

رقیق سازی احتراق متان- هوا با هیدروژن و اثر آن بر سرعت، ضخامت شعله و آلاینده ها

نیما طینتی^{۱*}، مسعود نادفیان بجزستانی^۲، حمید ممهدی هروی^۳

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران

(^۱ نویسنده مخاطب : nimatinati@hotmail.com)

چکیده

هیدروژن یک ماده افزودنی خوب برای احتراق سوخت های هیدروکربنی از جمله متان است. در این مقاله، به بررسی عددی رقیق سازی احتراق آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا با هیدروژن در نسبت های هم ارزی مختلف، با استفاده از کد PREMIX نرم افزار CHEMKIN II و مکانیزم GRI MECH 3.0 در فشار اولیه ۱ atm و دمای اولیه ۲۹۸K پرداخته شده است. پروفیل دمای مخلوط پیش آمیخته متان- هوا- هیدروژن در حالت استوکیومتریکی بررسی شده و نتایج نشان می دهد که افزودن هیدروژن، حد اکثر حدود ۱۰٪ در افزایش دمای آدیباتیک شعله تاثیر دارد. سرعت و ضخامت شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن در نسبت های هم ارزی مختلف، از ۰/۶ تا ۱/۴ مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد حجمی هیدروژن، سرعت شعله آرام، افزایش و ضخامت شعله آرام، کاهش می یابد. همچنین پروفیل کسر مولی آلاینده های مهم شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن در نسبت های هم ارزی ۰/۶، ۱ و ۱/۴ بررسی شده است و نتایج نشان می دهد که افزایش درصد حجمی هیدروژن، موجب کاهش کسر مولی CO می شود؛ این امر در حالت استوکیومتریکی، موجب کاهش کسر مولی NO و در نسبت های هم ارزی ۰/۶ و ۱/۴، موجب افزایش کسر مولی NO می شود و نیز در حالت استوکیومتریکی و نسبت هم ارزی ۰/۶، موجب کاهش کسر مولی NO_۲ می شود ولی در نسبت هم ارزی ۰/۶، افزایش درصد حجمی هیدروژن از ۰ تا ۲۰٪ موجب افزایش و از ۲۰٪ تا ۴۰٪ موجب کاهش کسر مولی NO_۲ می شود. نتایج شبیه سازی، با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین مطابقت خوبی دارد.

واژه های کلیدی: احتراق متان - رقیق سازی- هیدروژن- آلاینده

۱- مقدمه

با توجه به عدم اطمینان در فراهم آوردن همیشگی نفت و گاز طبیعی و همچنین نگرانی های زیست محیطی، علاقه به کاوش منابع جایگزین، در حال رشد است. احتراق سوخت های فسیلی منجر به آلودگی قابل ملاحظه ای شده است و یکی از عوامل اصلی گرم شدن زمین محسوب می شود که دلیل این امر انتشار آلاینده هایی از قبیل NO_x، SO_x، CO و CO₂ است (۱). سوخت هایی مانند گاز کوره زغالی، بیوگازهای حاصل از تجزیه حرارتی چوب، گاز اصلاح شده، گاز مصنوعی و ترکیبی از بیوجرم تبدیل شده به گاز و... که برای سیستم های احتراق موجود با ارزش شناخته نمی شوند؛ از نظر سازگاری با محیط زیست، قابل دوام بودن و سودآوری اقتصادی، ارزشمند هستند (۲). گرچه سوخت های موجود عمدتاً شامل متان، هیدروژن، مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، نیتروژن و مقدار کمی اتان و پروپان است؛ استفاده از این سوخت ها در زیرساخت های انرژی موجود، به اصلاحاتی در این

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۳- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

سیستم ها به منظور سوزاندن سوخت، به صورت موثر و کارآمد، بدون انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش خطرات ناشی از آتش سوزی و انفجار، نیاز دارد (۳). برای دانشمندان و مهندسان، طراحی سیستم های حرارتی که بصورت موثر و کارآمد بر روی طیف وسیعی از شرایط عملیاتی اجرا می شوند به عنوان یک چالش تلقی می شود. به منظور درک تاثیر تنوع ترکیبات سوخت روی عملکرد احتراق و انتشار گازهای گلخانه ای، درک درستی از تغییرات احتراق متان در حضور رقیق کننده هایی نظیر هیدروژن نیاز است.

متان یکی از مهمترین گازهای گلخانه ای می باشد که بالاترین سرعت افزایش از ابتدای سال ۱۷۵۰ میلادی (آغاز دوره صنعتی شدن بشر) را در میان گازهای گلخانه ای به خود اختصاص داده است. علاوه بر این میزان تاثیر متان در فرآیند گرم شدن زمین (GWP) در حدود ۲۵ برابر دی اکسید کربن می باشد. این موارد دلایلی هستند تا بسیاری از دانشمندان متان را به عنوان یکی از مهمترین گازها در فرآیند گرم شدن زمین و حتی بالاتر از دی اکسید کربن قلمداد کنند (۴).

خواص احتراقی متان به عنوان یک سوخت، بطور گسترده توسط گروه های تحقیقاتی گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال می توان به زمان تاخیر خوداشتعالی، سرعت سوختن کم، ساختار شعله و... اشاره کرد (۵). متان یک ساختار چهاروجهی منحصر به فرد با انرژی بزرگ پیوندی C-H دارد که این ساختار موجب نمایش خصوصیات احتراقی منحصر به فرد نظیر دمای احتراق بالا و سرعت انتشار شعله کم در متان است؛ این امر ممکن است منتهی به احتراق ناقص در احتراق های کم سوخت شود؛ یک راه موثر برای حل این مشکل، ترکیب متان با ماده ایست که دارای سرعت سوختن بالا باشد (۶،۷). هیدروژن به دلیل انرژی کم احتراق، واکنش پذیری بالا، ضریب پخش بالا و سرعت سوختن زیاد، یک ماده عالی افزودنی برای احتراق سوخت های هیدروکربنی از جمله متان است. سرعت سوختن هیدروژن ۷ برابر متان است و محققین نشان دادند که افزودن مقدار کمی هیدروژن به متان موجب بهبود احتراق می شود (۸،۹).

