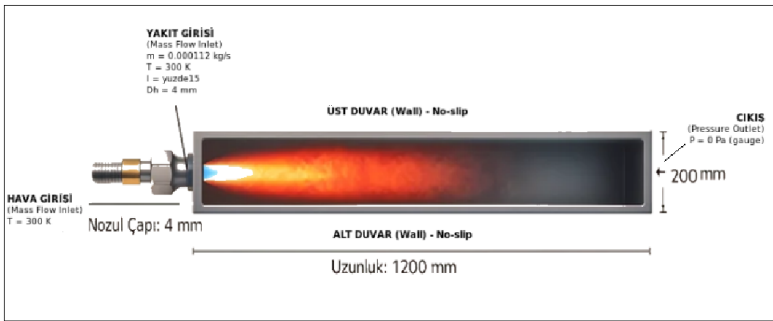
Karışımın stokiometrik hava-yakıt oranı, bileşenlerin kütleli fraksiyonlarına göre Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır:

$$(A/F)_{st,mix} = y_{H_2} \cdot (A/F)_{st,H_2} + y_{CH_4} \cdot (A/F)_{st,CH_4} \quad (2)$$

Gerekli kütleli hava debisi Eşitlik 3 ile belirlenmiştir:

$$\dot{m}_{hava} = \dot{m}_{yakıt} \cdot (A/F)_{st,mix} \quad (3)$$

Her bir nozul için 0,000112 kg/s sabit yakıt debisi esas alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, farklı yakıt karışımlarının ihtiyaç duyduğu ideal kütleli hava debileri; %100 CH₄ olması durumunda 0,00193 kg/s, %90 CH₄ - %10 H₂ olması durumunda 0,00196 kg/s, %80 CH₄ - %20 H₂ olması durumunda 0,002 kg/s, %70 CH₄ - %30 H₂ olması durumunda 0,00203 kg/s ve %60 CH₄ - %40 H₂ olması durumunda 0,00208 kg/s olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu stokiometrik oranlar doğrultusunda, mevcut nozul geometrisi ve kesit alanı göz önünde bulundurularak her bir karışım oranına karşılık gelen kütleli debi değerleri sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Şekil 1'de şematik gösterimi verilmiş olan 4 mm nozul çapında, 1200 mm uzunluğunda ve 200 mm genişliğinde tipik gaz yakıtlı yanma sistemleri dikkate alınarak model bir yanma geometrisi oluşturulmuştur.



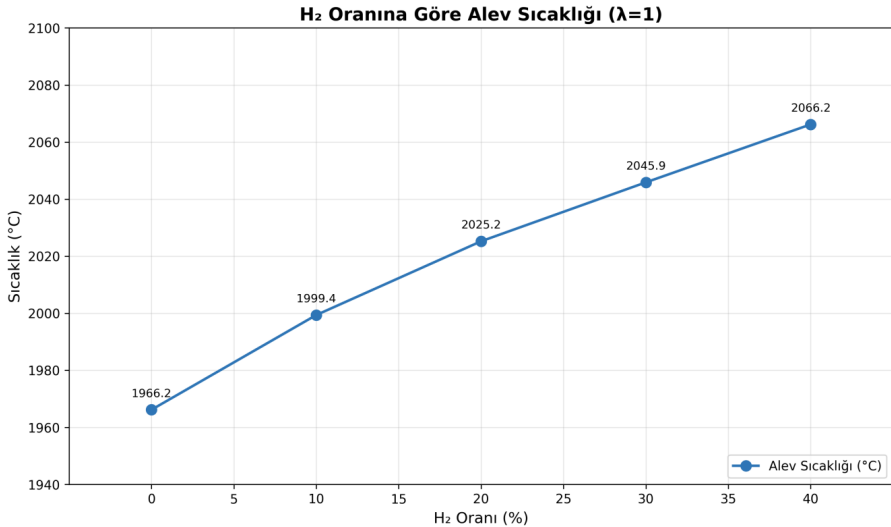
Şekil 1. Yanma Odasının Şematik Gösterimi

2.2. Sayısal Sonuçlar

Tablo 2. $\lambda=1$ Olması Durumunda Farklı Hidrojen Oranlarına Göre Yanma Sayısal Verileri

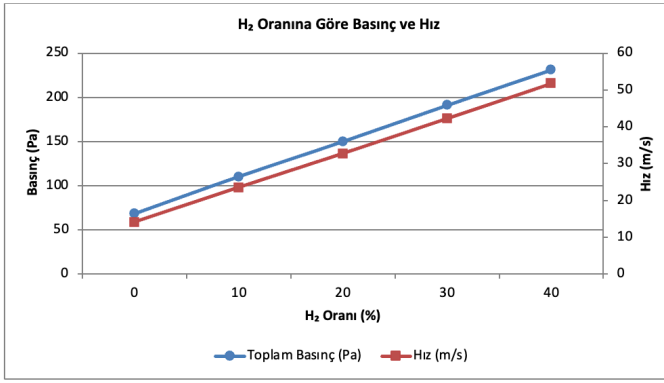
$\lambda=1$	Sıcaklık (°C)	NO _x (ppm)	Basınç total (pa)	Türbülans (m ² /s ²)	CO ₂ (Kütleli Oranı)	CO (Kütleli Oranı)
H ₂ % 0	1966,173	15,93	68,22	25,41457	0,1376	0,138
H ₂ % 10	1999,378	16,3	110,31	76,27158	0,1115	0,129
H ₂ % 20	2025,229	26,83	150,028	150,28	0,09	0,117
H ₂ % 30	2045,888	41,87	191,1	253,77	0,072315	0,104
H ₂ % 40	2066,198	58,57	231,21	385,86	0,057	0,090

Tablo 2’de sunulan $\lambda=1$ koşulundaki sayısal sonuçlar incelendiğinde, hidrojen oranının artmasıyla birlikte belirgin eğilimler gözlemlenmektedir. Maksimum yanma sıcaklığı, saf metan durumunda 1966 °C iken %40 H₂ katkısıyla 2066 °C’ye yükselmiştir. Bu artış, hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığı ile uyumlu bir eğilim olarak değerlendirilebilir. Sıcaklık artışına paralel olarak NO_x emisyonları da 15,93 ppm’den 58,57 ppm’e yükselmiş olup bu durum, artan sıcaklık seviyelerinin NO_x oluşumunu hızlandırdığına işaret etmektedir. Öte yandan, hidrojenin karbonsuz yapısı nedeniyle CO₂ ve CO emisyonlarında belirgin düşüşler elde edilmiştir. CO₂ kütleli oranı %0 H₂’de 0,1376 iken %40 H₂’de 0,057’ye, CO oranı ise 0,138’den 0,090’a gerilemiştir. Türbülans kinetik enerjisi ve toplam basınç değerlerindeki artış ise hidrojen katkısıyla birlikte artan hacimsel akış hızının bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Sonuçlar, %40 H₂ oranında gözlemlenen yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinin mevcut sistem malzemeleri açısından dikkatli değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.



