

شبیه‌سازی عددی افزایش هیدروژن افزوده‌شده به گاز طبیعی بر

مشخصه‌های احتراق در مشعل‌های صنعتی

ابراهیم افشاری، مهدیه هراتیان اول، نبی جهانتیغ

دانشیار، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

کارشناس مکانیک، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

دانشیار، دانشگاه زابل، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده

تزریق هیدروژن سبز به گاز طبیعی به‌عنوان یک روش ذخیره‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شود و یک گزینه مقرون‌به‌صرفه برای تأمین گرما و برق برای بخش‌های مسکونی و تجاری با کاهش محتوای کربن شبکه‌های گاز طبیعی است. با تزریق کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن به گاز طبیعی، نیاز به تغییر زیرساخت‌های مربوط به احتراق نیز نمی‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی تزریق هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری با شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن و یافتن نسبت مناسب گاز طبیعی/هیدروژن با بررسی ویژگی‌های احتراق می‌باشد. 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 می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد افزودن هیدروژن باعث افزایش دما و کشیدگی شعله، کاهش انتشار کربن دی اکسید، افزایش آب و مقدار NOx تولیدشده می‌شود. 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 می‌یابد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، سوخت ترکیبی، هیدروژن، NOx تولیدی، محفظه احتراق

Numerical Simulation of the Hydrogen Increment to Natural Gas on Combustion Characteristics in Industrial Burner

Ebrahim Afsharia*, Mahdiye Haratin Aval^a, Nabi Jahantigh^{b*},

^a Associate Professor, University of Isfahan, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

^b Associate Professor, University of Zabol, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering

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.

Keywords: Numerical Simulation, Mixed Fuel, Hydrogen, Produced NO_x, Combustion Chamber

۱- مقدمه

به دلیل رشد اقتصادی کشورها، رشد جمعیت، پایان پذیری سوخت‌های فسیلی، متغیر بودن قیمت سوخت، نیاز به امنیت انرژی و همچنین آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت‌های رایج فسیلی مانند گازوئیل، نفت و زغال سنگ، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و با آلاینده‌گی کمتر بسیار مهم است. از مهم‌ترین این منابع، انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی، بیوگاز و انرژی هیدروژن می‌باشد. در میان کشورهای توسعه یافته صادرکننده انرژی، در دو دوره کوتاه بلند مدت، علیت دو طرفه‌ای 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 [۱]. امروزه با توجه به اهمیت کاهش گازهای گلخانه‌ای، کشورهای در حال توسعه و به خصوص کشورهای توسعه یافته به دنبال جایگزینی سوخت‌هایی با آلاینده‌گی کمتر به جای هیدروکربن‌های رایج هستند. در این مسیر با پیشرفت تجهیزات پالایش، نگهداری و ذخیره‌ی سوخت، هیدروژن توانسته گوی رقابت را از سایر رقبا برآورد. فرآورده واکنش سوختن هیدروژن به دلیل عدم وجود اتم کربن در سمت واکنش دهنده منجر به تولید گاز گلخانه‌ای نمی‌شود و از این جهت یک انتخاب ایده‌آل است. با این حال، ساخت وسایل نقلیه‌ای که صرفاً از هیدروژن استفاده می‌کنند؛ همچنان به عنوان یک گزینه بلند مدت 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 و نظیر این‌ها روبرو می‌باشد 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، مونواکسید کربن، اکسید سولفور، اسیدهای ارگانیک و دی اکسید کربن نمی‌شوند 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 پی‌امد استفاده از هیدروژن است [۲].

جایگزینی کامل گاز طبیعی با هیدروژن نیازمند تغییر زیر ساخت‌هایی 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 در صورت تزریق مقدار مشخصی هیدروژن به شبکه انتقال گاز شهری (کمتر از ۱۰ درصد هیدروژن) بدون نیاز به ایجاد تغییرات در زیر ساخت، امکان پذیراست و مزایای 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، شبکه‌ی انتقال و شبکه‌ی توزیع شود. لذا انجام این کار بدون بررسی دقیق تهدیدها ممکن است خسارت‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کند [۳]. یکی از روش‌هایی که باعث حذف چالش‌های استفاده از هیدروژن می‌شود؛ تزریق آن به شبکه گاز شهری و ایجاد مخلوط هیدروژن و گاز است. هرگونه تغییر در ترکیب سوخت در شبکه مصرف نیازمند بررسی تغییرات به وجود آمده در رفتار مواد در شبکه توزیع و مصرف است.