ویژگی های احتراق آرام، از اصول اساسی در آنالیز و پیش بینی عملکرد موتورهای احتراقی است (۱۰). تا کنون، مطالعات تجربی و عددی مخلوط های سوختی متان- هیدروژن، در ارتباط با سرعت شعله آرام، اندازه گیری گونه های میانی و شبیه سازی سینتیک شیمیایی صورت گرفته است. Yu و همکارانش (۱۱) سرعت شعله آرام مخلوط متان- هیدروژن را بررسی کردند و نشان دادند که سرعت شعله آرام مخلوط متان- هیدروژن، بصورت خطی با افزایش کسر مولی هیدروژن در سوخت، افزایش می یابد. Halter و همکارانش (۱۲) اثر فشار اولیه و کسر مولی هیدروژن بر سرعت شعله آرام متان- هیدروژن را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که سرعت شعله با افزودن کسر مولی هیدروژن در سوخت، افزایش و با افزایش فشار اولیه احتراق، کاهش می یابد. Göttgens و همکارانش (۱۳) ضخامت شعله را توسط اطلاعات سرعت سوختن و ساز و کار شیمیایی شامل ۸۲ واکنش ابتدایی محاسبه کرد. Andrew و Bradley (۱۴) با استفاده از ترموکوپل های حساس و روش Schlieren Photography (۱۵) ضخامت شعله را اندازه گیری کردند.

گزارش های کمی در مورد اندازه گیری رادیکال های میانی در شعله متان- هیدروژن گزارش شده است. تکنولوژی موجود، تنها می تواند پروفیل کسر مولی رادیکال های میانی محدودی را اندازه گیری کند. علاوه بر این، تا زمانی که ساز و کار شیمیایی متان و هیدروژن به خوبی شناخته نشده بود؛ اثر سینتیک شیمیایی افزودن هیدروژن به واکنش شیمیایی متان به خوبی معلوم نبوده است (۱۶).

هدف از این مقاله، بررسی عددی رقیق سازی احتراق آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا با هیدروژن، در نسبت های هم ارزی مختلف و تاثیر آن بر تولید آلاینده ها، سرعت و ضخامت شعله بوده است.

۲- روش محاسباتی

در این مقاله به بررسی عددی رقیق سازی احتراق آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا با هیدروژن و تاثیر آن بر تولید آلاینده ها، سرعت و ضخامت شعله در نسبت های هم ارزی مختلف، با فشار اولیه ۱ atm و دمای اولیه ۲۹۸K، توسط کد PREMIX (۱۷) نرم افزار CHEMKIN II (۱۸) و با ساز و کار شیمیایی GRI MECH 3.0 (۱۹) پرداخته شده است. کد PREMIX (۱۷) یک روش تکرار نیوتن و انتگرال زمانی برای حل پایای معادلات بقای جرم، گونه و انرژی است. همچنین GRI MECH 3.0 (۱۹) ساز و کار تفصیلی واکنش شیمیایی بهینه، برای احتراق گاز طبیعی است که شامل ۳۲۵ واکنش و ۵۳ گونه شیمیایی است.

درصد حجمی H_2 بصورت مقابل تعریف شده است:

$$\%H_2 = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2} + n_{CH_4}} \quad (1)$$

بنا به تعریف فوق، کسر مولی واکنش دهنده ها در حالت استوکیومتریک محاسبه شده و در جدول زیر آورده شده است:

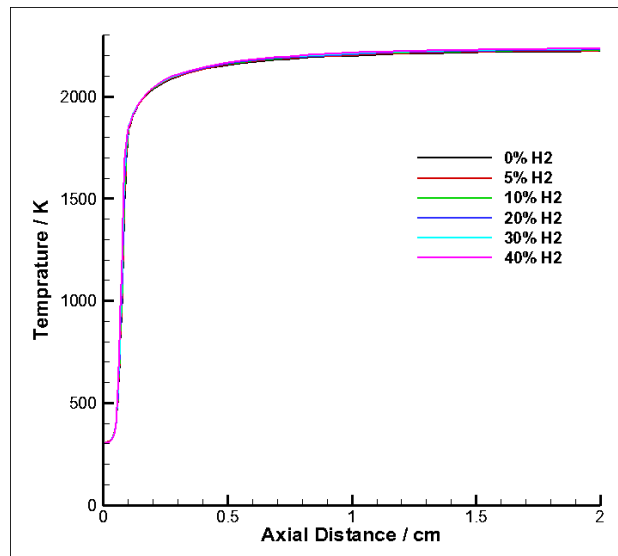
جدول ۱- کسر مولی واکنش دهنده ها در حالت استوکیومتریک

شماره شعله	درصد حجمی هیدروژن	متان	هیدروژن	اکسیژن	نیترژن
۱	۰	۰/۰۹۵	۰	۰/۱۹	۰/۷۱۵
۲	۵	۰/۰۹۳۵	۰/۰۰۴۹	۰/۱۸۹۴	۰/۷۱۲۲
۳	۱۰	۰/۰۹۱۸	۰/۰۱۰۲	۰/۱۸۸۷	۰/۷۰۹۳
۴	۲۰	۰/۰۸۸	۰/۰۲۲	۰/۱۸۷	۰/۷۰۳
۵	۳۰	۰/۰۸۳۶	۰/۰۳۵۸	۰/۱۸۵	۰/۶۹۵۶
۶	۴۰	۰/۰۷۸	۰/۰۵۲	۰/۱۸۳	۰/۶۸۷

