



Ferdowsi
University of
Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Society of
Manufacturing
Engineering of
Iran

Investigation of the Hydrogen Increment to Natural Gas on Combustion Characteristic: Numerical Simulation*

Research Article

Ebrahim Afshari¹ , Mahdiye Haratin Aval², Nabi Jahantigh³

 [10.22067/jacsm.2025.94099.1338](https://doi.org/10.22067/jacsm.2025.94099.1338)

Abstract-- Injecting green hydrogen into natural gas is considered a renewable energy storage method. It is a cost-effective option for providing heat and electricity to residential and commercial sectors while reducing the carbon content of natural gas networks. By injecting less than 10% hydrogen into natural gas, there is no need to change the combustion infrastructure. The aim of this study is to investigate hydrogen injection into the urban gas transmission network by numerically simulating the combustion chamber of a natural gas and hydrogen mixture and finding the appropriate natural gas/hydrogen ratio by examining the combustion characteristics. For this purpose, the conservation equations of mass, momentum, energy and chemical components have been solved numerically. Comparison of the results of the present method with the experimental results, shows the high agreement and accuracy of the solution method. The results show that adding hydrogen increases the temperature and flame elongation, reduces carbon dioxide emission, increases water and the amount of NO_x produced. In the case of 2.5% hydrogen, the heat of reaction is reduced compared to pure methane, but gradually and with increasing hydrogen percentage, the heat of reaction increases.

Key Words: Numerical Simulation, Mixed fuel, Hydrogen, produced NO_x, Combustion chamber

1. Introduction

Due to the economic growth of countries, population growth, depletion of fossil fuels, volatility of fuel prices, the need for energy security, and also the pollutants resulting from the combustion of common fossil fuels such as diesel, oil, and coal, the development of renewable and less polluting energy sources is very important. The most important of these sources are solar energy, wind energy, geothermal energy, biogas, and hydrogen energy. The calorific value of hydrogen is much higher than that of methane and diesel fuel. Hydrogen is the lightest gaseous substance in the world and is considered one of the cleanest fuels available. One of the methods that eliminates the challenges of using hydrogen is injecting it into the

municipal gas network and creating a mixture of hydrogen and gas [1]. Finding the right ratio of hydrogen to natural gas is one of the challenges ahead. The aim of this research is to simulate the combustion of a mixture with certain ratios of natural gas and hydrogen and to investigate combustion characteristics such as calorific value, combustion temperature, flame length and pollution level for injecting hydrogen available in industries into the urban gas network.

2. Governing Equations

The combustion chamber under study is shown in figure (1) The flow inside the chamber is assumed to be steady and compressible. The reactants and products are assumed to be ideal gases. Buoyancy effects are ignored. The specific heat capacity is calculated from the mixing law model. According to the Reynolds number of the flow; the flow is turbulent and the turbulence model is used to model this flow.

The conservation equations include conservation of mass, momentum, energy, and conservation of particles [2].

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} C^i) = \nabla \cdot (D^{i,eff} \nabla C^i) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) \quad (4)$$

The second-order upwind model has been used to discretize the continuity, momentum, turbulence, and species equations in order to increase the accuracy of the results [3, 4].

3. Results

In order to ensure the numerical simulation, the simulation results have been compared with the results available in the reference. there is a very good agreement between

* Manuscript received June 17, 2025 Revised July 02, 2025, Accepted September 13, 2025.

¹ Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan.

Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

² Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol.

them. Figure (2) shows the changes in the mass fraction of carbon dioxide for different percentages of hydrogen in the fuel input. As the percentage of hydrogen input increases, the amount of carbon dioxide decreases, and in addition to stabilizing the flame, it slows down the progress of the combustion process in the early and middle stages, which in turn reduces the mole fraction of carbon monoxide and carbon dioxide in the later stages.

The values of NOx mass fraction are plotted in figure (3) for different hydrogen percentages along the defined

axis line inside the chamber. It is observed that with increasing hydrogen fuel fraction at the inlet, the amount of NOx produced in the chamber increased. According to the graph, NOx has been produced since the flame was formed and combustion took place, and as the amount of hydrogen input increased, the changes in the increase in NOx produced became smaller.

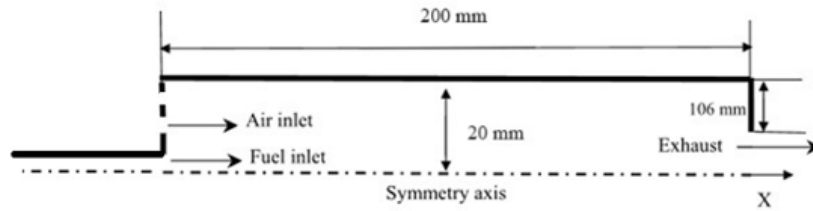


Fig.1. Combustion chamber geometry and boundary conditions

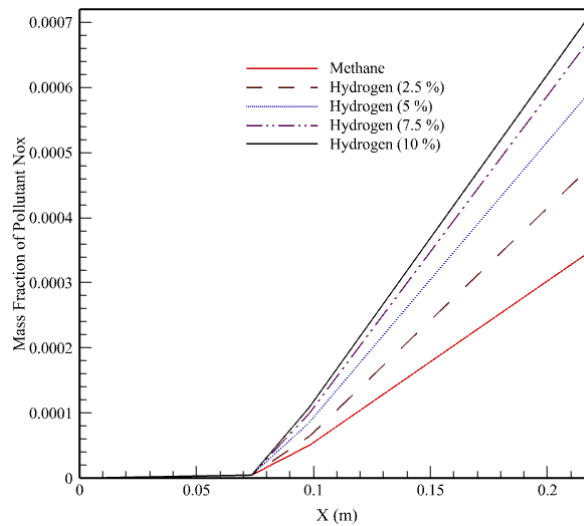


Fig. 2. Changes in carbon dioxide mass fraction along the axis for different hydrogen percentages

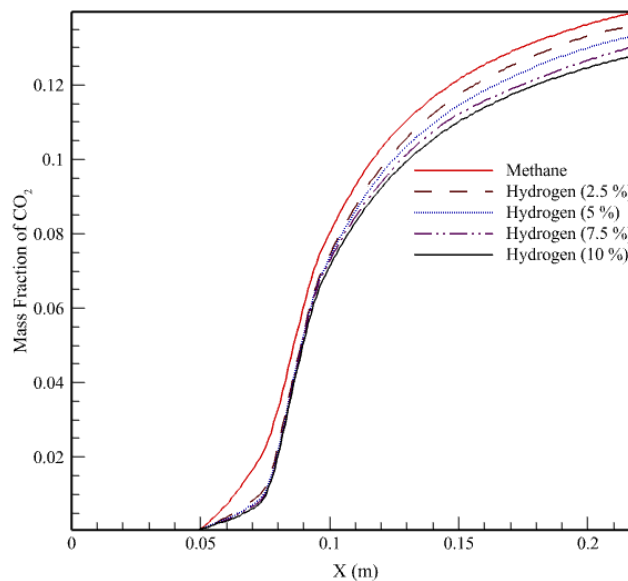


Fig. 3. Variations in CO₂ mass fraction along the axis for different hydrogen percentages

4. Conclusion

The purpose of this research is to simulate the combustion of a mixture with certain proportions of natural gas and hydrogen to find the optimal ratio of hydrogen to natural gas and to investigate combustion characteristics such as calorific value, combustion temperature, flame length, and pollution level for injecting hydrogen available in industries into the urban gas network. For this purpose, the equations of mass, momentum, energy and particles in the combustion chamber have been modeled using Fluent software, considering a fuel mixture of methane and different percentages of hydrogen at the inlet. The results show that by adding hydrogen, the carbon dioxide emission rate decreased due to the reduction in the total carbon rate, the amount of water produced increased, and the amount of NO_x produced in the chamber also increased. The addition of hydrogen also affects the flame structure and causes the flame to stretch. At 2.5% hydrogen in the inlet, the heat of reaction decreased compared to pure methane; however, gradually and with increasing hydrogen percentage, the heat of reaction increased.