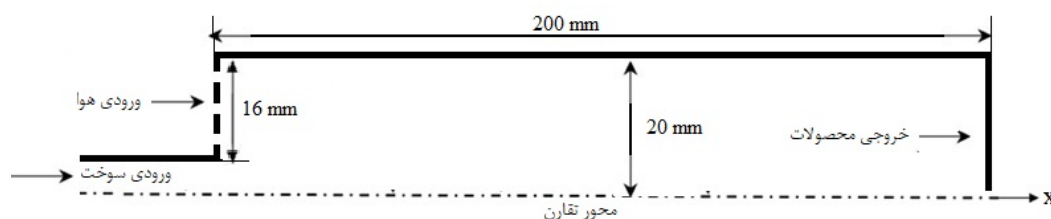
عبدالملک در مطالعه‌ای در مورد روش‌های زباله‌سوزی، احتراق، پیرولیز و گازی‌سازی از زیست‌توده با تاکید روی گازی‌سازی که فرایندی موثر و اقتصادی و با اثرات تخریبی کمتر زیست محیطی برای تولید هیدروژن است پرداخت [۴]. ژو و همکاران به بررسی عوامل موثر بر تولید هیدروژن از زیست‌گاز پرداختند. نتایج حاکی از کاهش نسبت 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 [۵]. چانگ الکس و لی به بررسی روش‌های ریفرمینگ زیست‌گاز جهت تولید هیدروژن در یک راکتور نوع لانه زنبوری پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دما، درصد تبدیل متان و میزان تولید هیدروژن افزایش می‌یابد [۶]. 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 شده و محدوده‌ی رقیق‌سوزی را افزایش می‌دهد [۷]. 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 شده و اکسید نیتروژن بیشتر می‌شود [۸]. ژائو و همکاران به بررسی تاثیر 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 [۹]. دونهو 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 تاخیر در اشتعال کاهش می‌یابد [۱۰]. 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؛ بازه حرارتی و اکسید نیتروژن را افزایش می‌دهد؛ اما هیدروکربن‌های نسوخته، کربن مونو اکسید کاهش می‌یابد [۱۱]. کمالی و همکاران در یک شبیه‌سازی عددی تاثیر 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 [۱۲]. بوربانو و همکاران به بررسی اثرات اضافه نمودن هیدروژن به متان بر ساختار شعله و انتشار گاز کربن منوکسید در مشعل‌های اتمسفریک پرداختند. در این مطالعه تاثیرات افزوده 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 [۱۳]. غفور و همکاران به بررسی مشخصات احتراقی شعله‌ی پخش‌ی با سوخت آشفته‌ی هیبرید گاز طبیعی و هیدروژن پرداختند. افزودن هیدروژن تاثیر بسیار زیادی بر پایداری شعله و کاهش طول شعله، به‌خصوص در غلظت‌های بالای هیدروژن دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزودن هیدروژن به گاز طبیعی یک راه حل بی‌اثر برای

کاهش NOx و کربن منوکسید در گستره‌ی این مطالعه می‌باشد؛ در حالی که این استراتژی یک راه حل قابل توجه برای کاهش غلظت مولی کربن دی‌اکسید در حدود ۳۰٪ است [۱۴]. وانگ و همکاران به بررسی اثر افزودن هیدروژن در مخلوط گاز طبیعی - هوا پرداختند. نتایج نشان‌دهنده بهبود مشخصه‌های احتراق در دو رژیم آرام و آشفته است [۱۵]. شیواپراساد و همکاران تأثیر افزودن هیدروژن بر عملکرد احتراق و ویژگی‌های انتشار گازهای موتور بنزینی با سرعت بالا به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن باعث بهبود بازده موتور می‌شود [۱۶]. بویوایکین و ازتان تأثیر غنی‌سازی متان با هیدروژن بر ساختار شعله و آلاینده‌های حاصل از احتراق در دیگ بخار فشار داخلی با سیستم مشعل بدون پیش مخلوط را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن مانع انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق در دیگ بخار شده و همچنین به دلیل افزایش میزان انتشار NOx دمای شعله احتراق را افزایش می‌دهد [۱۷].

یافتن نسبت مناسب هیدروژن به گاز طبیعی یکی از چالش‌هایی پیش‌رو 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 صنایع به شبکه گاز شهری می‌باشد.

۲- 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 دیواره ها ۵/۰ میلی متر می‌باشد. جنس دیواره ها از فولاد ضد زنگ L316 می‌باشد. جریان در داخل محفظه پایا و تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است. واکنش گرما و محصولات گاز ایده آل در 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 ایده آل محاسبه می‌شوند. با توجه به عدد رینولدز جریان؛ جریان آشفته است و برای مدل‌سازی این جریان از مدل آشفتگی k-ε استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف در مدل‌سازی جریان مغشوش تفاوت زیادی ندارد و فقط روند همگرایی مسئله متفاوت است.



شکل ۱ - هندسه و شرایط مرزی محفظه احتراق

معادلات بقا شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و بقای اجزا است [۱۸].