۳- نتایج و بحث

۳-۱ پروفیل دمای مخلوط

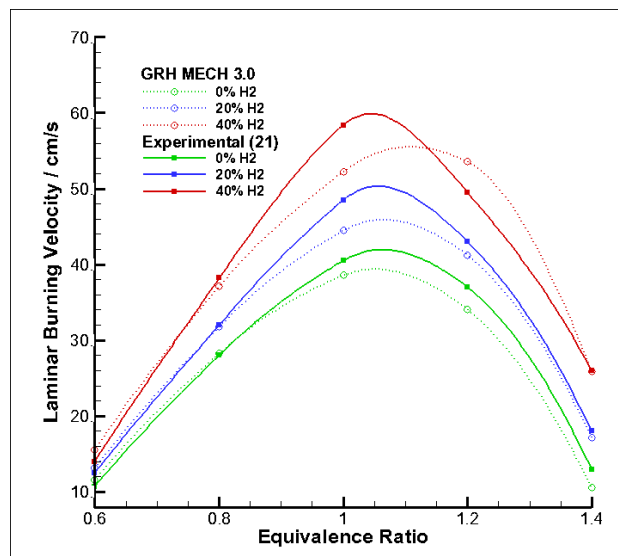
با توجه به اینکه ضریب نرخ واکنش در فرم آرنیوس وابستگی شدیدی به دما دارد؛ دما اثر زیادی بر واکنش های شیمیایی خواهد داشت. شکل ۱، تغییرات دما در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن در حالت استوکیومتریک، برای درصدهای حجمی مختلف هیدروژن را نشان می دهد و مشاهده می شود که رقیق سازی و افزایش درصد حجمی هیدروژن، تاثیر کمی بر پروفیل دما دارد؛ بطوری که دمای آدیاباتیک شعله برای حالت ۰٪ هیدروژن، برابر با ۲۲۲۳K و برای حالت ۴۰٪ هیدروژن، برابر با ۲۲۴۳K بوده است؛ یعنی حد اکثر حدود ۱۰٪ در دمای آدیاباتیک شعله تاثیر خواهد داشت. نتایج به دست آمده با مرجع (۲۰) مطابقت خوبی دارد.



شکل ۱- پروفیل دمای مخلوط پیش آمیخته متان- هوا- هیدروژن در حالت استوکیومتری

۲-۳ سرعت شعله آرام

اندازه گیری سرعت شعله آرام، معیاری مفید برای تمایل سوخت به سوختن است. شکل ۲، تغییرات سرعت شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن را به ازای درصدهای حجمی مختلف هیدروژن نشان می دهد و مشاهده می شود که سرعت شعله، با افزایش درصد حجمی هیدروژن افزایش می یابد. همچنین ماکزیمم سرعت شعله در حالتی که سوخت، متان خالص است در حدود حالت استوکیومتری رخ می دهد ولی در اثر رقیق سازی با هیدروژن، ماکزیمم سرعت شعله به سمت قسمت پرسوخت سوق می یابد. نتایج شبیه سازی عددی، با نتایج مرجع (۲۱) که بصورت آزمایشگاهی اندازه گیری شده، مطابقت خوبی دارد.



شکل ۲- سرعت شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

۳-۳ ضخامت شعله آرام

ضخامت شعله تحت تاثیر سرعت شعله است و نیز به دما، فشار و چگالی مخلوط سوخت- هوا وابسته است. دو راه اصلی برای اندازه گیری ضخامت شعله وجود دارد؛ یکی راه مستقیم و استفاده از ترموکوپل و Schlieren Photography (۱۵) و دیگری راه غیر مستقیم و با محاسبه. راه مستقیم پیچیده بوده و خطاهای ناشی از اندازه گیری را به دنبال دارد. یک مثال خوب برای اندازه گیری مستقیم ضخامت شعله، Andrew و Bradley (۱۴) هستند. Gottgens و همکارانش (۱۳) ضخامت شعله را با استفاده از اطلاعات سرعت شعله، محاسبه کرده اند که نتایج مربوط به محاسبات آنها تا نسبت هم ارزی ۱ در دسترس بوده است. در این مقاله برای محاسبه ضخامت شعله، به روش زیر عمل شده است (۲۲):

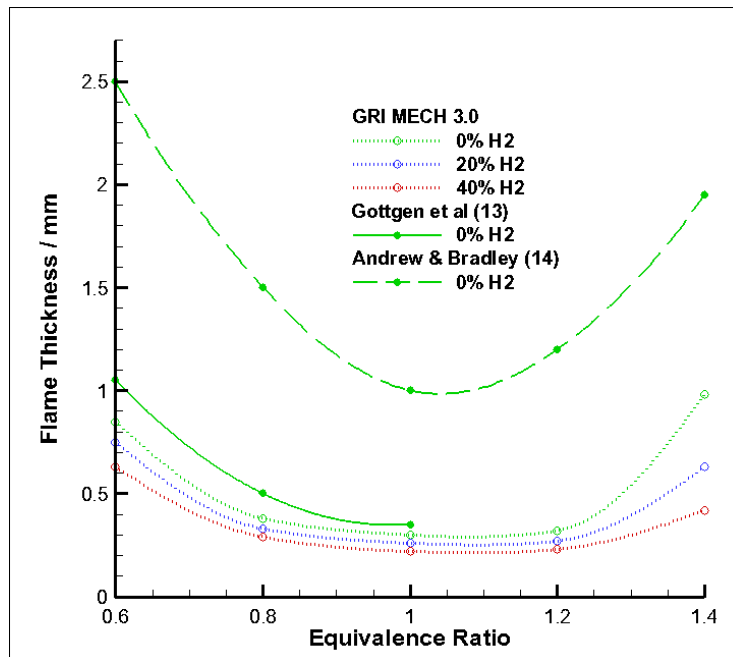
$$\delta = \frac{2\alpha}{S_L} \quad (۲)$$