5. References

- [1] R. Mahadevan and J. Asafu-Adjaye, "Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2481-2490, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.019>
- [2] V. S. Nuotio-Antar, *Equations Governing Fluid Flow and Heat Transfer, in Fundamentals of Low Gravity Fluid Dynamics and Heat Transfer*: CRC Press, pp. 19-30, (2019).
- [3] J. R. Howell and R. Siegel, *Thermal radiation heat transfer. Volume 3 Radiation transfer with absorbing, emitting, and scattering media*, 1971.
- [4] A. Dolai, P. Badhuk, and R.V. "Ravikrishna, Investigation of syngas combustion in a novel ultra-low emission 20-kW two-stage combustor," *Fuel*, vol. 340, p. 127497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127497>.



شبیه سازی عددی افزایش هیدروژن افزوده شده به گاز طبیعی بر مشخصه های احتراق در مشعل های صنعتی*

مقاله پژوهشی

ابراهیم افشاری^(۱)  مهدیه هراتیان اول^(۲) نبی جهاننغ^(۳) 10.22067/jacsm.2025.94099.1338

چکیده تزریق هیدروژن سبز به گاز طبیعی به عنوان یک روش ذخیره سازی انرژی های تجدیدپذیر محسوب می شود و یک گزینه مقرون به صرفه برای تأمین گرما و برق برای بخش های مسکونی و تجاری با کاهش محتوای کربن شبکه های گاز طبیعی است. با تزریق کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن به گاز طبیعی، نیازی به تغییر زیرساخت های مربوط به احتراق نیز نیست. هدف از این مطالعه بررسی تزریق هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری با شبیه سازی عددی محفظه احتراق مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن و یافتن نسبت مناسب گاز طبیعی/هیدروژن با بررسی ویژگی های احتراق است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و اجزای شیمیایی به روش عددی حل شده است و مقایسه نتایج روش حاضر با نتایج تجربی، نشان دهنده تطابق و دقت بالای روش حل است. نتایج نشان می دهد افزودن هیدروژن باعث افزایش دما و کشیدگی شعله، کاهش انتشار کربن دی اکسید، افزایش آب و مقدار NOx تولید شده می شود. در حالت ۲/۵ درصد هیدروژن، میزان گرمای واکنش نسبت به متان خالص کاهش یافته، اما به تدریج و با افزایش درصد هیدروژن، گرمای واکنش افزایش می یابد.

واژه های کلیدی شبیه سازی، سوخت ترکیبی، هیدروژن، NOx تولیدی، محفظه احتراق.

مقدمه

گازهای گلخانه ای، کشورهای در حال توسعه و به خصوص کشورهای توسعه یافته به دنبال جایگزینی سوخت هایی با آلایندگی کمتر به جای هیدروکربن های رایج هستند. در این مسیر با پیشرفت تجهیزات پالایش، نگهداری و ذخیره سوخت، هیدروژن توانسته گوی رقابت را از سایر رقبا برآورد. فراورده واکنش سوختن هیدروژن به دلیل عدم وجود اتم کربن در سمت واکنش دهنده منجر به تولید گاز گلخانه ای نمی شود و از این جهت یک انتخاب ایدئال است. با این حال، ساخت وسایل نقلیه ای که صرفاً از هیدروژن استفاده می کنند؛ همچنان به عنوان یک گزینه بلندمدت و نامطمئن با موانع متعددی شامل فرآوری سخت و پرهزینه هیدروژن خالص، دشواری طراحی شبکه انتقال، خطر نگهداری هیدروژن در حجم بالا به دلیل واکنش پذیری آن

به دلیل رشد اقتصادی کشورها، رشد جمعیت، پایان پذیری سوخت های فسیلی، متغیر بودن قیمت سوخت، نیاز به امنیت انرژی و همچنین آلاینده های ناشی از احتراق سوخت های رایج فسیلی مانند گازوئیل، نفت و زغال سنگ، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و با آلاینده گی کمتر بسیار مهم است. از مهم ترین این منابع، انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی، بیوگاز و انرژی هیدروژن است. در میان کشورهای توسعه یافته صادر کننده انرژی، در دو دوره کوتاه مدت و بلندمدت، علیت دو طرفه ای بین رشد اقتصادی و مصرف انرژی وجود دارد؛ این درحالی است که در کشورهای در حال توسعه مصرف انرژی تنها در کوتاه مدت محرک رشد بوده است [1]. امروزه با توجه به اهمیت کاهش

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۳/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۶/۲۲ می باشد.

Email: e.afshari@eng.ui.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۲) کارشناس مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل.

و نظیر این‌ها روبه‌رو است که باعث شده استفاده از هیدروژن خالص به عنوان سوخت منطقی به نظر نرسد.

ارزش حرارتی هیدروژن نسبت به متان و سوخت دیزل بسیار بالاتر است. هیدروژن سبک‌ترین ماده گازی موجود در جهان است و از پاک‌ترین سوخت‌های موجود محسوب می‌شود. سوختن هیدروژن باعث تولید مواد سمی نظیر هیدروکربن‌ها، مونواکسیدکربن، اکسید سولفور، اسیدهای ارگانیک و دی‌اکسیدکربن نمی‌شود و تنها فرآورده حاصل از احتراق آن آب است. هیدروژن به عنوان سوخت جایگزین سوخت‌های فسیلی، مشکلات عملی سوخت‌های مایع نظیر محبوس شدن بخار، سخت شدن دیواره سرد و تبخیر ناکافی را ندارد. معایبی شامل چگالی انرژی پایین در مقایسه با سایر سوخت‌ها، نیاز به شبکه انتقال مجزا با ویژگی‌های خاص، عدم دسترسی به طور طبیعی و هزینه بالای فرآوری، پایین بودن خالص انرژی تولیدی و عدم امکان استفاده از هیدروژن خالص در مشعل‌های طراحی شده متداول پی‌آمد استفاده از هیدروژن است [2].