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

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

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

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

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 اجزاء، C غلظت ذره و D_i^{eff} انتشار جرم موثر گونه i در مخلوط گاز است. تحلیل محفظه احتراق شامل جریان سیال به صورت دو بعدی، 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 می‌باشد، استفاده می‌شود. [۱۹، ۲۰].

به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، هندسه به صورت متقارن و دو بعدی 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 [۲۱] است. شرط مرزی بخش ورودی سوخت، دبی مشخص با مقدار $1/11$ گرم بر ثانیه است. دما 293 کلوین و نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی هیدروژن برابر $0/38$ ، کربن مونوکسید برابر $0/48$ ، نیتروژن برابر $0/14$ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در بخش ورودی اکسید کننده نیز از نوع دبی ورودی مشخص به میزان $15/74$ گرم بر ثانیه و دما 841 کلوین است. همچنین نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی اکسیژن برابر $0/169$ ، آب برابر $0/28$ ، کربن دی اکسید برابر $0/36$ و نیتروژن برابر $0/767$ 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 که جریان محصولات احتراق از قسمت خروجی خارج می‌شود.

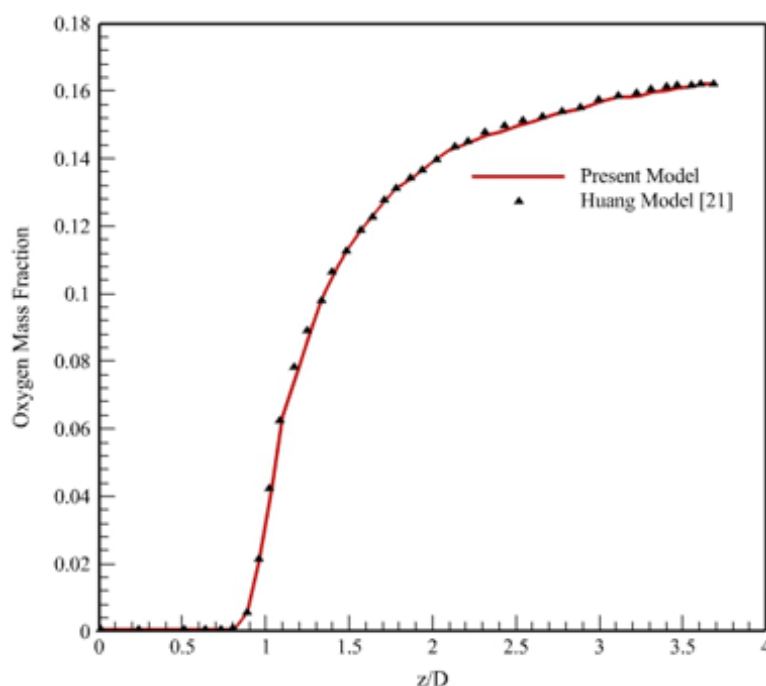
برای شبیه‌سازی عددی از روش گسسته‌سازی حجم محدود استفاده شده است. شبکه‌ی تولیدی شامل المان چهارضلعی و سازمان یافته است و نتایج دقت بالایی دارند. استقلال نتایج از شبکه نیز بررسی شده است و با تعداد 1384000 سلول، نتایج مستقل از تعداد شبکه شده‌اند.

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 نرم افزار فلوینت انجام شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر 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، $2/5$ ، 5 ، $7/5$ و 10 برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل‌سازی شده است.

۴- نتایج

۴-۱- صحت سنجی

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 [۲۱]، مطابق شکل ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل حاضر و نتایج مرجع ۲۱ وجود دارد.



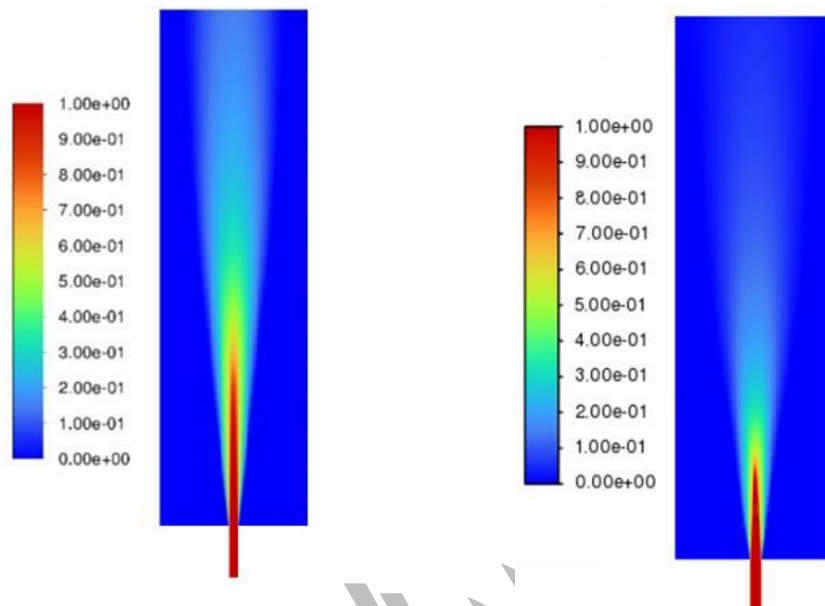
شکل ۲- مقایسه تغییرات کسر جرمی اکسیژن بر حسب طول بی بعد روی محور تقارن در مرجع [21] و مدل حاضر