S_L سرعت شعله آرام بوده که با استفاده از شبیه سازی عددی حاصل شده است، α ضریب نفوذ گرمایی و δ ضخامت شعله آرام می باشد.

$$\alpha = \frac{k(T)}{\rho_p c_p(T)} \quad (۳)$$

\bar{T} دمای متوسط گازهای سوخته و گازهای نسوخته، $k(T)$ ضریب انتقال گرمای هدایتی در دمای متوسط، ρ_p چگالی در دمای گازهای نسوخته و $c_p(T)$ ظرفیت گرمایی ویژه در دمای متوسط است.

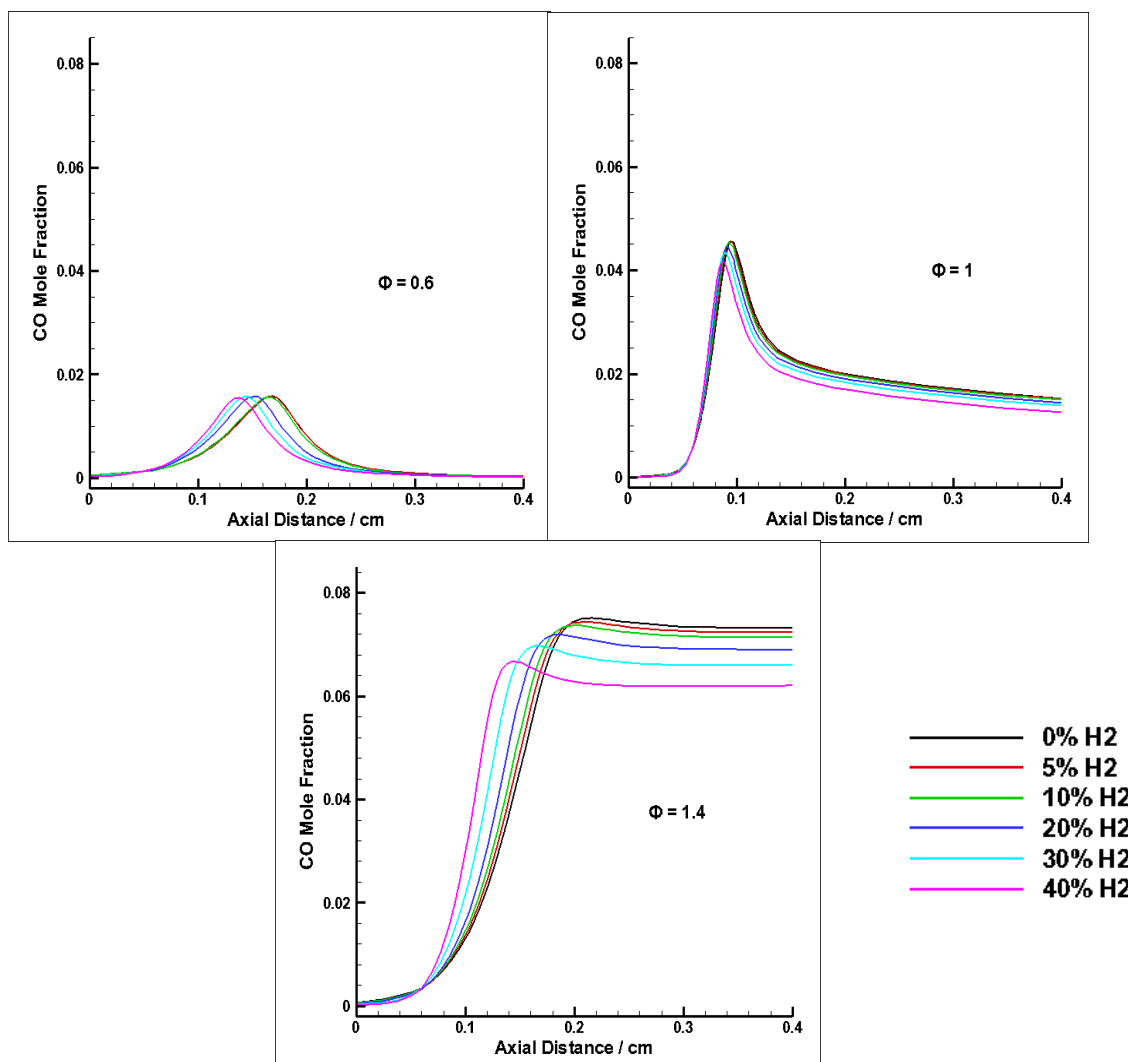
شکل ۳، تغییرات ضخامت شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن را نشان می دهد و مشاهده می شود که ضخامت شعله، با افزایش درصد حجمی هیدروژن کاهش می یابد. همچنین مینیمم ضخامت شعله، در حدود حالت استوکیومتریک رخ می دهد. اطلاعات مراجع ۱۳ و ۱۴، تنها برای حالتی که سوخت، متان خالص است در دسترس بوده است.