Şekil 2. Karışım Oranlarının Alev Sıcaklığına Etkisi

CH_4 ve H_2 karışımlarının yanma analizinde, H_2 oranının artması alev sıcaklıklarını hem fiziksel hem kimyasal olarak önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük H_2 oranlarında (%0–10), yanma hızında sınırlı fakat düzenli bir artış gözlenmekte ve sıcaklıklar kontrol edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bu bölge, hem yanma verimliliği hem de güvenli çalışma açısından kabul edilebilir karakterdedir. H_2 oranının %30 seviyelerine ulaşmasıyla birlikte, hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığı ve yanma reaktivitesinin etkisiyle yanma bölgesindeki sıcaklıklarda artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu artış, hidrojen katkısının reaksiyon bölgesindeki enerji yoğunluğunu artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Yüksek H_2 oranlarında %40 ve üzeri, sistemde hidrojen katkısının baskın hâle gelmesiyle birlikte sıcak noktaların oluşması, termal streslerin büyümesi ve yakıt değiştirilebilirlik uyumluluklarına bağlı olarak yanma sisteminin tasarım limitlerinin zorlanması söz konusudur. Böyle bir durumda, yanma odasının malzeme dayanımı ve sistem güvenliği kritik hale gelir.

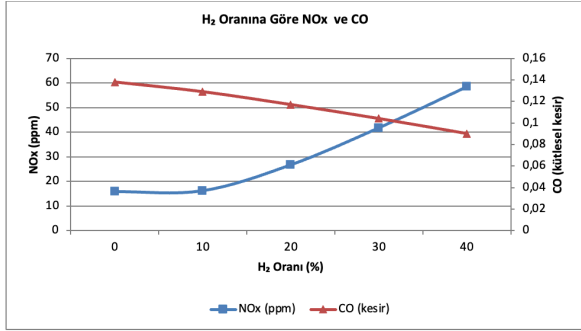


Şekil 3. Karışım Oranlarının Toplam Basınca ve Alev Hızına Etkisi

H_2 oranının artışı yalnızca sıcaklığı değil, akışın hidrodinamik davranışını ve toplam basıncı da önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük H_2 oranlarında (%0–10), toplam basınçta sınırlı artışlar görülmekte olup bu artışlar yanma sistemlerinin tipik tolerans aralığı içerisinde kalmaktadır. Orta seviyelerde (%10–30), hidrojene bağlı olarak karışım yoğunluğunun düşmesi ve buna bağlı hacimsel akış hızının artması, toplam basıncın daha belirgin şekilde yükselmesine neden olmaktadır. Bu bölgedeki basınç artışının izlenmesi ve kontrol edilmesi önem taşımaktadır. H_2 oranı %30–40 aralığına ulaştığında, basınç ve hız değerlerindeki artış belirgin şekilde hızlanmaktadır. Bu durum, yanma odasının yapısal bütünlüğü üzerinde ek yükler oluşturabilecek koşullara işaret etmektedir. Artan basınç ve hız değerleri, mevcut sistem bileşenlerinin tasarım sınırları açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

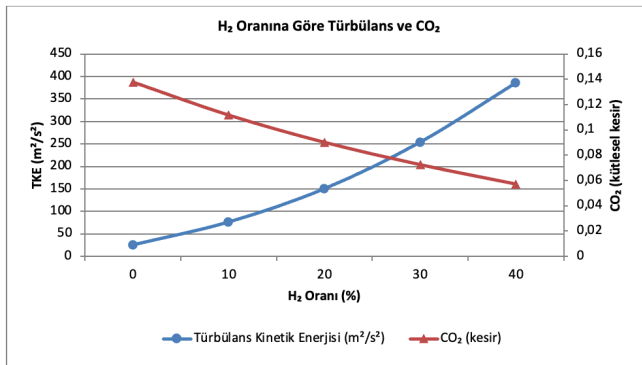
H_2 oranının artışı akış hızını da doğrudan etkilemekte ve yanma odasının akış karakteristiğini değiştirmektedir. Düşük H_2 seviyelerinde (%0–10), hız değerleri düşük ve kararlı kalmaktadır. %10–30 H_2 seviyelerinde, hidrojenin düşük yoğunluğu nedeniyle sabit kütleli debide hız doğal olarak artmakta, bu durum yanma odasında daha belirgin hız farklılıklarına ve türbülans artışına neden olmaktadır. Bu bölgede yanma verimi artabilir, fakat alev kararlılığının daha hassas hâle gelmesi beklenmektedir. %30 ve üzeri H_2 seviyelerinde hız artışı devam etmekte olup bu eğilim, hidrojen kat-

kısının akış dinamiklerini güçlendirmesiyle uyumludur. Elde edilen sonuçlar, hidrojen katkısının yanma verimini artırmakla birlikte sistem tasarımında alev kararlılığının ve akış kontrolünün dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4. Kompozit Yakıtlardaki Karışım Oranlarının NO_x ve CO Değerlerine etkisi

NO_x emisyonları, H₂ oranının artışıyla birlikte belirgin bir yükseliş göstermektedir. Isıl gücün sabit tutulmaması sebebiyle hidrojen katkısının sıcaklığı artırması, termal NO_x oluşum mekanizmasını doğrudan tetikler. Termal NO oluşumu yüksek sıcaklık bölgelerinde üssel biçimde artar ve özellikle 1800 derecenin üzerindeki sıcaklıklar NO_x üretimini hızlandırır. H₂ artışı aynı zamanda jet hızını ve türbülans kinetik enerjisini artırdığından, yüksek sıcaklık bölgelerinde karışım süresi uzar ve NO_x üretimi daha etkin hâle gelir. Bu nedenle grafik, H₂ katkısının NO_x oluşumu açısından hassas bir parametre olduğunu göstermektedir. H₂ oranlarındaki artış ile NO_x artış eğilimi hızlanarak güvenlik ve çevresel sınırların dikkatle değerlendirilmesini gerektirir. CO miktarı ise hidrojen katkısı ile azalmaktadır. Hidrojenin yanma sıcaklığını yükseltmesi ve reaksiyon zonunun daha kararlı ve oksidan karakterde olması CO'nun tamamen oksitlenmesini kolaylaştırır. Bu nedenle yüksek H₂ oranlarında CO emisyonları önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Karışım Oranlarının Türbülans ve CO₂ Değerlerine Etkisi

H₂ oranının %10'dan %30'a kadar artması türbülans kinetik enerjisinde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Artan jet hızı, hız gradyanlarını büyütmekte ve kayma taba-

kalarında daha yüksek türbülans üretimine yol açmaktadır. Bunun sonucunda karışım kalitesi artmakta ve yanma daha etkin bir hâle gelmektedir.