در مرجع [۲۱] 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، شبیه سازی و اعتبارسنجی برای حالتی که قطر و سرعت ورودی سوخت به ترتیب برابر ۴ میلی متر و ۱۱۷ متر بر ثانیه می باشد، انجام شده است. در این مطالعه مدل سازی احتراق برای ۴ حالت مختلف انجام شده است. ابتدا احتراق هیدروژن و هوا، سپس احتراق متان و هوا، مقایسه بین آنها و در ادامه احتراق متان، هیدروژن و هوا انجام شده است. در فاز بعدی شبیه سازی به منظور بررسی تاثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد احتراق، با در نظر گرفتن سوخت به صورت ترکیبی از متان، هیدروژن با درصدهای مختلف برای هیدروژن در ورودی، واکنش احتراق مدل سازی شده است. در این وضعیت پارامترهای موثر از قبیل مقدار و توزیع کربن دی اکسید، آب، دما، NOx و میزان انتقال حرارت در محفظه ارایه شده است.

۲-۴- مقایسه احتراق هیدروژن - هوا با احتراق متان - هوا

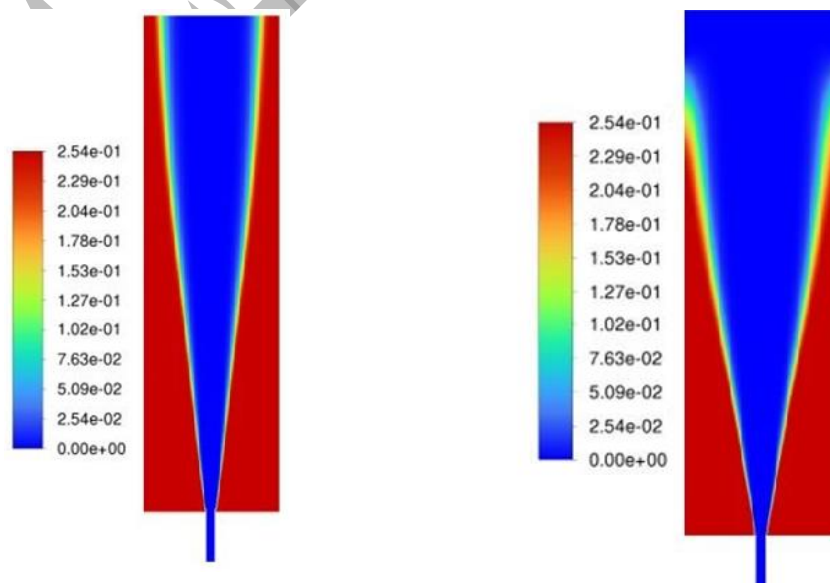
در شکل های ۳ و ۴ کانتورهای کسر جرمی هیدروژن داخل محفظه برای احتراق هیدروژن - هوا و متان - هوا نمایش داده شده است. در بخش ورودی سوخت، برای احتراق هیدروژن - هوا نسبت جرمی گونه های شیمیایی هیدروژن برابر ۱، اکسیژن و آب صفر می باشد. در این وضعیت، در بخش ورودی اکسیدکننده نسبت جرمی گونه های شیمیایی اکسیژن برابر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