شکل ۳- ضخامت شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

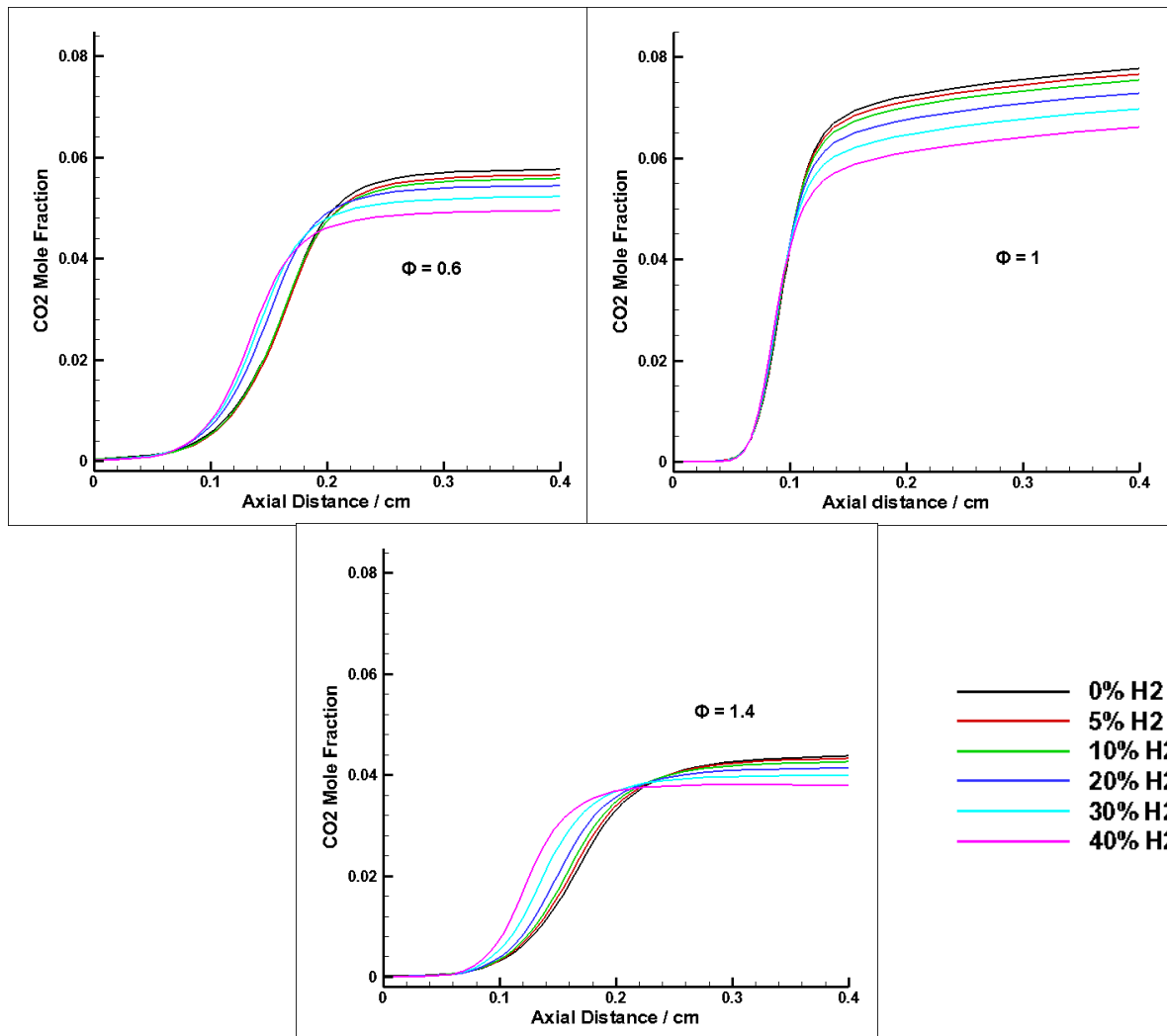
۳-۴ پروفیل کسر مولی آلاینده ها

شکل ۴، اثر رقیق سازی با هیدروژن بر کسر مولی CO را نشان می دهد و مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی هیدروژن در نسبت هم ارزی ۰/۶، اثری بر ماکزیمم کسر مولی CO ندارد و بیشترین مقدار آن حدود ۰/۰۱۶ است ولی در حالت استوکیومتریکی، افزایش درصد حجمی هیدروژن، موجب کاهش کسر مولی CO می شود به طوری که در حالت ۰/۰ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۴۶ و در حالت ۰/۴۰ H₂ ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۴۲ می باشد. در نسبت هم ارزی ۱/۴ نیز مانند حالت استوکیومتریکی، افزایش درصد حجمی هیدروژن، موجب کاهش کسر مولی CO می شود به طوری که در حالت ۰/۰ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۷۵ و در حالت ۰/۴۰ H₂ ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۶۷ می باشد. همچنین به طور کلی مشاهده می شود که با افزایش نسبت هم ارزی، ماکزیمم کسر مولی CO افزایش می یابد.