جایگزینی کامل گاز طبیعی با هیدروژن نیازمند تغییر زیرساخت‌هایی از قبیل ایجاد شبکه لوله‌کشی انتقال مجزا، سیستم حمل و نقل با استانداردهای ویژه، تغییر در مشعل‌های صنعتی و خانگی و... را دارد؛ اما مطالعات نشان داده که تزریق مقدار مشخصی هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری (کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن) بدون نیاز به ایجاد تغییرات در زیر ساخت، امکان‌پذیر است و مزایایی نظیر افزایش ارزش حرارتی سوخت، کاهش میزان آلاینده‌گی سوخت، از میان رفتن خطرات ذخیره‌سازی هیدروژن، امکان درآمدزایی با فروش هیدروژن موجود در صنایع به دولت‌ها دارد. در کنار فرصت‌های گفته شده ممکن است ایجاد تغییر در ترکیب رایج گاز طبیعی باعث آسیب به محیط زیست، شبکه انتقال و شبکه توزیع شود. لذا انجام این کار بدون بررسی دقیق تهدیدها ممکن است خسارت‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کند [3]. یکی از روش‌هایی که باعث حذف چالش‌های استفاده از هیدروژن می‌شود؛ تزریق آن به شبکه گاز شهری و ایجاد مخلوط هیدروژن و گاز است. هر گونه تغییر در ترکیب سوخت در شبکه مصرف نیازمند بررسی تغییرات به وجود آمده در رفتار مواد در شبکه توزیع و مصرف است.

عبدالملک در مطالعه‌ای در مورد روش‌های زیاده‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازی‌سازی از زیست‌توده با تأکید روی

گازی‌سازی که فرایندی مؤثر و اقتصادی و با اثرات تخریبی کمتر زیست‌محیطی برای تولید هیدروژن است پرداخت [4]. ژو و همکاران به بررسی عوامل مؤثر بر تولید هیدروژن از زیست‌گاز پرداختند. نتایج حاکی از کاهش نسبت مولی کربن دی‌اکسید به متان در مخلوط زیست‌گاز با وجود ثابت ماندن انرژی کل سیستم است که باعث کاهش تولید هیدروژن در سمت فرآورده می‌شود [5]. چانگ الکس و لی به بررسی روش‌های ریفرمینگ زیست‌گاز در جهت تولید هیدروژن در یک راکتور نوع لانه‌زنبوری پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دما، درصد تبدیل متان و میزان تولید هیدروژن افزایش می‌یابد [6]. کوپلر و همکاران در یک آزمون تجربی، آلاینده‌های خروجی حاصل از سوخت ترکیب فشرده هیدروژن و گاز طبیعی را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن هیدروژن باعث افزایش اکسید نیتروژن و کاهش هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود و محدوده رقیق‌سوزی را افزایش می‌دهد [7]. وانگ و همکاران در یک آزمایش تجربی، رفتار احتراق مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی را برای درصدهای حجمی مختلف هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن هیدروژن، مدت زمان احتراق کاهش می‌یابد؛ ولی حرارت آزاد می‌شود و اکسید نیتروژن بیشتر می‌شود [8]. ژائو و همکاران به بررسی تأثیر نسبت مولی هیدروژن به متان بر دمای احتراق پرداختند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش درصد هیدروژن؛ دمای احتراق تا ۷۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد [9]. دونو و همکاران ترکیب‌های مختلف گاز طبیعی و هیدروژن را در فشارهای بالا بررسی کردند. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما، فشار و درصد سوخت هیدروژن، زمان تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد [10]. دالگر بررسی عددی را روی احتراق مخلوط سوختی شامل گاز طبیعی و هیدروژن انجام داده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مخلوط متان - هیدروژن به جای متان خالص با انرژی تولیدی برابر؛ بازده حرارتی و اکسید نیتروژن را افزایش می‌دهد؛ اما هیدروکربن‌های نسوخته، کربن مونواکسید کاهش می‌یابد [11]. کمالی و همکاران در یک شبیه‌سازی عددی تأثیر مخلوط هوا و هیدروژن بر میکرواحتراق با نسبت ابعادی مشابه را بررسی کردند. این مطالعه منجر به این نتیجه گردید که کاهش ابعاد محفظه احتراق منجر به کاهش چشمگیر در زمان اقامت می‌شود [12]. بوربانو و همکاران به بررسی اثرات اضافه کردن هیدروژن به متان بر ساختار شعله و انتشار گاز کربن مونواکسید در مشعل‌های اتمسفریک پرداختند. در این مطالعه تأثیرات افزوده

صنایع به شبکه گاز شهری است.

هندسه، معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل عددی

محفظه احتراق مورد مطالعه مطابق شکل (۱) است. ابعاد محفظه در شکل نشان داده شده است. ضخامت دیواره‌ها ۵/۰ میلی‌متر است. جنس دیواره‌ها از فولاد ضد زنگ L316 است. جریان در داخل محفظه پایا و تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است. واکنشگرها و محصولات گاز ایدئال در نظر گرفته می‌شوند. از اثرات شناوری صرف نظر می‌شود. اثرات سورت و دوفور نیز در نظر گرفته نمی‌شوند. برای محاسبه چگالی سیال، مدل گاز کامل استفاده می‌شود. ظرفیت گرمایی ویژه از مدل قانون مخلوط و سایر مشخصات از قبیل هدایت حرارتی و ویسکوزیته گازها از مدل قانون مخلوط گاز ایدئال محاسبه می‌شوند. با توجه به عدد رینولدز جریان، جریان آشفته است و برای مدل‌سازی این جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف در مدل‌سازی جریان مغشوش تفاوت زیادی ندارد و فقط روند همگرایی مسئله متفاوت است.

معادلات بقا شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و بقای اجزا است [18].

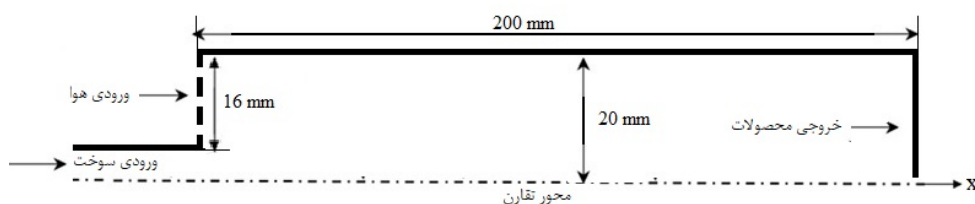
$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} C_i) = \nabla \cdot (D_i^{eff} \nabla C_i) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) \quad (4)$$

در معادله بقای جرم، $\vec{u}$ بردار سرعت و ρ چگالی مخلوط گاز است. معادلات بقا برای محفظه احتراق در دو بعد نوشته و حل می‌شوند. در معادله بقای مومنتوم، p و μ به ترتیب نشان دهنده فشار و ویسکوزیته هستند. در معادله بقای اجزا، C_i غلظت ذره و D_i^{eff} انتشار جرم مؤثر گونه i در مخلوط گاز است.