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



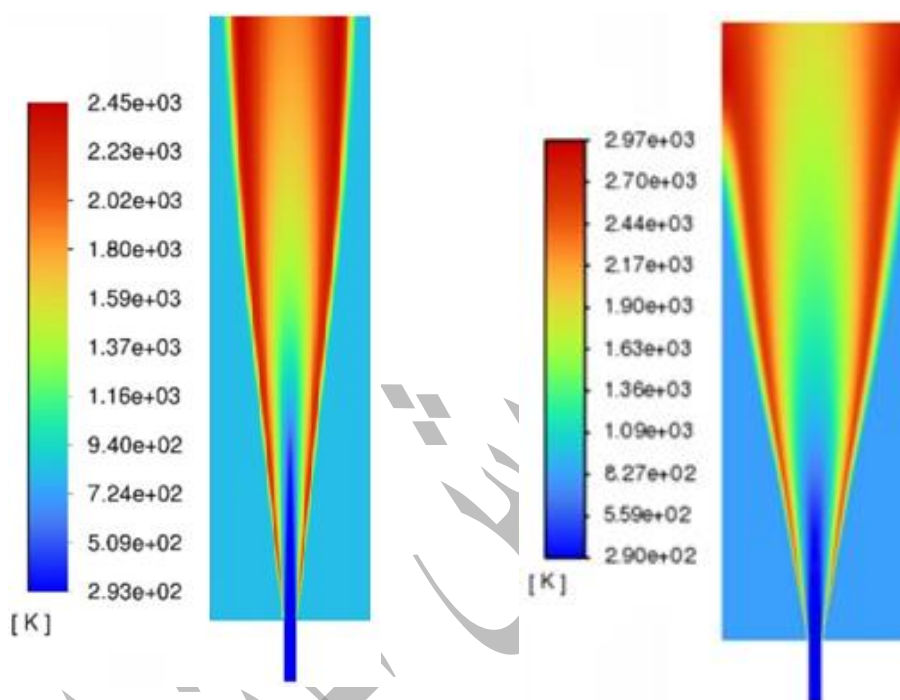
شکل ۳- کسر جرمی هیدروژن در احتراق هیدروژن - هوا شکل ۴- کسر جرمی متان در احتراق متان - هوا

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 می‌باشد.



شکل ۵- کسر جرمی اکسیژن در احتراق هیدروژن - هوا شکل ۶- کسر جرمی اکسیژن در احتراق متان - هوا

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 و در خروجی به ۲۹۷۰ کلوین می‌باشد. همان‌گونه 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 نشده متان و وجود آن در خروجی است. هر چه مقدار دما بالاتر باشد دمای شعله بالاتر است و احتراق بهتر شکل می‌گیرد.



شکل ۸- تغییرات دما برای احتراق متان - هوا

شکل ۷- تغییرات دما برای احتراق هیدروژن - هوا

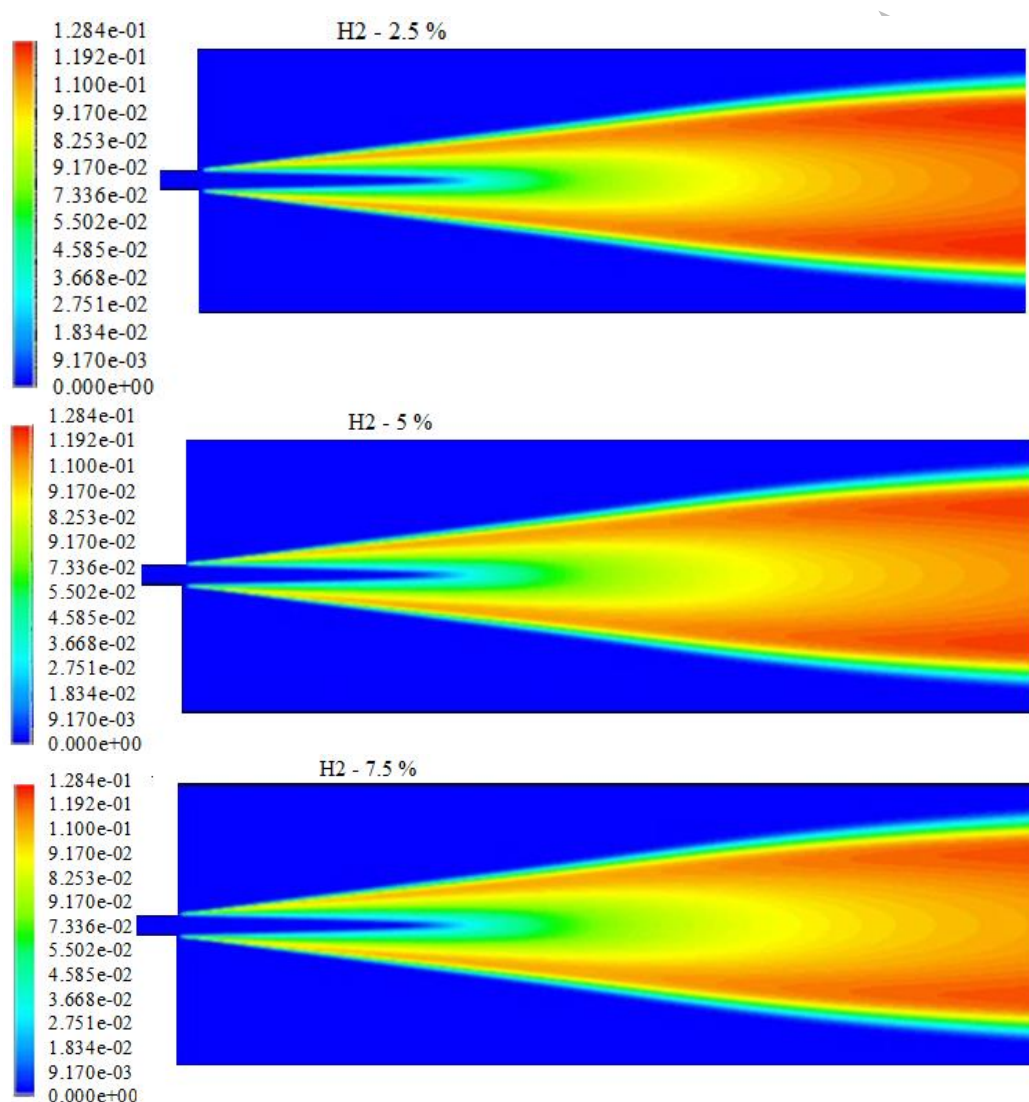
۴-۳- مدل‌سازی احتراق متان - هیدروژن - هوا و تاثیر افزودن هیدروژن به متان