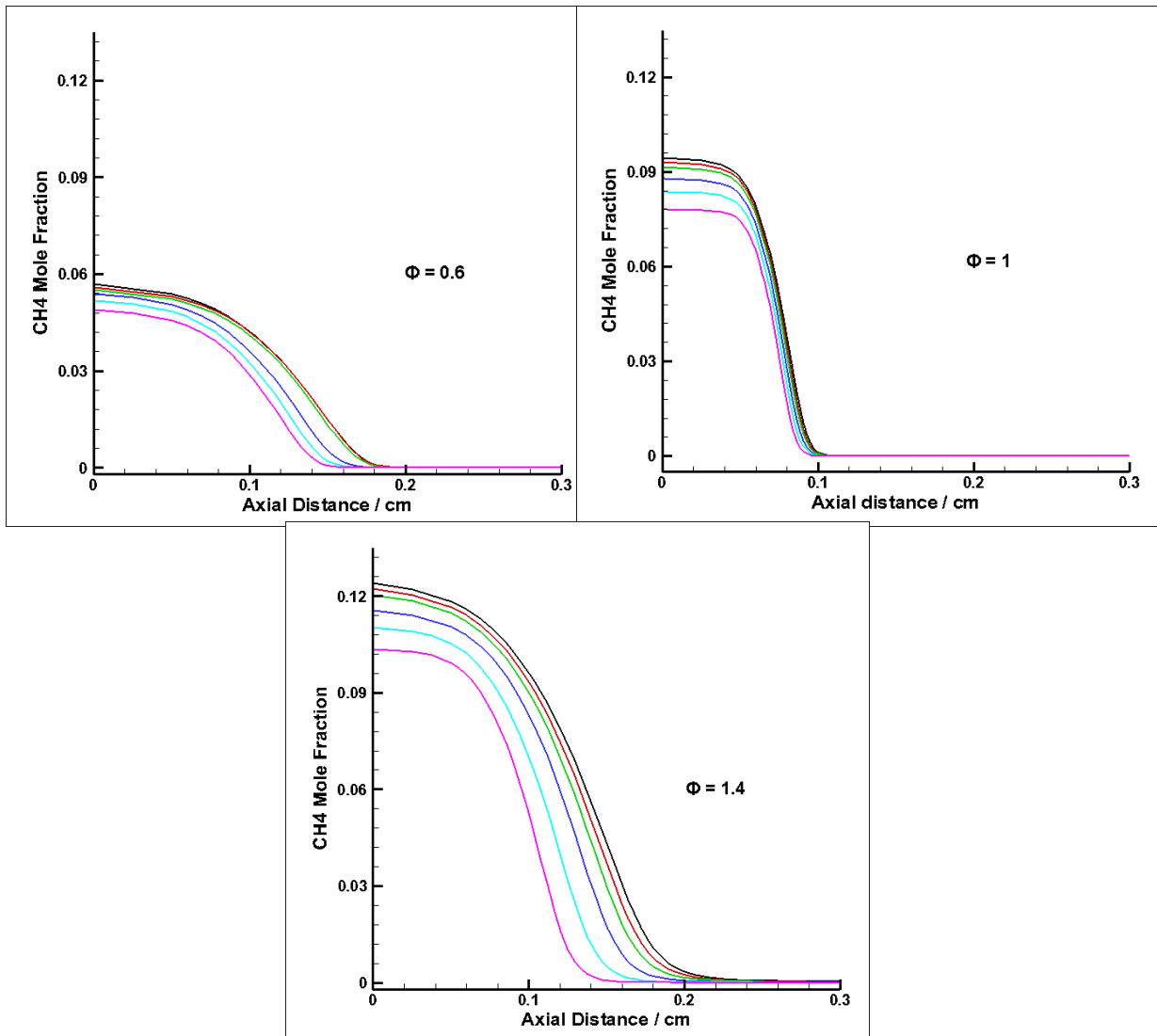
شکل ۴- پروفیل کسر مولی CO در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

شکل ۵، اثر رقیق سازی با هیدروژن بر کسر مولی CO_2 را نشان می دهد و مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی هیدروژن، سبب کاهش کسر مولی CO_2 می شود به طوری که در نسبت هم ارزی ۰/۶، در حالت ۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۵۸ و در حالت ۴۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۴۹ می باشد. همچنین در نسبت هم ارزی ۱ و در حالت ۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۷۸ و در حالت ۴۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۶۶ می باشد. در نسبت هم ارزی ۱/۴، در حالت ۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۴۴ و در حالت ۴۰٪ H_2 ، ماکزیمم کسر مولی حدود ۰/۰۳۸ می باشد. همانطور که مشاهده می شود، در حالت استوکیومتریک، ماکزیمم کسر مولی CO_2 از حالت نسبت های هم ارزی ۰/۶ و ۱/۴، بیشتر است.



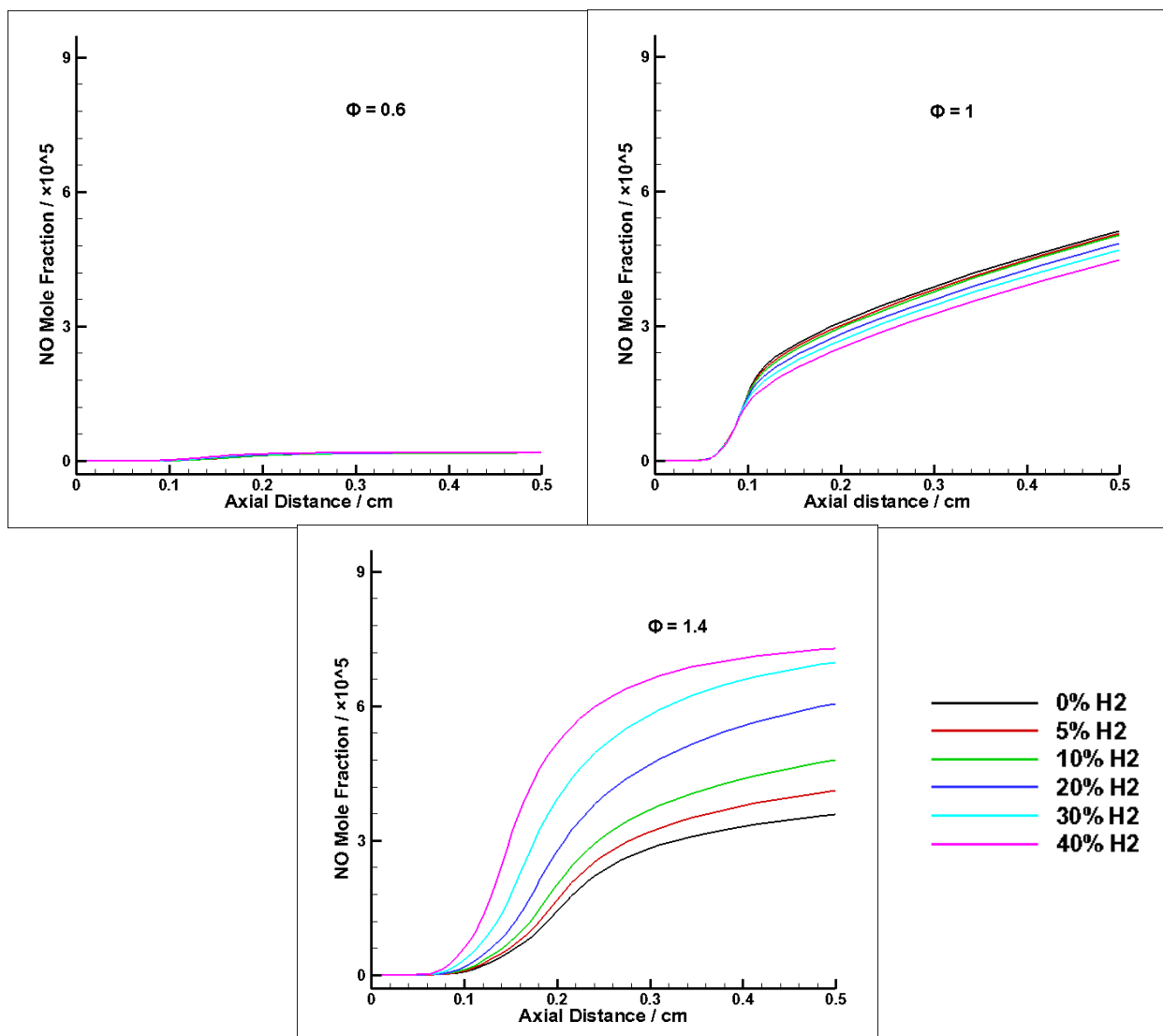
شکل ۵- پروفیل کسر مولی CO_2 در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