%30'un üzerindeki seviyelerde türbülans kinetik enerjisi çok hızlı artar ve bu durum yanma kararlılığını zorlayan, akışın aşırı enerjik olduğu bir rejime sürükleyebilir. Analiz sonuçlarına göre %40 ve üzerindeki oranlarda türbülans kontrol edilemez hâle gelir, yanma instabiliteleri ve osilasyon riskleri artar. Bu nedenle türbülansın dikkatle yönetilmesi hem güvenlik hem performans açısından kritiktir.

CO₂ miktarı, yakıttaki karbon içeriğine doğrudan bağlı olduğundan hidrojen katkısıyla birlikte düşmektedir. H₂ oranı arttıkça yakıttaki karbon/hidrojen oranı azalmakta ve yanma sonucunda oluşan CO₂ stokiyometrik olarak küçülmektedir. Hava fazlalık katsayısının (λ) türbülans üzerindeki etkisi incelendiğinde, $\lambda = 1$ koşulunda türbülans değerlerinin diğer λ değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, stokiyometrik yanmanın daha hızlı reaksiyon bölgeleri oluşturması ve termal genişlemenin akış salınımlarını güçlendirmesiyle açıklanabilir. Buna karşılık $\lambda = 1,2$ 'de gözlenen daha düşük türbülans seviyeleri, oksijen fazlalığının yerel reaksiyon oranlarını sınırlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Ancak tüm λ değerlerinde hidrojen oranının türbülans üretimi üzerindeki etkisinin hava fazlalık katsayısındaki değişimlerden daha baskın olduğu tespit edilmiştir (Tang, C., Zhang, Y., Huang, Z. 2014).

Tablo 3. $\lambda=1,1$ Durumunda Farklı Hidrojen Oranlarına Göre Sayısal Yanma Verileri

$\lambda=1,1$	Sıcaklık (°C)	NO _x (ppm)	Basınç total (pa)	Türbülans (m ² /s ²)	CO ₂ (Kütleli Oranı)	CO (Kütleli Oranı)
H ₂ % 0	1964,492	13,58	68,99	22,32	0,137	0,138
H ₂ % 10	1975,993	14,13	111,57	71,053	0,11156	0,129
H ₂ % 20	2023,84	24,72	150,028	147,28	0,0901	0,117
H ₂ % 30	2045,888	39,18	191,1001	252,65	0,07231	0,104
H ₂ % 40	2062,57	56,49	231,752	381	0,057	0,090

Tablo 3'te verilen sayısal dağılımlar, farklı hidrojen katkı oranlarında fazlalık katsayısı koşulunun yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sıcaklık değerleri, H₂ oranı arttıkça düzenli bir şekilde yükselmiş ancak tüm karışım oranlarında $\lambda=1,1$, $\lambda=1$ 'e göre daha düşük sıcaklıklar üretmiştir. Bu fark özellikle düşük H₂ seviyelerinde daha belirgin olup yüksek H₂ oranlarında azalmaktadır. NO_x oluşum değerleri sıcaklık artışı ile uyumlu bir eğilim göstererek H₂ oranıyla birlikte yükselmiştir. $\lambda=1,1$ koşulu, tüm noktalarda $\lambda=1$ 'e kıyasla daha düşük NO_x seviyelerine sahiptir ve bu durum sıcaklık dağılımındaki değişimlerle tutarlıdır. Böylece NO_x oluşumunun sıcaklığa duyarlı yapısı sayısal olarak doğrulanmaktadır. Basınç alanı verileri, hava fazlalık katsayısının düşük miktarlarda değişiminden çok etkilenmediği, basınç artışının esas olarak H₂ oranına bağlı olduğunu göstermektedir. Türbülans şiddeti H₂ oranıyla birlikte artmıştır ancak $\lambda=1,1$ koşulunda türbülansın tüm seviyelerde $\lambda=1$ 'in altında kaldığı görülmüştür. Bu durum akış alanının λ değişimine karşı duyarlılığını ortaya koymaktadır. CO₂ ve CO değerleri yakıt bileşimine bağlı olarak sistematik bir yapı sergilemiştir. CO₂, H₂ oranı yükseldikçe azalmıştır. CO ise her iki λ koşulunda benzer seviyelerde kalmakla birlikte H₂ oranıyla birlikte düzenli biçimde düşmüştür. Bu davranış, dar λ aralığında (1,0-1,2) artan oksijen fazlasının CO oksidasyonunu hızlandırıcı etkisi ile azalan alev sıcaklığının reaksiyon kinetiğini yavaşlatıcı etkisinin birbirini dengelemesiyle açıklanmakta olup

yanma sistemlerinde beklenen bir karakteristiktir.

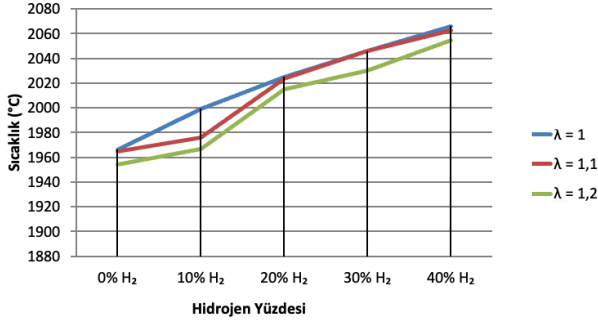
Tablo 4. $\lambda=1,2$ Olması Durumunda Farklı Hidrojen Oranlarına Göre Yanma Verileri

$\lambda=1,2$	Sıcaklık (°C)	NO _x (ppm)	Basınç total (pa)	Türbülans (m ² /s ²)	CO ₂ (Kütleli Oranı)	CO (Kütleli Oranı)
H ₂ % 0	1954,09	12,6	67,98	20,73	0,137	0,138
H ₂ % 10	1966,99	13,9	109,57	60,54	0,11153	0,129
H ₂ % 20	2015,21	22,3	145,028	144,32	0,0898	0,118
H ₂ % 30	2029,87	37,4	183,1001	192,62	0,0721	0,105
H ₂ % 40	2054,83	52,6	224,972	380,05	0,056	0,089

Tablo 4'te verilen sayısal dağılımlar, farklı hidrojen katkı oranlarında hava fazlalık katsayısı koşulunun yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Sıcaklık değerleri, H₂ oranı arttıkça düzenli bir şekilde yükselmiş ancak tüm karışım oranlarında $\lambda=1,2$, $\lambda=1$ ve $\lambda=1,1$ 'e göre daha düşük sıcaklıklar üretmiştir. Bu fark özellikle düşük H₂ seviyelerinde daha belirgin olup H₂ oranı yükseldikçe azalmaktadır. Böylece sıcaklığın H₂ artışına duyarlı, λ değişimine ise sınırlı fakat tutarlı bir tepki verdiği görülmektedir.