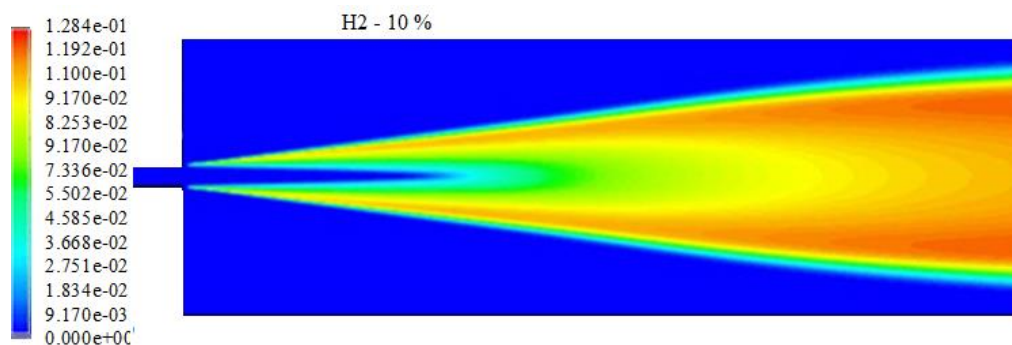
به منظور مقایسه احتراق متان - هیدروژن و متان - هوا، به احتراق متان با هوا پرداخته می‌شود. در این بخش پنج گونه شرکت کننده در واکنش شامل متان، اکسیژن، دی‌اکسید کربن، آب و نیتروژن می‌باشد. در این حالت چون ترکیبی از دو واکنش است؛ گونه‌های شرکت کننده در واکنش متان و دی‌اکسید کربن اضافه می‌شود. شش گونه شرکت کننده در واکنش شامل متان، هیدروژن، دی‌اکسید کربن، اکسیژن، آب و نیتروژن است. 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 احتراق مدل‌سازی شده است. هدف اصلی بررسی تاثیر اضافه کردن هیدروژن بر عملکرد سوخت است؛ که نمونه‌های 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 می‌باشد.

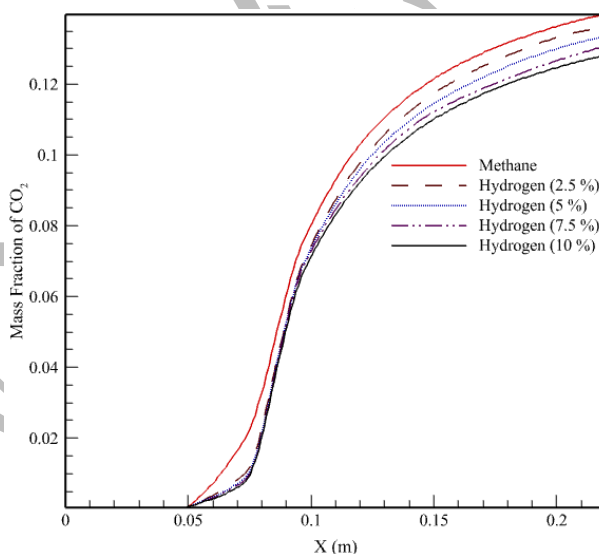
در شکل ۹ تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید برای درصدهای مختلف هیدروژن در ورودی سوخت نمایش داده شده است. در نواحی با طیف رنگی قرمز مقدار کمیت بیش‌تر می‌باشد و با افزایش درصد هیدروژن ورودی مقدار دی اکسید کربن کمتر شده است. هم‌چنین نشان می‌دهد افزایش هیدروژن علاوه بر پایدار نمودن شعله موجب کاهش روند پیشروی فرایند احتراق در مراحل ابتدایی و میانی خواهد شد. با توجه به اثر اختلالی افزودن هیدروژن بر روند ابتدایی احتراق، موجب کاهش کسر مولی مونواکسیدکربن و کربن دی اکسید در مراحل بعدی می‌شود.