شکل ۱ هندسه و شرایط مرزی محفظه احتراق

شدن هیدروژن بر ساختار شعله و صدور کربن منوکسید در دو مشعل اتمسفریک مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش هیدروژن ارتفاع مخروط آبی رنگ شعله یک روند کاهشی ناشی از اضافه شدن هیدروژن دارد [13]. غفور و همکاران به بررسی مشخصات احتراقی شعله پخشی با سوخت آشفته هیبرید گاز طبیعی و هیدروژن پرداختند. افزودن هیدروژن تأثیر بسیار زیادی بر پایداری شعله و کاهش طول شعله، به خصوص در غلظت‌های بالای هیدروژن دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزودن هیدروژن به گاز طبیعی یک راه حل بی‌اثر برای کاهش NO_x و کربن‌مونواکسید در گستره این مطالعه است؛ در حالی که این استراتژی یک راه حل قابل توجه برای کاهش غلظت مولی کربن‌دی‌اکسید در حدود ۳۰٪ است [14]. وانگ و همکاران به بررسی اثر افزودن هیدروژن در مخلوط گاز طبیعی - هوا پرداختند. نتایج نشان دهنده بهبود مشخصه‌های احتراق در دو رژیم آرام و آشفته است [15]. شیواپراساد و همکاران تأثیر افزودن هیدروژن بر عملکرد احتراق و ویژگی‌های انتشار گازهای موتور بنزینی با سرعت بالا را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن باعث بهبود بازده موتور می‌شود [16]. بویویاکین و ازتان تأثیر غنی‌سازی متان با هیدروژن را بر ساختار شعله و آلاینده‌های حاصل از احتراق در دیگ بخار فشار داخلی با سیستم مشعل بدون پیش مخلوط بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن مانع انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق در دیگ بخار می‌شود و همچنین به دلیل افزایش میزان انتشار NO_x دمای شعله احتراق را افزایش می‌دهد [17].

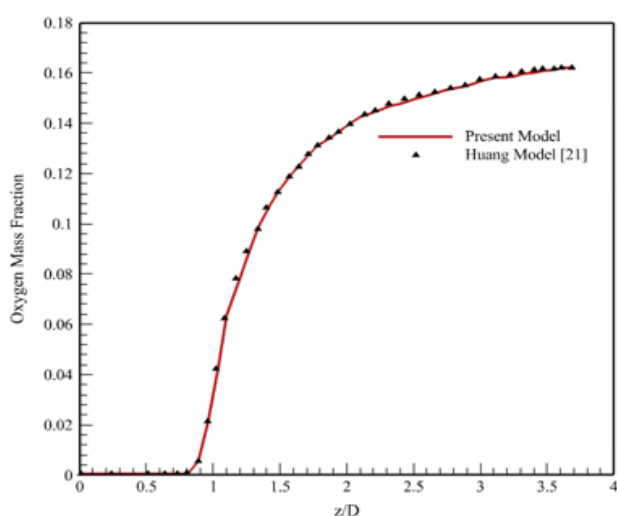
یافتن نسبت مناسب هیدروژن به گاز طبیعی یکی از چالش‌های پیش رو می‌باشد. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی احتراق مخلوط با نسبت‌های معین گاز طبیعی و هیدروژن و بررسی ویژگی‌های احتراق مانند ارزش حرارتی، دمای احتراق، طول شعله و میزان آلاینده‌گی برای تزریق هیدروژن موجود در

فلوینت انجام شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تأثیر افزایش هیدروژن بر عملکرد سوخت با استفاده از مدل‌سازی عددی است. بنابراین در فاز شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن سوخت به صورت ترکیبی از متان و هیدروژن با درصدهای صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است.

نتایج

صحت‌سنجی

به منظور اطمینان از شبیه‌سازی عددی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج موجود در مراجع مقایسه شده است. به این منظور، تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب طول بی‌بعد شده محفظه احتراق در مطالعه حاضر و مرجع [21]، مطابق شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل حاضر و نتایج مرجع [21] وجود دارد.



شکل ۲ مقایسه تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب طول بی‌بعد روی محور تقارن در مرجع [21] و مدل حاضر

در مرجع [21] طول و قطر کلی محفظه به همراه طول نازل سوخت ثابت بوده است، در حالی که قطر و سرعت ورودی سوخت به داخل محفظه متغیر است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی برای حالتی که قطر و سرعت ورودی سوخت به ترتیب برابر ۴ میلی‌متر و ۱۱۷ متر بر ثانیه می‌باشد، انجام شده است. در این مطالعه مدل‌سازی احتراق برای چهار حالت مختلف انجام شده است. ابتدا احتراق هیدروژن و هوا،

تحلیل محفظه احتراق شامل جریان سیال به صورت دوبعدی، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه واکنش‌های شیمیایی، به کمک مدل‌سازی عددی جریان است. از روش حجم محدود که دارای کاربرد بیشتری به خصوص در مدل‌سازی جریان‌های تراکم‌ناپذیر است، استفاده می‌شود [19,20].

به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، هندسه به صورت متقارن و دوبعدی شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی در شکل (۱) ارائه شده است. شرایط مرزی متغیرهای جریان بر مرزهای مدل انتخابی، اعمال می‌شوند. شرایط مرزی اعمال شده در ورودی، مقدار معین سوخت و اکسیژن به داخل محفظه است که از قسمت ورودی تزریق می‌شود. مقادیر شرایط مرزی طبق مرجع [21] است. شرط مرزی بخش ورودی سوخت، دبی مشخص با مقدار ۱/۱۱ گرم بر ثانیه است. دما ۲۹۳ کلوین و نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۰/۳۸، کربن مونواکسید برابر ۰/۴۸، نیتروژن برابر ۰/۱۴ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در بخش ورودی اکسید کننده نیز از نوع دبی ورودی مشخص به میزان ۱۵/۷۴ گرم بر ثانیه و دما ۸۴۱ کلوین است. همچنین نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی اکسیژن برابر ۰/۱۶۹، آب برابر ۰/۰۲۸، کربن دی اکسید برابر ۰/۰۳۶ و نیتروژن برابر ۰/۷۶۷ تنظیم شده است. روی دیواره‌های محفظه اختلاط شرط عدم لغزش اعمال و دیواره‌ها به صورت عایق در نظر گرفته شده است. شرط تقارن در خط مرکزی و شرایط فشار خروجی مشخص در خروجی اعمال شده است. جریان محصولات احتراق از قسمت خروجی خارج می‌شود.

برای شبیه‌سازی عددی از روش گسسته‌سازی حجم محدود استفاده شده است. شبکه تولیدی شامل المان چهارضلعی و سازمان یافته است و نتایج دقت بالایی دارند. استقلال نتایج از شبکه نیز بررسی شده است و با تعداد ۱۳۸۴۰۰۰ سلول، نتایج مستقل از تعداد شبکه شده‌اند.

برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، معادلات توربولانس و گونه‌ها از مدل آپ‌ویند مرتبه دوم به منظور افزایش دقت نتایج استفاده شده است. مرتبه همگرایی همه معادلات 10^{-4} و برای معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی شیمی احتراق روش جریان آرام نرخ محدود استفاده می‌شود. مکانیزم مورد استفاده به صورت ۱۹ مرحله واکنش رفت و برگشتی و ۹ گونه است. شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار

مشخصات برای سرعت‌های ورودی و ابعاد محفظه، متان به طور کامل مصرف نمی‌شود و بخشی از آن در خروجی وجود دارد؛ در حالی که در احتراق هیدروژن - هوا، هیدروژن به طور کامل مصرف می‌شود و مقدار آن در خروجی برابر صفر است.

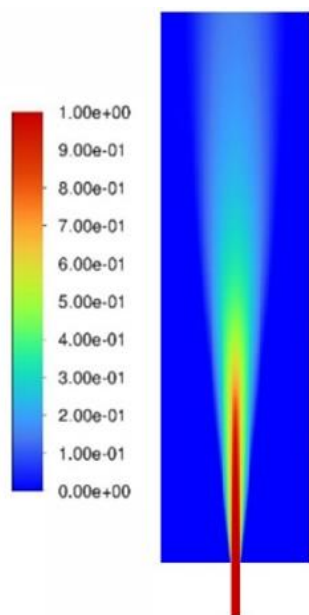
مطابق شکل (۵)، در احتراق هیدروژن - هوا، در قسمت‌های با طیف رنگی قرمز اکسیژن وجود داشته و در قسمت‌های آبی رنگ درصد اکسیژن درون محفظه کم شده است. در ابتدای محفظه که ورودی سوخت است، اکسیژن وجود ندارد. مطابق شکل (۶)، در احتراق متان - هوا، اکسیژن به طور کامل مصرف نشده است و بخشی از آن در خروجی وجود دارد و ناشی از عدم مصرف متان با توجه به مشخصات و ابعاد محفظه است.

کانتور دما می‌تواند معیار نشان دهنده شکل شعله درون محفظه احتراق باشد. مطابق شکل (۷)، هر چه مقدار دما بالاتر باشد دمای شعله بالاتر است. دمای ورودی سوخت ۲۹۳ کلوین است و در خروجی به ۲۹۷۰ کلوین می‌رسد. همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، دمای شعله در خروجی ۲۴۵۰ کلوین است که در مقایسه با احتراق هیدروژن هوا که دمای شعله ۲۹۷۰ کلوین بود، مقدار کمتری است؛ در حالی که با توجه به شرایط مرزی تعریف شده دمای هر دو در ورودی ۲۹۳ کلوین و یکسان است که ناشی از کامل مصرف نشدن متان و وجود آن در خروجی است. هر چه مقدار دما بالاتر باشد دمای شعله بالاتر است و احتراق بهتر شکل می‌گیرد.

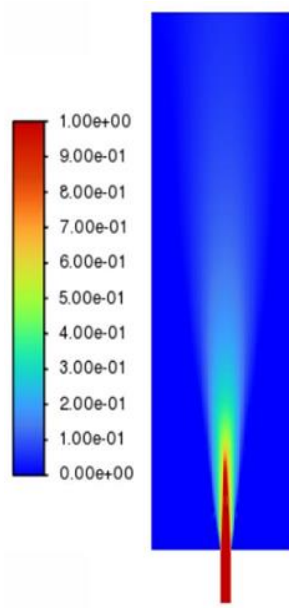
سپس احتراق متان و هوا، مقایسه بین آن‌ها و در ادامه احتراق متان، هیدروژن و هوا انجام شده است. در فاز بعدی شبیه‌سازی به منظور بررسی تأثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد احتراق، با در نظر گرفتن سوخت به نِسبورت ترکیبی از متان، هیدروژن با درصد‌های مختلف برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است. در این وضعیت پارامترهای مؤثر از قبیل مقدار و توزیع کربن‌دی‌اکسید، آب، دما، NO_x و میزان انتقال حرارت در محفظه ارائه شده است.

مقایسه احتراق هیدروژن - هوا با احتراق متان - هوا

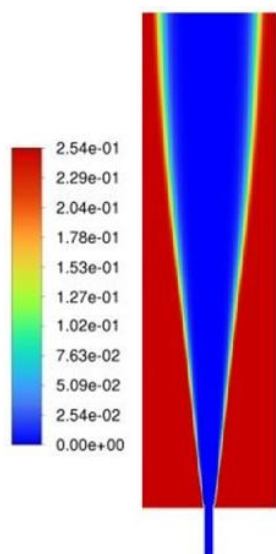
در شکل‌های (۳) و (۴) کانتورهای کسر جرمی هیدروژن داخل محفظه برای احتراق هیدروژن - هوا و متان - هوا نمایش داده شده است. در بخش ورودی سوخت، برای احتراق هیدروژن - هوا نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۱، اکسیژن و آب صفر است. در این وضعیت؛ در بخش ورودی اکسید کننده نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی اکسیژن برابر ۰/۲۳، نیتروژن برابر ۰/۷۷، هیدروژن و آب برابر صفر است. در خروجی فرض شده که به هوا تخلیه می‌شود و گونه کسر جرمی اکسیژن ۰/۲۳ است. مطابق شکل (۳)، در ورودی محفظه احتراق کسر جرمی هیدروژن یک است و هر قدر داخل محفظه پیشروی کند مقدار آن کم شده و در خروجی هیدروژن کامل مصرف شده و احتراق کامل شکل گرفته است. مطابق شکل (۴)، در احتراق متان - هوا با توجه به



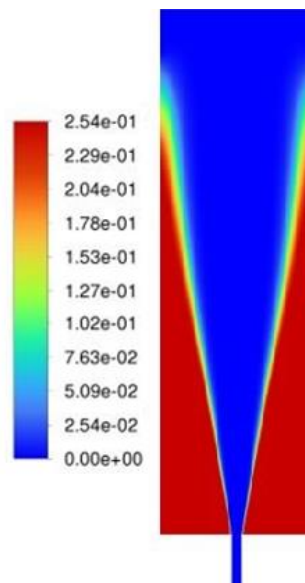
شکل ۴ کسر جرمی متان در احتراق متان - هوا



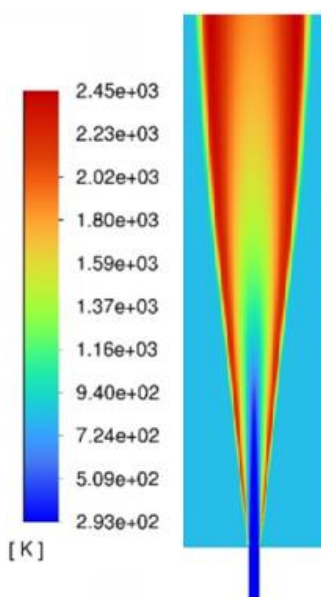
شکل ۳ کسر جرمی هیدروژن در احتراق هیدروژن - هوا