شکل ۶، اثر رقیق سازی با هیدروژن بر کسر مولی CH_4 را نشان می دهد و مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی هیدروژن، سبب کاهش کسر مولی CH_4 شده و با افزایش نسبت هم ارزی، کاهش کسر مولی CH_4 در اثر افزایش درصد حجمی هیدروژن، بیشتر خواهد بود. همچنین مشاهده می شود که ماکزیمم کسر مولی CH_4 ، با افزایش نسبت هم ارزی افزایش می یابد که این امر بدیهی بوده و به دلیل بالا رفتن کسر مولی CH_4 در ابتدای واکنش است. همچنین افزایش درصد حجمی هیدروژن سبب می شود که CH_4 در فاصله های کمتر به طور کامل مصرف شود.



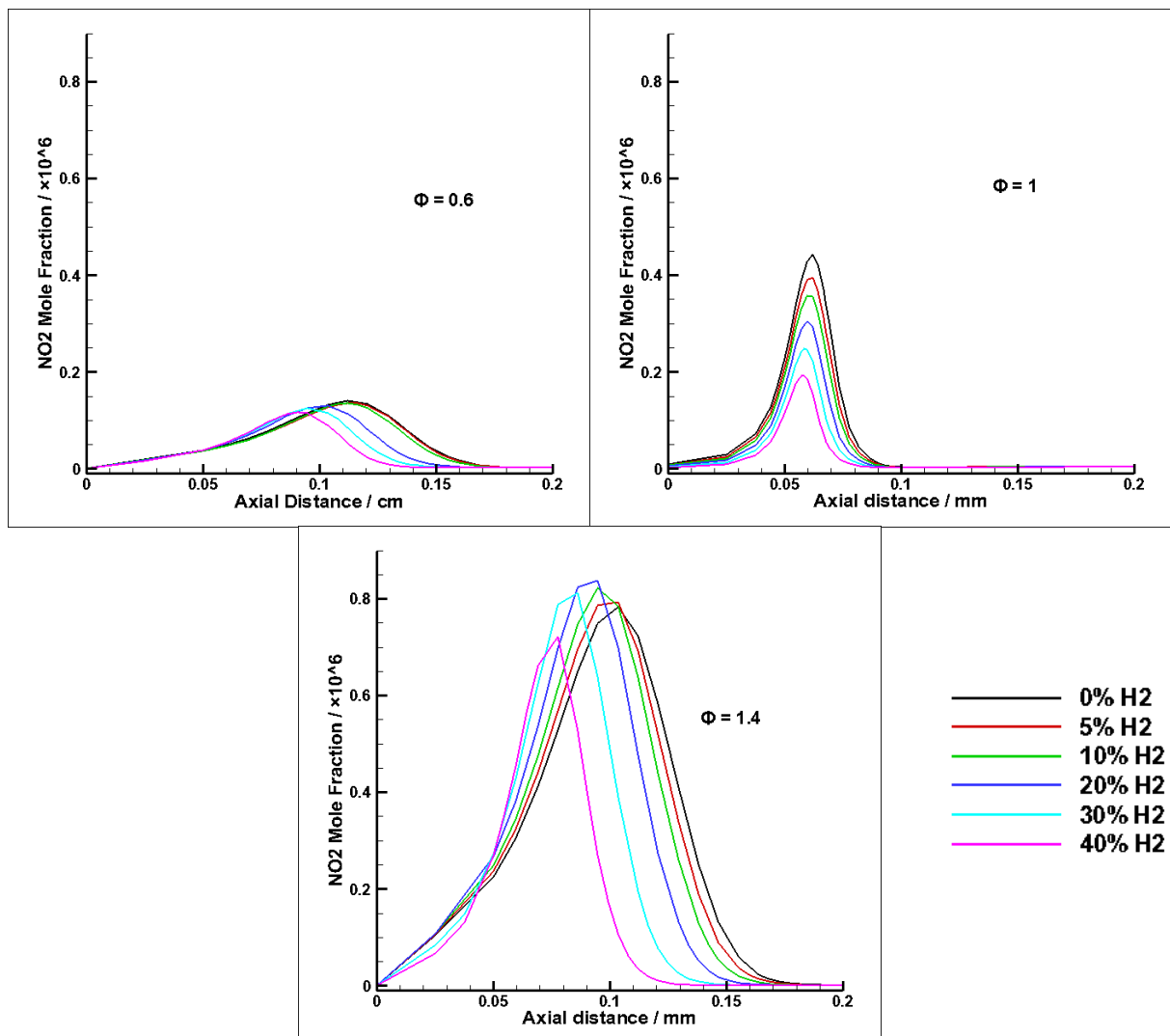
شکل ۶- پروفیل کسر مولی CH_4 در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