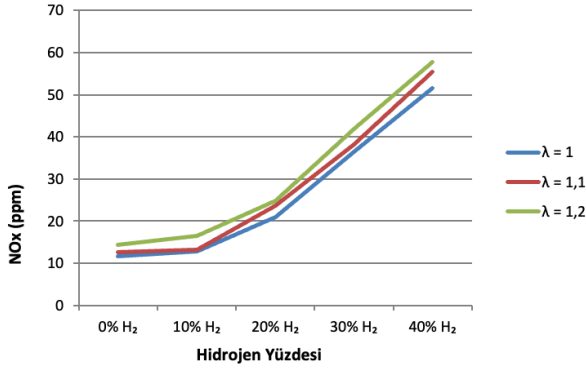
NO_x oluşum değerleri sıcaklık artışı ile uyumlu bir eğilim göstermiş ve H₂ oranıyla birlikte yükselmiştir. $\lambda=1,2$ koşulu, tüm karışım oranlarında $\lambda=1$ ve $\lambda=1,1$ 'e kıyasla daha düşük NO_x seviyeleri oluşturmuştur. Bu sonuç, NO_x oluşumunun sıcaklık seviyelerine duyarlı yapısını doğrulamakta ve sıcaklıktaki düşüşün doğrudan NO_x üretimine yansımaya ortaya koymaktadır. Basınç alanı verileri, fazlalık katsayısındaki bu düzeydeki değişimin basınç üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını, basınç artışının esas olarak H₂ oranına bağlı olduğunu göstermektedir. $\lambda=1,2$ koşulunda basınç değerlerinin $\lambda=1$ ve $\lambda=1,1$ ile yakın seviyelerde seyretmesi, basınç alanının karışım bileşimi tarafından daha fazla belirlenen bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Türbülans şiddeti H₂ oranıyla birlikte artmış; ancak $\lambda=1,2$ koşulunda türbülans değerlerinin tüm karışım oranlarında $\lambda=1$ ve $\lambda=1,1$ 'e göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Bu eğilim, akış alanının fazlalık katsayısındaki değişimlere karşı duyarlı olduğunu ve λ arttıkça türbülans seviyelerinin sistematik bir şekilde azaldığını göstermektedir. CO₂ ve CO değerleri yakıt bileşimine bağlı olarak sistematik bir yapı sergilemiştir. CO₂ oranı H₂ yüzdesi yükseldikçe azalmış; CO değerleri ise λ 'ya bağlı olarak anlamlı bir farklılık göstermeden, H₂ oranı arttıkça düzenli bir biçimde düşmüştür. Bu sonuç, CO₂ oluşumunun λ değerinden çok karışımın bileşimsel karakteristikleri tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır. (Odeh ve Paul, 2024).

Hava fazlalığının daha yüksek olduğu ($\lambda=1,2$) bu çalışma koşullarında, sıcaklıklar stokiometrik duruma göre daha sınırlı seviyede kalmaktadır. Ancak hidrojen oranı yükseldikçe NO_x emisyonlarındaki artış eğilimi devam etmektedir.



Şekil 6. Fazla Havanın Sıcaklıklara Etkisi

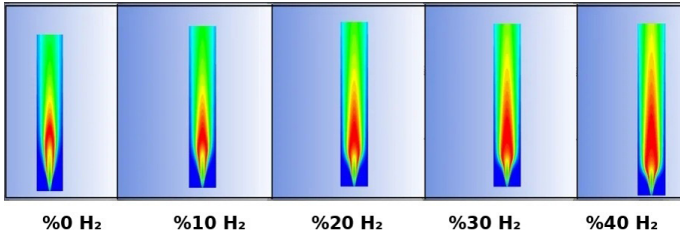
Grafikte, doğal gaz hidrojen karışımlarında artan hidrojen yüzdesine bağlı olarak adyabatik alev sıcaklığının her üç hava fazlalık katsayısında ($\lambda = 1$, $\lambda = 1.1$ ve $\lambda = 1.2$) da yükseldiği görülmektedir. Hidrojen eklenmesi, birim kütle başına daha yüksek alt ısıl değere sahip olması ve karışımdaki difüzyon hızını artırarak karışım homojenliğini iyileştirmesi nedeniyle yanma verimini artırmaktadır. Bu durum literatürde de benzer şekilde alev sıcaklığının yükselmesi ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle stokiometriye yakın koşullarda ($\lambda = 1$), grafikte de görüldüğü üzere sıcaklık artışının daha belirgin olması, hidrojen ilavesinin karışım reaktivitesini kuvvetlendirmesiyle açıklanmaktadır. $\lambda = 1.1$ ve $\lambda = 1.2$ gibi daha yüksek hava fazlalık katsayılarında ise alev sıcaklığı $\lambda=1$ durumuna göre düşüş eğilimi göstermiştir. Hidrojen oranı %10'dan sonra $\lambda=1.1$ ve $\lambda=1.2$ değerlerinde sıcaklık eğrisinde bir kırılma görülmesi, karışımdaki hidrojenin düşük tutuşma enerjisi ve yüksek laminer yanma hızının etkisinin baskın hale gelmeye başladığı ile ilişkilendirilebilir.



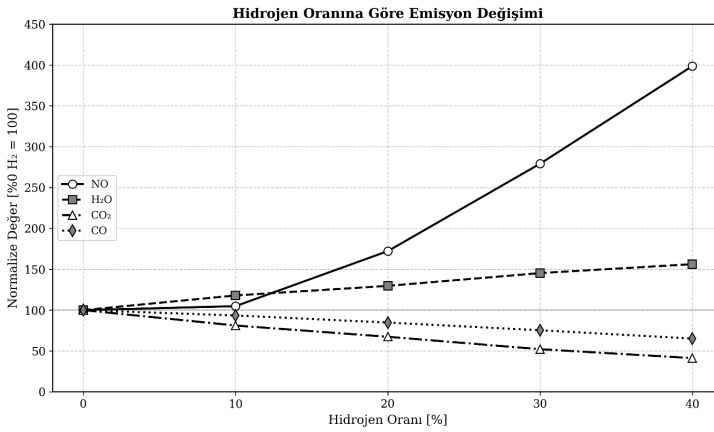
Şekil 7. Fazla Havanın NO_x Değerlerine Etkisi

H₂ oranının %10'dan %30'a kadar artması, yanma süreçlerinin daha verimli hale gelmesini sağladığı gözlemlenmiştir. H₂ oranının artırılması etkili bir strateji olabilirken özellikle termal NO_x değerlerinin artışı açısından bir sınırlama şarttır. H₂ oranının artmasıyla karbon kaynaklı emisyonlar önemli ölçüde azalırken, azot oksit üretiminde bir artışa neden olur. H₂ oranının %30'u aşması durumunda, CO₂ emis-

yonları çok düşük değerlere ulaşırken, NO_x seviyeleri yüksek değerlere ulaşabilir.