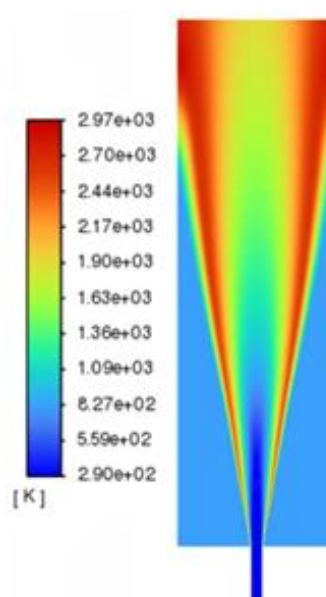
شکل ۶ کسر جرمی اکسیژن در احتراق متان - هوا



شکل ۵ کسر جرمی اکسیژن در احتراق هیدروژن - هوا



شکل ۸ تغییرات دما برای احتراق متان - هوا



شکل ۷ تغییرات دما برای احتراق هیدروژن - هوا

می‌شوند. به این ترتیب شش گونه شرکت کننده در واکنش شامل متان، هیدروژن، کربن دی‌اکسید، اکسیژن، آب و نیتروژن هستند. در بخش ورودی سوخت، نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر ۰/۱، متان برابر ۰/۹، اکسیژن، آب و نیتروژن برابر صفر است.

در فاز بعدی شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن سوخت به صورت ترکیبی از متان و هیدروژن و واکنش‌های تعریف شده در قسمت قبل، با درصدهای مختلف برای هیدروژن در ورودی، واکنش

مدل‌سازی احتراق متان - هیدروژن - هوا و تأثیر افزودن هیدروژن به متان

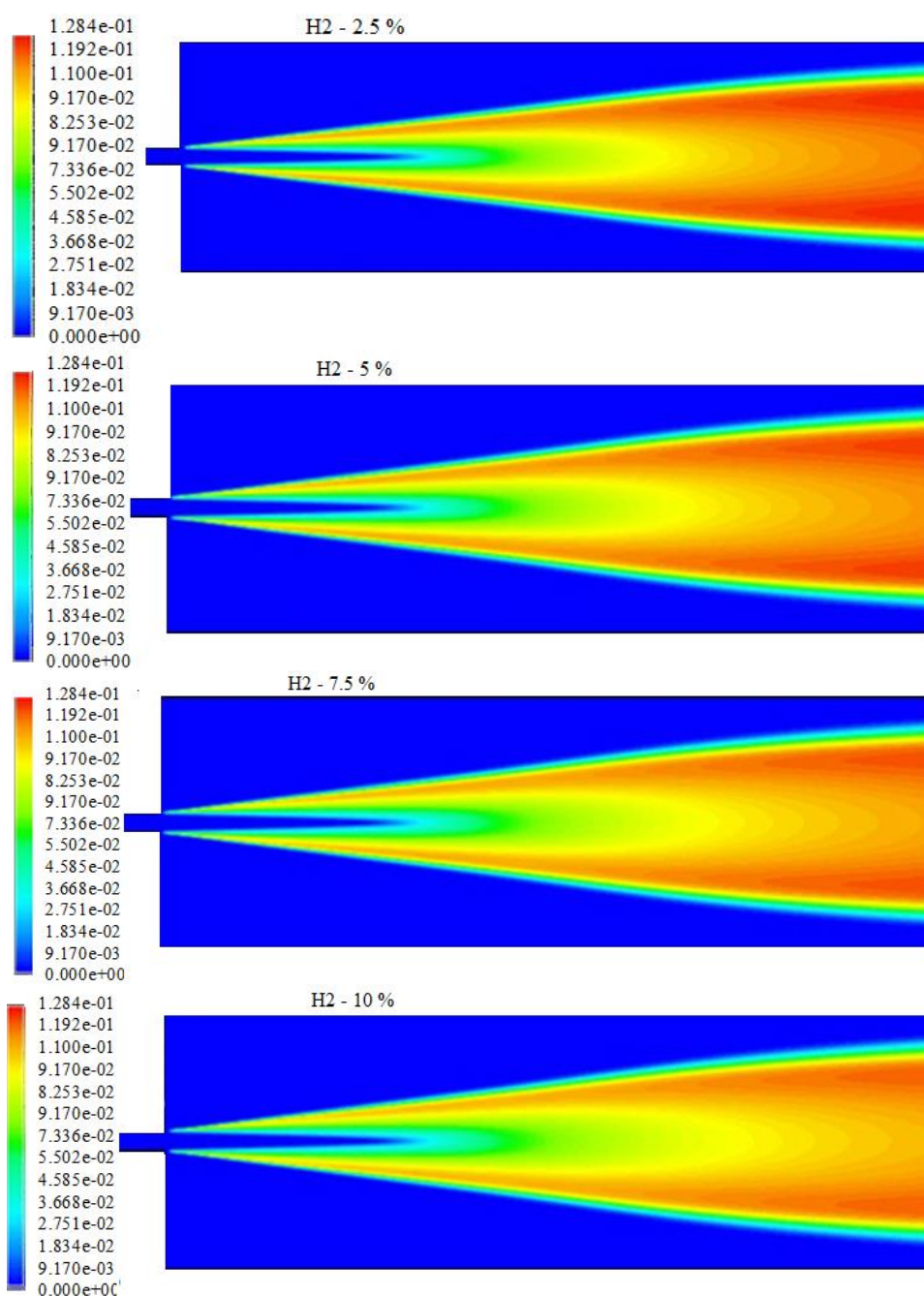
به منظور مقایسه احتراق متان - هیدروژن و متان - هوا، به احتراق متان با هوا پرداخته می‌شود. در این بخش متان، اکسیژن، دی-اکسیدکربن، آب و نیتروژن پنج گونه شرکت کننده در واکنش هستند.

در این حالت چون با ترکیبی از دو واکنش مواجه هستیم، به گونه‌های شرکت کننده در واکنش، متان و دی‌اکسیدکربن اضافه

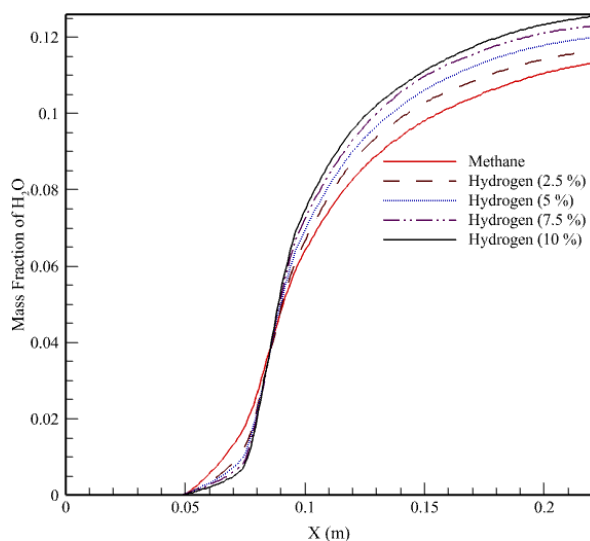
شده است. در نواحی با طیف رنگی قرمز مقدار کمیت بیشتر است و با افزایش درصد هیدروژن ورودی مقدار کربن دی اکسید کمتر شده است. همچنین نشان می دهد که افزایش هیدروژن علاوه بر پایدار کردن شعله موجب کاهش روند پیشروی فرایند احتراق در مراحل ابتدایی و میانی خواهد شد. با توجه به اثر اختلالی افزودن هیدروژن بر روند ابتدایی احتراق، موجب کاهش کسر مولی مونواکسید کربن و کربن دی اکسید در مراحل بعدی می شود.