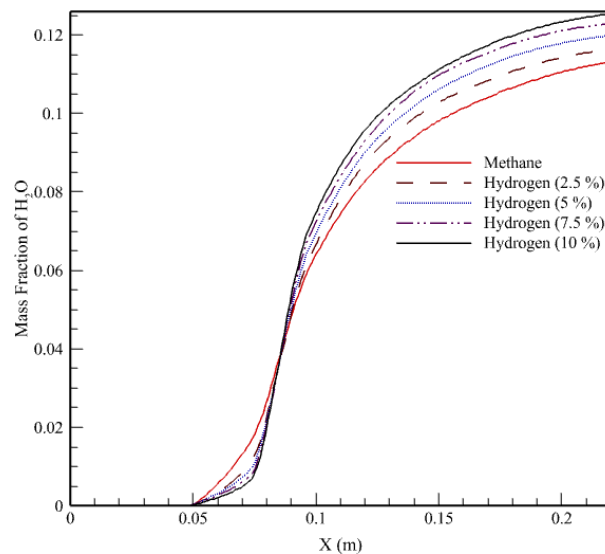
شکل ۹- تغییرات کسر جرمی دی اکسید کربن برای درصدهای مختلف هیدروژن

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



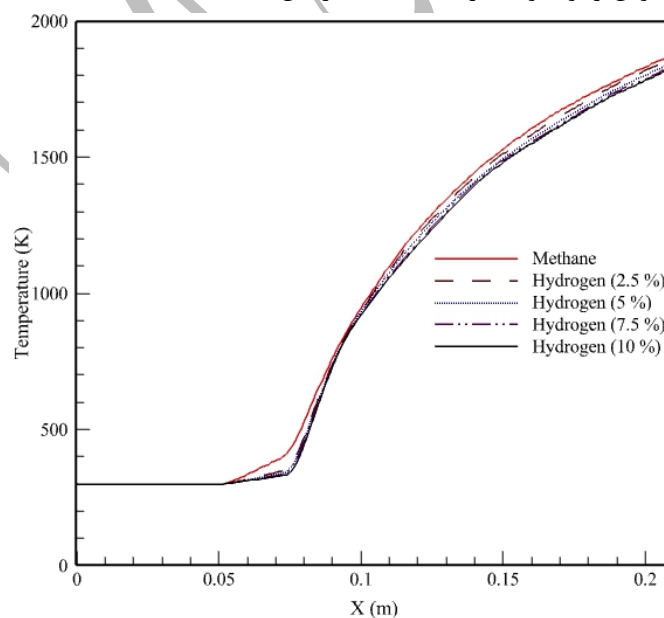
شکل ۱۰- تغییرات کسر جرمی کربن دی اکسید در طول خط محوری برای درصدهای مختلف هیدروژن

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 می شود که با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار آب تولید شده افزایش یافته است. همان طور که در نمودار دیده می شود از ابتدا تا ۰/۰۵ یعنی ورودی محفظه احتراق میزان تغییرات صفر است و از ۰/۰۵ تا ۰/۱ تغییرات کمتر می باشد ولی از ۰/۱ به بعد مقادیر اختلاف بیشتری باهم پیدا می کند و با افزایش مقدار درصد هیدروژن در ورودی تغییرات افزایش آب تولید شده تقریباً روند ثابتی دارد.



شکل ۱۱- تغییرات کسر جرمی آب برای درصدهای مختلف هیدروژن

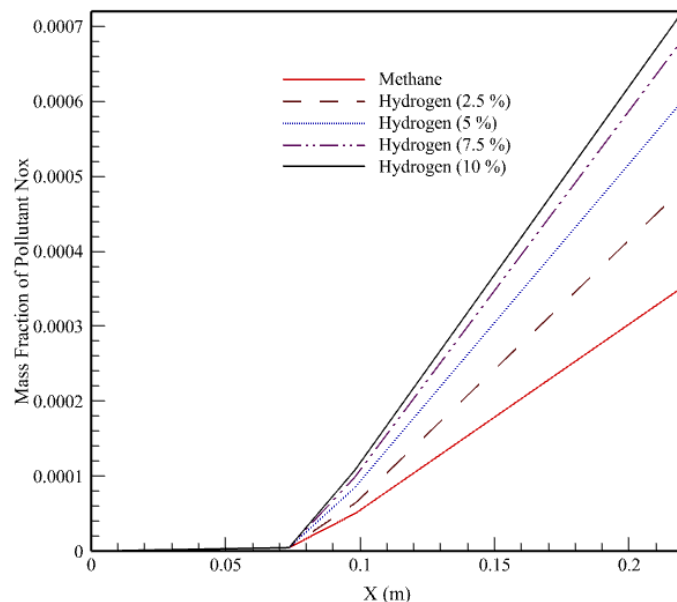
تغییرات دما در شکل ۱۲ برای درصدهای مختلف هیدروژن، در طول خط محوری تعریف شده داخل محفظه، ترسیم شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش سهم سوخت هیدروژن در ورودی، مقدار دما در محفظه افزایش داشته است. با افزایش درصد هیدروژن از حالت متان خالص تا حالتی که میزان هیدروژن ۷/۵ درصد است، تغییرات دما خیلی محسوس 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.