Şekil 8. Hidrojen Oranındaki Artışın Sıcaklık Kontur Grafiğinde Oluşturduğu Değişimler



Şekil 9. Hidrojen Oranındaki Artışın Emisyonlara Etkisi (NO , H_2O , CO_2 , CO)

Yapılan sayısal analizlerin bütüncül değerlendirilmesi sonucunda, aynı toplam kütleli debi korunarak %20-%30 aralığında hidrojen ilavesi yapıldığında alev sıcaklıklarının ortalama %2-5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Literatürde benzer çalışma sonuçları incelendiğinde, hidrojen katkısının alev sıcaklıklarını sıcaklık artış eğilimi yönündeki deneysel bulgular, elde edilen sayısal sonuçlarla uyum göstermektedir. Konut tipi ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 316L paslanmaz çelik ve Al-Si döküm eşanjör malzemelerinin yüksek sıcaklık dayanım sınırları literatürde de incelenmiştir (Cao, W., Liu, F., ve You, X. Y. 2018). Bu çalışmada gözlenen sıcaklık artışı, söz konusu malzemelerin çalışma limitleri içinde kalmaktadır. Ancak uzun dönemli termal gerilme birikimi ve yorulma davranışları açısından ek değerlendirmeler gerekmektedir.

Tablo 5'te farklı yanma bileşenlerinde tipik çalışma sıcaklıkları ve %20 hidrojen katkısı durumunda beklenen değişimleri göstermektedir. Bu değerler, üretici cihaz çalışma rejimleri ile malzeme sınıflarının literatürde raporlanan dayanım verilerinin birleştirilmesiyle elde edilen yaklaşık mühendislik mertebeleridir. Yapılan termal analizlerde, hacimsel %20 hidrojen oranının malzeme tolerans sınırları, alev kararlılığı ve sızdırmazlık kriterleri açısından tamamında güvenli çalışma aralığında kalan bir değer olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Gaz Yakıtlı Yanma Bileşenlerinde Sıcaklık Mertebeleri ve %20 H₂ Katkısı

Malzeme	Nominal Çalışma Sıcaklığı	Tolerans	%80CH ₄ %20 H ₂ karışımında Olası Durum
Yanma Odası Duvarı (Çelik sac + Al kaplama)	200-350 °C (Baca gazı anlık)	400-500 °C (kısa süreli, alaşıma bağlı)	Sabit kütleli debide ~%4 enerji artışı duvar sıcaklığını ~15 °C yükseltebilir (350 → 364 °C). Tolerans dahilinde.
Serpantin (Eşanjör) Paslanmaz çelik (316L) Al-Si alaşımı	Su tarafı: 60-90 °C Baca gazı tarafı: 100-150 °C	316L: 400-500 °C Al-Si: 250-300 °C (uzun süreli)	Eşanjör yüzeyi sürekli suyla soğutulduğundan kritik sıcaklık artışı beklenmez. Baca gazı tarafında ~6 °C artış tolere edilebilir (150 → 156 °C). Tolerans dahilinde (94 °C marj). H ₂ kaynaklı su buharı artışı kondensasyon bölgesini genişletebilir.
Brülör Paslanmaz çelik (304/316) Al-Si kaplamalı çelik	300-500 °C (alev yakınında)	304/316: 700-800 °C Al-Si kaplama: 500-600 °C (kısa süreli)	~%4 enerji artışı alev sıcaklığını ~20 °C yükseltir (500 → 520 °C) 304/316 için tolerans dahilinde (180 °C marj). Al-Si kaplama için sınırda ancak aralık içinde. Kritik risk: Yüksek alev hızı (~3 kat) nedeniyle geri tepme. Brülör delik geometrisi ve alev tutucuların ön kontrolü gerekebilir.
Enjektör / Nozul Pirinç (CuZn) Ni-Cr kaplamalı pirinç	50-150 °C (gaz akışı soğutur)	Pirinç: 200-300 °C Ni-Cr kaplama: 400-500 °C (kısa süreli)	Nozul çıkışında ~6 °C artış görülebilir (150 → 156 °C); gaz akışı soğutma sağlar. Tolerans dahilinde (44 °C marj). Kritik konu: H ₂ molekül boyutu küçük olduğundan O-ring ve contalarda sızıntı riski; H ₂ uyumlu conta gerektirebilir.
Gaz Vanası / Regülatör Alüminyum gövde contalar	20-60 °C (ortam sıcaklığı)	Gövde: 80-100 °C Contalar: 80-120 °C	Yanma odasından uzak; sıcaklık değişimi beklenmez. Tolerans dahilinde (20 °C marj). Kritik konular: Özgül ağırlığın düşüşü nedeniyle aynı enerji için ~%20 daha fazla hacimsel debi gerekir. Vana kapasitesi ve orifis boyutu değerlendirilmeli. H ₂ geçirgenliği yüksek conta uyumluluğu kontrol edilmeli.

Brülör tasarımı açısından Wobbe indeksi benzer olan yakıtlar, hava-yakıt oranı, nozul çapı ve gaz basıncı gibi temel parametrelerde önemli bir değişiklik gerektirmeksizin uyumlu kabul edilmektedir. Buna karşın bu endeksteeki düşüş belirginleştiğinde alev boyu değişimleri, geri tepme veya alev ayrışması gibi yanma stabilitesi sorunları ortaya çıkabilmektedir. Nitekim hidrojenin alev hızı doğal gaza göre yaklaşık bir büyüklük mertebesi daha yüksek olup yanma için gereken hava miktarı daha düşüktür. Ayrıca adyabatik alev sıcaklığının artması, uygun önlemler alınmadığında NO_x oluşma potansiyelini etkileyebilmektedir (MARCOGAZ, 2022).

Avrupa standartları EN 437 teknik önerilerine göre, doğal gazlar için Wobbe indeksi kabul aralığı 45,7-54,7 MJ/m³ olarak belirlenmiştir (European Committee for Standardization, 2021). ISO 6976 standardına göre 15 °C referans koşullarında hesapla-

nan Wobbe indeksi değerleri hacimsel %20 H₂ için 48,09 MJ/m³, %30 H₂ için 46,61 MJ/m³ ve %40 H₂ için 45,13 MJ/m³ şeklindedir (International Organization for Standardization, 2016). Bu sonuçlara göre %20 H₂ oranı EN 437 kabul aralığı içinde kalmakta, %30 H₂ oranı alt sınıra yaklaşmakta, %40 H₂ oranı ise 45,7 MJ/m³ sınırının altına düşmektedir. Güncel duvar tipi ısıtma sistemlerinin modülasyon kabiliyeti ve yaygın kullanılan malzemelerin (paslanmaz çelik, Al-Si, pirinç) tolerans düzeyi göz önüne alındığında, %20 H₂ oranı için hesaplanan 48,09 MJ/m³ Wobbe indeksi değeri EN 437 kabul aralığının alt bölgesinde kalmakta olup gaz değiştirilebilirliği açısından temel güvenlik parametreleri korunarak uygulanabilir niteliktedir. Bununla birlikte, geri tepme riski, hava fazlalığı ayarı ve sızdırmazlık elemanlarının H₂ uyumluluğu konularında ayar ve periyodik kontrol ihtiyacı değerlendirilmelidir.