احتراق مدل سازی شده است. هدف اصلی بررسی تأثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد سوخت است؛ که نمونه های مورد بررسی به ترتیب متان خالص، ۲/۵ درصد هیدروژن و ۹۷/۵ درصد متان، ۵ درصد هیدروژن و ۹۵ درصد متان، ۷/۵ درصد هیدروژن و ۹۲/۵ درصد متان و در پایان ۱۰ درصد هیدروژن و ۹۰ درصد متان می باشد.

در شکل (۹) تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید برای درصدهای مختلف هیدروژن در ورودی سوخت نمایش داده

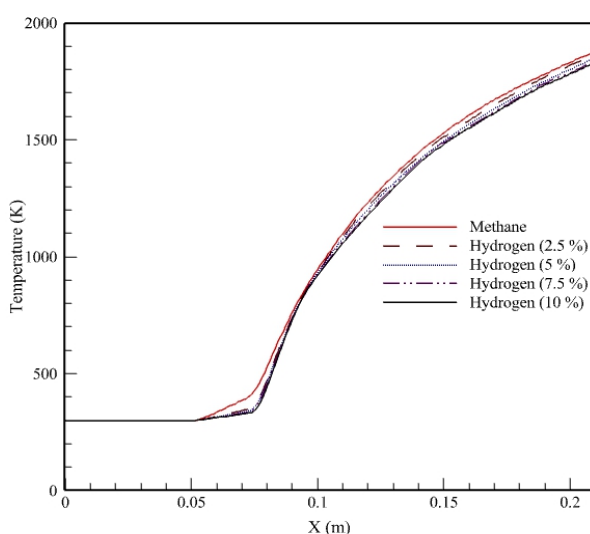


شکل ۹ تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید برای درصدهای مختلف هیدروژن



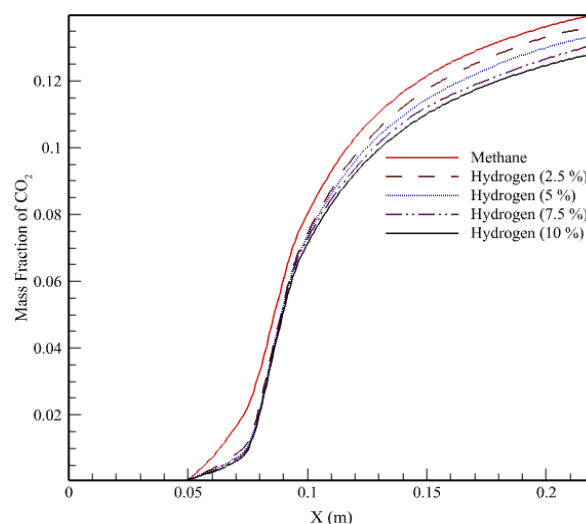
شکل ۱۱ تغییرات کسر جرمی آب برای درصد‌های مختلف هیدروژن

تغییرات دما در شکل (۱۲) برای درصد‌های مختلف هیدروژن، در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار دما در محفظه افزایش داشته است. با افزایش درصد هیدروژن از حالت متان خالص تا حالتی که میزان هیدروژن ۷/۵ درصد است، تغییرات دما خیلی محسوس نیست اما با افزایش مقدار هیدروژن ورودی تا ده درصد نسبت به حالت‌های قبلی تغییرات دما محسوس‌تر بوده و مقدار دمای شعله افزایش یافته است.



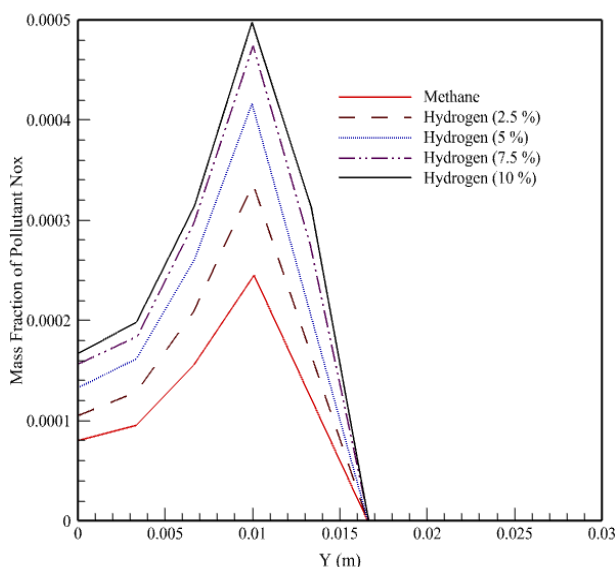
شکل ۱۲ تغییرات دما در طول خط محوری برای درصد‌های مختلف هیدروژن

در شکل (۱۰) نمودار مقادیر مربوط به کسر جرمی کربن‌دی‌اکسید برای درصد‌های مختلف هیدروژن در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار کربن‌دی‌اکسید تولید شده کاهش یافته است. در واقع افزایش درصد هیدروژن باعث پایین آمدن نرخ کلی کربن شده و در نتیجه میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید کاهش یافته است. در ناحیه ورودی نازل تغییرات نداشته و از ۰/۱ متر به بعد مقادیر اختلاف بیشتری با هم پیدا می‌کنند. هر چه مقدار درصد هیدروژن در ورودی زیادتر شده تغییرات کاهش کربن‌دی‌اکسید هم کمتر شده است.

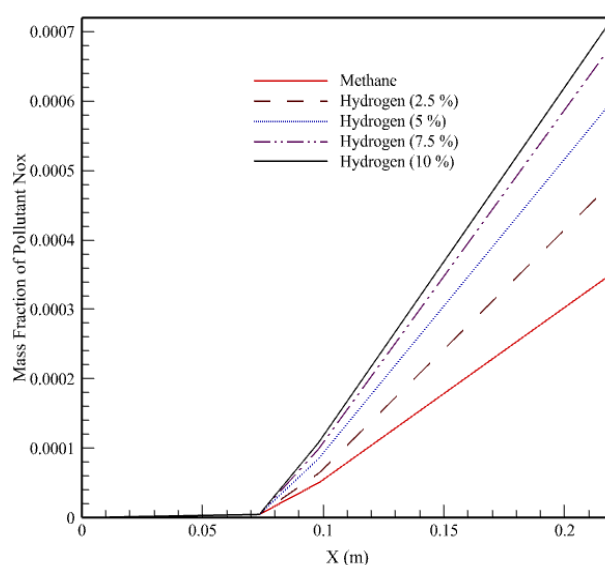


شکل ۱۰ تغییرات کسر جرمی کربن‌دی‌اکسید در طول خط محوری برای درصد‌های مختلف هیدروژن

نمودار مقادیر مربوط به تغییرات کسر جرمی آب برای درصد‌های مختلف هیدروژن در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه ترسیم شده است. مطابق شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار آب تولید شده افزایش یافته است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود از ابتدا تا ۰/۰۵ یعنی ورودی محفظه احتراق میزان تغییرات صفر است و از ۰/۰۵ تا ۰/۱ تغییرات کمتر است ولی از ۰/۱ به بعد مقادیر اختلاف بیشتری با هم پیدا می‌کنند و با افزایش مقدار درصد هیدروژن در ورودی تغییرات افزایش آب تولید شده تقریباً روند ثابتی دارد.