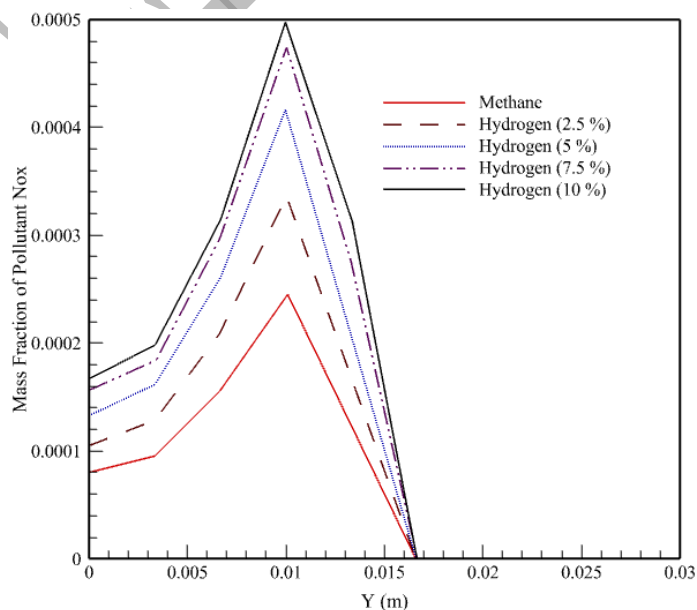
شکل ۱۲- تغییرات دما در طول خط محوری برای درصدهای مختلف هیدروژن

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 شده 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 چقدر میزان هیدروژن ورودی افزایش یافته است تغییرات افزایش NOx تولید شده، کمتر شده است.



شکل ۱۳- تغییرات کسر جرمی NOx در طول خط محوری برای درصدهای مختلف هیدروژن 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 اصلی ترین عامل در تشکیل NOx دما است، تمامی عواملی که سبب کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش دمای محفظه احتراق شده، عواملی موثر در کاهش انتشار NOx هستند.



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

۵- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی احتراق مخلوط با نسبت‌های 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 آلاینده‌ها 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 نرم افزار 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 کربن دی اکسید 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 NO_x تولید شده در محفظه افزایش داشته است.
- ۴- افزودن هیدروژن بر ساختار شعله نیز تاثیرگذار است و باعث کشیدگی شعله شده.
- 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.

۶- 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, p. 2481-2490, 2007.

doi: <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,". 2009.

[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.

Available: <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, In Persian.

Available: [https://www.sid.ir/fa/Journal/Vie\[5wPaper.aspx?ID=543713](https://www.sid.ir/fa/Journal/Vie[5wPaper.aspx?ID=543713).

[5]. X. Zhu, K. Li, J.-L. Liu, X.-S. Li, and A.-M. Zhu, "Effect of CO_2/CH_4 ratio on biogas reforming with added O_2 through an unique spark-shade plasma," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp.13902-13908, 2014.

doi:<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.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.018>.

- [7] K. Collier, R. Hoekstra, N. Mulligan, C. Jones, and D. Hahn, "Untreated Exhaust Emissions of a Hydrogen-Enriched CNG Production Engine Conversion. 1996.
- [8] F. Ma, H. Liu, Y. Wang, Y. Li, J. Wang, and S. Zhao, "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
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.047>.
- [9] K. Zhao, D. Cui, T. Xu, Q. Zhou, S. Hui, and H. Hu, "Effects of hydrogen addition on methane combustion," *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 1142-1147, 2008.
doi: <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,
doi: [10.1016/j.combustflame.2013.12.005](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," 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," pp. 231-236, 2007.
- [13] H. Burbano, A. Amell, and J. M. García, "Effects of hydrogen addition to methane on the flame structure and CO emissions in atmospheric burners," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 3410-3415, 2008.
- [14] S. El-Ghafour, A. El-dein, and A. Aref, "Combustion characteristics of natural gas-hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp. 2556-2565, 2010.
doi: [10.1016/j.ijhydene.2009.12.049](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.049).
- [15] J. Wang, Z. Huang, C. Tang, and J. Zheng, "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.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.004>.
- [16] K. V. Shivaprasad, S. Raviteja, P. Chitragar, and G. N. Kumar, "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.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.019>.
- [17] M. K. Büyükkakın 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.
doi: <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, pp. 19-30, 2019.

[19] J. R. Howell and R. Siegel, "Thermal radiation heat transfer. Volume 3 Radiation transfer with absorbing," Emitting, and Scattering Media, 1971.

[20] 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>.

[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.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.033>.