Emisyon açısından değerlendirildiğinde, hidrojen katkısı karbon içermediğinden CO₂ emisyonlarını tüm şartlarda azaltmaktadır. %40 H₂ seviyesinde bu azalma yaklaşık %59'a ulaşmıştır. CO emisyonları da kararlı yanma koşullarında, hidrojenin yanma kalitesini artırması nedeniyle sistematik olarak düşmüştür. Ancak NO_x emisyonları, artan alev sıcaklığına bağlı termal NO_x mekanizması nedeniyle artış göstermiştir. Bu çalışmada sunulan analizler sabit yakıt debisi koşullarında gerçekleştirilmiş olup, hacimsel oranlarda hidrojen ilavesiyle ısı güç artışı meydana gelmektedir. Avrupa Komisyonu'nun 813/2013 sayılı Ecodesign yönetmeliğine göre gazlı yakıtlı konut tipi kombiler için NO_x emisyon sınırı değeri 56 mg/kWh olarak belirlenmiştir (European Commission, 2013). Doğal gaz yanması için tipik dönüşüm faktörü (~2 mg/kWh per ppm) esas alındığında, %20 H₂ seviyesinde elde edilen 26,83 ppm NO_x değeri yaklaşık 48-56 mg/kWh aralığına karşılık gelmektedir. Bu değerlendirmeye göre, %20 H₂ seviyesinin mevcut emisyon standartlarıyla uyumlu, kabul edilebilir bir çalışma noktası olduğu belirlenmiştir. Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde incelenen hidrojen oranlarının (%10-%40) tamamı EN 437 standardının belirlediği kabul aralığında kalmakta olup, gaz değiştirilebilirliği tek başına kısıtlayıcı faktör oluşturmamaktadır. Buna karşın, NO_x emisyonları açısından %20 H₂ oranı mevcut regülasyonlar çerçevesinde yüzdelik değişimlerin gerçek çalışma koşullarına göre ve birden çok parametre açısından değerlendirildiğinde üst sınır olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, mevcut altyapıyla uygulanabilirlik değerlendirildiğinde belirleyici kısıt yalnızca gaz değiştirilebilirliği değil, NO_x emisyon limitleri gibi farklı parametreler etkili olmaktadır.

3. Tartışma ve Öneriler

Bu çalışmada, doğal gaza farklı oranlarda hidrojen ilavesinin kombi vb. ısıtma sistemlerinin yanma karakteristikleri ve emisyon performansı üzerindeki etkileri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı bir yaklaşımla teorik olarak incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki deneysel ve nümerik çalışmalarla karşılaştırıldığında belirgin benzerlikler, kısmi paralellikler ve bazı beklenen ayrıklıklar gözlenmiştir.

Öncelikle hidrojen ilavesiyle birlikte alev sıcaklıklarının artması literatürde geniş kabul gören bir bulgudur. Hidrojenin yüksek laminer yanma hızı, difüzyon karakteristiği ve düşük moleküler ağırlığı karışımın kararlılığını artırmakta ve reaksiyon bölgesinin brülöre daha yakın bir konuma kaymasına neden olmaktadır. Elde edilen sıcaklık artışı eğilimleri, Xin, Y., Wang, K., Zhang, Y., Zeng, F., He, X., Takyi, S.

A. ve Tontiwachwuthikul, P (2021) ile İlbaş, Yılmaz ve Kaplan (2005) tarafından rapor edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir. Her iki çalışmada da hidrojen oranının artmasıyla alevin daha kısa sürede stabilize olduğu ve sıcaklık gradyanlarının daha keskinleştiği belirtilmektedir. Bununla birlikte, hidrojen oranı %30-40 seviyelerine yaklaştığında bazı sıcaklık düzensizliklerinin ve yerel aşırı ısınmaların başlaması, literatürde belirli çalışmalarla örtüşmektedir. Buna karşın bazı yayınlarda %40 seviyelerine kadar belirgin bir olumsuzluğa rastlanmadığı belirtilmiştir. Bu farklılığın nedeni, kullanılan brülör geometrisi, hava giriş profilleri ve türbülans modelinin konfigürasyona bağlı değişkenlik göstermesiyle açıklanabilmektedir.

Emisyon eğilimleri incelendiğinde elde edilen sonuçlar büyük ölçüde literatürle paraleldir. Özellikle hidrojen oranının artmasıyla CO ve CO₂ emisyonlarının azalması, hem daha düşük karbon içeriğinin hem de yanmanın daha etkin gerçekleşmesinin doğal bir sonucudur. NO_x davranışı ise literatürle karşılaştırıldığında hem paralellik hem de kısmi aykırılık göstermektedir. Hidrojen ilavesinin NO_x oluşumunda iki karşıt mekanizma oluşturduğu bilinmektedir. Artan alev sıcaklığı ve reaktivite NO_x emisyonlarını artırıcı etki yaparken, su buharı oluşumundaki artış ve termal kapasite yükselmesi belirli oranlarda NO_x azaltıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle NO_x emisyonunun hidrojen oranına yanıtı her zaman benzer değildir. Düşük ve orta H₂ oranlarında gözlenen hafif artışlar ve belirli bir eşikten sonra görülen düşüş eğilimi, Xin, Y., Wang, K., Zhang, Y., Zeng, F., He, X., Takyi, S. A. ve Tontiwachwuthikul, P. (2021). ile Jankowski, R., Ślefarski, R., Bauma, I., Varlamov, G. (2025) çalışmalarının bulgularıyla benzerlikler göstermektedir. Ancak bazı kesitlerde NO_x davranışının beklenenden daha düzensiz bir trend göstermesi, sistemdeki lokal sıcaklık değişimleri ve türbülans yoğunluğunun yapısal etkileriyle açıklanabilir.