شکل ۱۴ تغییرات کسر جرمی در طول خط شعاعی برای درصدهای مختلف هیدروژن



شکل ۱۳ تغییرات کسر جرمی NOx در طول خط محوری برای درصدهای مختلف هیدروژن

معین گاز طبیعی و هیدروژن برای یافتن نسبت بهینه هیدروژن به گاز طبیعی و بررسی ویژگی‌های احتراق مانند ارزش حرارتی، دمای احتراق، طول شعله و میزان آلاینده‌گی برای تزریق هیدروژن موجود در صنایع به شبکه گاز شهری می‌باشد. به این منظور، معادلات جرم، مومنتوم، انرژی و ذرات در محفظه احتراق به کمک نرم‌افزار فلوینت و با در نظر گرفتن سوخت ترکیبی از متان و درصدهای مختلف هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

۱. با افزودن هیدروژن میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید به دلیل کاهش نرخ کلی کربن کاهش یافته است.
۲. با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار آب تولید شده افزایش یافته است.
۳. با افزودن هیدروژن، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است.
۴. افزودن هیدروژن بر ساختار شعله نیز تأثیرگذار است و باعث کشیدگی شعله شده است.
۵. در حالت ۲/۵ درصد هیدروژن در ورودی، میزان گرمای واکنش نسبت به متان خالص کاهش پیدا کرده است؛ اما به تدریج و با افزایش درصد هیدروژن، گرمای واکنش افزایش یافته است.

مقادیر مربوط به کسر جرمی NOx در شکل (۱۳) برای درصدهای مختلف هیدروژن، در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است. مطابق نمودار از زمانی که شعله شکل گرفته و احتراق انجام شده است NOx تولید شده است و هر قدر میزان هیدروژن ورودی افزایش یافته است تغییرات افزایش NOx تولید شده، کمتر شده است.

نمودار مقادیر مربوط به کسر جرمی NOx در شکل (۱۴) برای درصدهای مختلف هیدروژن، در طول خط شعاعی تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار NOx تولید شده در محفظه افزایش داشته است. افزایش انتشار NOx به این علت است که با افزایش هیدروژن دما زیاد شده و اصلی‌ترین عامل در تشکیل NOx دما است، تمامی عواملی که سبب کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش دمای محفظه احتراق می‌شود، عواملی مؤثر در کاهش انتشار NOx هستند.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی احتراق مخلوط با نسبت‌های

تقدیر و تشکر

واژه نامه

پیشنهادی نویسنده	واژه لاتین	پیشنهادی ویراستار
تزریق هیدروژن	injection hydrogen	
گاز طبیعی	natural gas	
محفظه احتراق	combustion chamber	سوختارگاه، سوختگاه احتراق
کسر جرمی	mass fraction	
طول شعله	flame length	
پایداری شعله	flame sustainability	
پارامترهای موثر	effective parameters	
میزان آلودگی	pollution level	

مراجع

- [1] R. Mahadevan and J. Asafu-Adjaye, "Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries," *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2481-2490, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.019>
- [2] O. Jahanian and S. Jazayeri, "A Comprehensive study on natural gas HCCI engine response to different initial conditions via a thermo-kinetic engine model," *Oil & Gas Science and Technology*, 2009. <https://doi.org/10.2516/OGST%2F2011133>
- [3] M. Poor Ebrahimi and N Shayegan, "Study of the role of adding hydrogen to natural gas on the performance parameters," Internal combustion engines, 7th Student Conference on Mechanical Engineering, 2013. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/236596>
- [4] A. Shahnazari, "Prioritizing energy recovery technologies from municipal solid waste (case study of Mashhad city)," *Environmental Research and Technology*, vol. 5, no. 7. 2019.
- [5] X. Zhu et al., "Effect of CO₂/CH₄ ratio on biogas reforming with added O₂ through an unique spark-shade plasma," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13902-13908, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.040>
- [6] A. C. C. Chang and K.-Y. Lee, "Biogas reforming by the honeycomb reactor for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 7, pp. 4358-4365, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.018>

- [7] K. Collier et al., "Untreated Exhaust Emissions of a Hydrogen-Enriched CNG Production Engine Conversion," *SAE Technical Paper*, 1996. <https://doi.org/10.4271/960858>
- [8] F. Ma et al., "Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 816-822, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.047>
- [9] K. Zhao et al., "Effects of hydrogen addition on methane combustion," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 1142-1147, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.005>
- [10] N. Donohoe et al., "Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures," *Combustion and Flame*, vol. 161, pp. 1432-1443, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.005>
- [11] Z. Dulger, "Numerical modeling of heat release and flame propagation for methane-fueled internal combustion engines with hydrogen addition," Doctoral dissertation, University of Miami, 1991.
- [12] R. Kamali and A. R. Binesh, "A CFD study of dimensional scaling effect on the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scale chambers with same shape aspect," *Proceedings of the 6th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering*, 2007, pp. 231-236.
- [13] H. Burbano et al., "Effects of hydrogen addition to methane on the flame structure and CO emissions in atmospheric burners," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 13, pp. 3410-3415, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.04.020>
- [14] S. El-Ghafour et al., "Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 2556-2565, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.049>
- [15] J. Wang et al., "Effect of hydrogen addition on early flame growth of lean burn natural gas-air mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 13, pp. 7246-7252, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.004>
- [16] K. V. Shivaprasad et al., "Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 141-148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.019>
- [17] M. K. Büyükakın and S. Öztuna, "Numerical investigation on hydrogenenriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and nonpremixed burner system from flame structure and pollutants aspect," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 35246-35256, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.117>
- [18] V. S. Nuotio-Antar, "Equations governing fluid flow and heat transfer," in *Fundamentals of Low Gravity Fluid Dynamics and Heat Transfer*, CRC Press, 2019, pp. 19-30.
- [19] J. R. Howell and R. Siegel, "Thermal radiation heat transfer. Volume 3 Radiation transfer with absorbing," in *Emitting, and Scattering Media*, 1971.
- [20] A. Dolai et al., "Ravikrishna, Investigation of syngas combustion in a novel ultra-low emission 20-kW two-stage combustor," *Fuel*, vol. 340, p. 127497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127497>

- [21] M.-m. Huang et al., "Effect of fuel injection velocity on Mild combustion of syngas in axially-staged combustor," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, no. 1, pp. 485-492, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.033>