Sunulan analizler sabit kütleli yakıt debisi koşullarında gerçekleştirilmiş olup, hacimsel oranlarda hidrojen ilavesiyle ısı verim artmıştır. Isıl güç, %20 H₂ katkısıyla yaklaşık %4,6 ve %40 H₂ katkısıyla ise yaklaşık %11,7 oranına kadar artış göstermiştir. Mevcut sistemlerde herhangi bir regülasyon yapılmaksızın hidrojen oranının artırılması durumunda, ısı güç ve buna bağlı alev sıcaklığı yükseleceğinden termal NO_x oluşumu artmaktadır. Ancak literatürde, sabit ısı güç koşullarında hidrojen katkısıyla NO_x emisyonlarının azaldığını bildiren çalışmalar da mevcuttur. Bu beklenen farklılık, öncelikle sabit tutulan parametreler, yanma odası geometrisi, alev yapısı ve baca gazı bileşiminin değişimi ile ilişkilidir. Dolayısıyla hidrojen katkısının NO_x üzerindeki etkisi tek bir eğilimle genellenemez nitelikte değildir ve sistem tabanlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Alev hızı ve emisyon değerleri açısından elde edilen sonuçlar, hidrojen zenginleştirilmiş doğal gaz karışımlarında yanmanın daha enerjik ve kararlı hâle geldiğini göstermesi literatürle uyumludur. Hidrojen ilavesiyle laminer alev hızının artması ve fakir alev alma sınırının genişlemesi, karışımlarda yanma kararlılığının iyileşmesiyle açıklanabilir Tunçer, O. (2009). Bununla birlikte %40 H₂ seviyesinde bazı düzensizliklerin ortaya çıkması, mevcut brülör geometrisinin bu seviyelerde hidrojen uyum tasarım sınırına geldiğini göstermektedir. Bu bulgu, literatürde yüksek hidrojen oranlarında brülör yeniden tasarımının gerekebileceğini savunan çalışmalarla uyumludur.

Yüksek H₂ oranlarında NO_x emisyonlarının kontrol altında tutulabilmesi için ısı gücün sabit tutulması gerekmekte olup bu durum, gaz valfi veya orifis ayarıyla toplam yakıt debisinin düşürülmesi, hava fazlalık katsayısının ($\lambda \geq 1,2$) artırılması ya da modülasyon aralığının yeniden kalibrasyonu gibi sistemsel müdahalelerle sağlanabilir. Öte yandan, hidrojen ilavesiyle yanma ürünlerindeki su buharı konsantrasyonunun artması yoğunlaşma davranışını değiştirmekte olup artan yoğunlaşma miktarının eşanjör yüzeylerinde korozyon davranışı ve kondensat drenaj sistemlerinin uzun dönemli performansı üzerindeki olası etkileri, gelecekte karşılaşılabilecek operasyonel sorunların önlenmesi bağlamında araştırılması gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir.

Gerçekleştirilen analizler ışığında elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmektedir:

- Sabit kütleli yakıt debisi koşullarında hacimsel oranlarda hidrojen ilavesi ısı gücü artırmıştır. Bu durum CO ve CO₂ emisyonlarını azaltırken termal NO_x oluşumunu yükseltmiştir.
- CO₂ emisyonları hidrojen oranıyla sistematiik olarak azalmış, %40 H₂ seviyesinde bu azalma yaklaşık %59'a ulaşmıştır.
- Hidrojen oranının %30'un üzerine çıkmasıyla birlikte, geri tepme riskinin belirginleşmesi ve iyonizasyon sensörlerinin karbon bazlı iyon yetersizliği oluşturma riski nedeniyle algılama kapasitesini yitirmesi, mevcut cihaz tasarımlarının bu koşullarda güvenli çalışmasını sınırlandırmaktadır.
- %30 H₂ seviyesinden itibaren yerel sıcak nokta oluşumları ve türbülans düzensizlikleri gözlenmiş olup, %40 H₂ oranında mevcut brülör tasarımının uyum sınırlarına dayandığı belirlenmiştir. Bu iki H₂ oranında da tüm araştırma parametreleri birlikte değerlendirildiğinde uygun olmadığı tespit edilmiştir.
- Wobbe indeksinin standart aralığın altına düşmesi ve elastomerik conta malzemelerinin yüksek hidrojen geçirgenliği nedeniyle üretici onayı ve bileşen modifikasyonunu zorunlu hale gelmektedir.
- Hava fazlalık katsayısının yükseltilmesinin ($\lambda=1,2$), alev sıcaklığı artışını sınırlayarak sistemin sürdürülebilir çalışma aralığını genişletebileceği değerlendirilmiştir.
- Malzeme tolerans analizlerinde, %20 H₂ oranının tüm yanma bileşenlerinde güvenli çalışma aralığında kalan bir değer olduğu tespit edilmiştir.
- Hidrojen katkısı alev sıcaklığını ve yanma verimini artırmış olup, incelenen tüm performans, emisyon ve uyumluluk parametreleri birlikte ele alındığında %20 H₂ oranı optimum çalışma noktası olarak belirlenmiştir.

3.1. Öneriler

Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde, mevcut kombi vb. ısıtma sistemlerinin herhangi bir donanımsal modifikasyon yapılmaksızın %20'ye varan hacimsel hidrojen oranlarında kabul edilebilir performans ve emisyon değerleri sergileyebileceği ortaya çıkmaktadır. Bu durum, konut tipi ısıtma sektöründe kısa-

orta vadeli dekarbonizasyon stratejileri açısından önemli bir potansiyele işaret etmektedir. Ancak hidrojen geçişinin gerçek anlamda sürdürülebilir ve çevresel açıdan faydalı olabilmesi için, kullanılacak hidrojenin üretim kaynağı kritik öneme sahiptir. Günümüzde küresel hidrojen üretiminin çoğu fosil yakıtlardan elde edilmekte olup bu süreç önemli miktarda karbon emisyonuna neden olmaktadır. Doğal gazla hidrojen katılmasının çevresel faydalarının tam olarak gerçekleşebilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojen kullanımıyla mümkün olacaktır.

Bu çerçevede gelecek araştırmalar ve sektörel uygulamalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Sayısal model çıktılarının ulusal düzeyde de gerçek şebeke koşullarında uzun süreli alan testleriyle karşılaştırılması, hidrojen geçiş stratejilerinin güvenilirliğini destekleyecektir.
- %40 H₂ seviyesinde gözlenen sıcaklık gradyanları ve türbülans kinetik enerjisindeki düzensizlikler göz önüne alındığında, yüksek hidrojen oranlarına yönelik tasarımlarda ısı yorulma direnci yüksek malzemelerin ve optimize edilmiş brülör geometrilerinin araştırılması, güvenli çalışma aralığının genişletilmesine katkı sağlayabilecektir.
- Cihazın başlatma-kapanma çevrimleri, yük modülasyonu ve ani talep değişimleri sırasında hidrojen katkılı yakıtların yanma stabilitesi ile geri tepme riskinin incelenmesi, laboratuvar koşullarından saha uygulamalarına geçişte kritik mühendislik verisi sağlayacaktır.
- Hidrojen ilavesiyle artan su buharı konsantrasyonunun eşanjör yüzeylerinde korozyon davranışı ve kondensat drenaj sistemleri üzerindeki uzun dönemli etkilerinin incelenmesi, operasyonel güvenilirlik açısından faydalı olacaktır.
- Gelecek çalışmalarda, yenilenebilir kaynaklı yeşil hidrojenin mevcut ısıtma sistemlerine entegrasyonunun karbonsuzlaştırma politikaları çerçevesinde değerlendirilmesi önerilmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yazar 1, literatür taraması, sayısal modelleme, HAD analizleri ve makalenin yazımı; Yazar 2, danışmanlık, metodoloji geliştirme ve makale revizyonu konularında katkı sağlamışlardır.

Kısaltmalar (Abbreviations)

HAD/CFD: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)

GCI: Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index)

SST: Kayma Gerilmesi Taşınımı türbülans modeli (Shear Stress Transport)

PDF: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)

ppm: Milyonda bir (partspermillion)

Simgeler (Symbols)

Φ : Eşdeğerlik oranı

k: Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)

T: Sıcaklık ($^{\circ}C$)

P: Basınç (Pa)

\dot{m} : Kütleli debi (kg/s)

Q: Isıl güç (kW)

Wi: Wobbe indeksi (MJ/m^3)

LHV: Alt ısıl değer (MJ/kg)

(A/F): Hava-yakıt oranı (kg hava/kg yakıt)

x: Hacimsel oran

y: Kütleli oran

Yunan Harfleri (Greek Letters)

λ : Hava fazlalık katsayısı

ϵ : Türbülans yayılım oranı

ω : Özgül yayılım oranı (1/s)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

Alt İndis (Subscript)

2: Moleküler bileşenler (H_2, CO_2, O_2, N_2)

4: Metan (CH_4)

x: Değişken indis (NO_x, C_xH_y)

Kaynaklar

Cao, W., Liu, F., ve You, X. Y. (2018). Performance of casting aluminum-silicon alloy condensing heating exchanger for gas-fired boiler. *Heat and Mass Transfer*, 54, 1951–1960. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2284-8>.

Asia Pacific Energy Research Centre. (2023). Hydrogen Report 2023. *APEREC*. Tokyo. 4. Erişim adresi: https://aperc.or.jp/file/2024/5/30/APERC_Hydrogen_Report_2023_May2024.pdf

Commission Regulation (EU) No 813/2013 of 2 August 2013 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for space heaters and combination heaters. *Official Journal of the European Union*, L 239, 136–161. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0813>

- Verhelst, S. ve Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490-527. doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001
- Büyükakın, M. K. ve Öztuna, S. (2020). Numerical investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and non-premixed burner system from flame structure and pollutants aspect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35246-35256. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.03.117.
- Al-ajmi, R., Qazak, A. H., Sadeq, A. M., Al-Shaghdari, M., Ahmed, S. F. ve Sleiti, A. K. (2025). Numerical investigation of the potential of using hydrogen as an alternative fuel in an industrial burner. *Fuel*, 385, 134194. doi:10.1016/j.fuel.2024.134194
- Boulahlib, M. S., Medaerts, F. ve Boukhalfa, M. A. (2021). Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(75), 37628-37640. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.103
- El-Ghafour, S. A. A., El-dein, A. H. E., Aref, A. A. R. (2010). Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(6), 2556-2565. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.12.049
- Tang, C., Zhang, Y., Huang, Z. (2014). Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 195-216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.005>
- International Energy Agency. (2025). Global Hydrogen Review 2025. IEA. Paris, 45-67. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
- European Committee for Standardization [CEN]. (2021). *EN 437:2021 Test gases — Test pressures — Appliance categories*. Brussels, Belgium: CEN.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2016). *ISO 6976:2016 Natural gas — Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Jankowski, R., Ślęfarski, R., Bauma, I., Varlamov, G. (2025). Thermal and emission performance evaluation of hydrogen-enriched natural gas-fired domestic condensing boilers. *Energies*, 18(13), 3240. <https://doi.org/10.3390/en18133240>
- Lamioni, R., Bronzoni, C., Folli, M., Tognotti, L. ve Galletti, C. (2023). Impact of H₂-enriched natural gas on pollutant emissions from domestic condensing boilers: Numerical simulations of the combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(52), 19686-19699. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.02.040.
- Li, J., Chou, S. K., Yang, W. M. ve Li, Z. W. (2009). A numerical study on premixed micro-combustion of CH₄-air mixture: Effects of combustor size, geometry and boundary conditions on flame temperature. *Chemical Engineering Journal*, 150(1), 213-222. doi:10.1016/j.cej.2009.02.015
- Lipatnikov, A. N. ve Chomiak, J. (2002). Turbulent flame speed and thickness: phenomenology, evaluation, and application in multi-dimensional simulations. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28(1), 1-74. doi:10.1016/S0360-1285(01)00007-7
- MARCOGAZ. (2022). Hydrogen quality for blending with natural gas – Technical recommendations. *MARCOGAZ Report*. Brussels. 4-6.
- Middleton, P., Larson, R., Nicklas, M. ve Collins, B. (2003). Renewable hydrogen forum: A summary of expert opinion and policy recommendations. *American Solar Energy Society*, 14(2), 1-79.
- Odeh, A. ve Paul, M. C. (2024). Effects of hydrogen enrichment on the heat generation and emission of natural gas turbulent premixed flame. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(Part B), 1176-

1191. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.10.140

Roache, P. J. (1994). Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), 405-413. <https://doi.org/10.1115/1.2910291>

Schiro, F., Stoppato, A., Benato, A. (2020). Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective. *Carbon Resources Conversion*, 3, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2020.08.001>

Tahtouh, T., Halter, F., Samson, E. ve Mounaïm-Rousselle, C. (2009). Effects of hydrogen addition and nitrogen dilution on the laminar flame characteristics of premixed methane-air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(19), 8329-8338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.071>

Tunçer, O. (2009). Hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtının alev hızları ve emisyon değerlerinin kimyasal kinetik analizi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 29(2), 29-42. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/399887>

Wright, M. L., Lewis, A. C. (2022). Emissions of NOx from blending of hydrogen and natural gas in space heating boilers. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10(1), 00114. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00114>

Xin, Y., Wang, K., Zhang, Y., Zeng, F., He, X., Takyi, S. A. ve Tontiwachwuthikul, P. (2021). Numerical simulation of combustion of natural gas mixed with hydrogen in gas boilers. *Energies*, 14(21), 6883. <https://doi.org/10.3390/en14216883>

Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54. https://doi.org/10.1501/Csaum_0000000064

İlbaş, M., Yılmaz, İ. ve Kaplan, Y. (2005). Investigations of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NOx emission characteristics in a model combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10), 1139-1147. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.016>