شکل ۷، اثر رقیق سازی با هیدروژن بر کسر مولی NO را نشان می دهد و مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی هیدروژن در حالت استوکیومتری، موجب کاهش کسر مولی و در نسبت های هم ارزی ۰/۶ و ۱/۴، موجب افزایش کسر مولی NO می شود، به طوری که در نسبت هم ارزی ۱، در حالت ۰٪ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود 5×10^{-5} و در حالت ۴۰٪ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود 4×10^{-5} می باشد. همچنین در نسبت هم ارزی ۱/۴، در حالت ۰٪ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود 3.6×10^{-5} و در حالت ۴۰٪ H₂، ماکزیمم کسر مولی حدود 7.3×10^{-5} می باشد. اما در نسبت هم ارزی ۰/۶، تغییرات قابل توجه نمی باشد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش نسبت هم ارزی، ماکزیمم کسر مولی NO افزایش یافته و این مطلب به دلیل افزایش دمای احتراق و حساس بودن تولید NO به دماست.



شکل ۷- پروفیل کسر مولی NO در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

شکل ۸، اثر رقیق سازی با هیدروژن بر کسر مولی NO_2 را نشان می دهد و مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی هیدروژن در حالت استوکیومتریک و نسبت هم ارز 0.6 ، موجب کاهش ماکزیمم کسر مولی NO_2 می شود. ولی در نسبت هم ارزی $1/4$ ، افزایش درصد حجمی هیدروژن از 0 تا 20% موجب افزایش و از 20 تا 40% موجب کاهش ماکزیمم کسر مولی NO_2 می شود، به طوری که در نسبت هم ارزی 0.6 ، در حالت $0\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $1/4 \times 10^{-7}$ و در حالت $40\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $1/2 \times 10^{-7}$ می باشد. همچنین در نسبت هم ارزی 1 ، در حالت $0\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $4/4 \times 10^{-7}$ و در حالت $40\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $1/9 \times 10^{-7}$ می باشد. در نسبت هم ارزی $1/4$ ، در حالت $20\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $8/4 \times 10^{-7}$ و در حالت $40\% \text{H}_2$ ، ماکزیمم کسر مولی حدود $7/2 \times 10^{-7}$ می باشد. همچنین مانند NO ، با افزایش نسبت هم ارزی، ماکزیمم کسر مولی NO_2 افزایش می یابد.



شکل ۸- پروفیل کسر مولی NO_2 در امتداد شعله آرام پیش آمیخته مخلوط متان- هوا- هیدروژن

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی عددی تاثیر افزودن درصد های حجمی مختلف هیدروژن بر ساختار و سرعت شعله آرام پیش آمیخته متان در نسبت های هم ارزی مختلف، با فشار اولیه ۱ atm و دمای اولیه ۲۹۸K، توسط کد PREMIX نرم افزار CHEMKIN II با مکانیزم GRI MECH 3.0 پرداخته شده و نتایج زیر به دست آمده است:

- افزودن هیدروژن تاثیر کمی بر پروفیل دمای مخلوط پیش آمیخته متان- هوا- هیدروژن در حالت استوکیومتریک دارد.
- با افزایش درصد حجمی هیدروژن سرعت شعله آرام، افزایش و ضخامت شعله آرام، کاهش می یابد.
- افزایش درصد حجمی هیدروژن موجب کاهش کسر مولی CO، CO₂ و CH₄ می شود.
- افزایش درصد حجمی هیدروژن در حالت استوکیومتریک، موجب کاهش و در نسبت های هم ارزی ۰/۶ و ۱/۴، موجب افزایش ماکزیمم کسر مولی NO می شود.
- افزایش درصد حجمی هیدروژن در حالت استوکیومتریک و نسبت هم ارزی ۰/۶، موجب کاهش ماکزیمم کسر مولی NO₂ می شود. ولی در نسبت هم ارزی ۱/۴، افزایش درصد حجمی هیدروژن از ۰ تا ۲۰٪ موجب افزایش و از ۲۰٪ تا ۴۰٪ موجب کاهش ماکزیمم کسر مولی NO₂ می شود.

مراجع

- 1- Bell, S.R., and Gupta, M., "Extinction of The Lean Operating Limit For Natural Gas Fueling of a Spark Ignited Engine Using Hydrogen Blending," *Combustion Science and Technology*, Vol. 123, pp. 23-48, 1997.
- 2- Goekalp, L., and Lebas, E., "Alternative fuels for industrial gas turbines", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1655-1663, 2004.
- 3- Lafay, Y., Renou, B., Cabot, G., and Boukhalfa, M., "Experimental and numerical investigation of the effect of h₂ enrichment on laminar methane-air flame thickness", *Combustion and Flame*, Vol. 153, pp. 540-561, 2008.
- 4- Forsters, P., Ramaswamy, V., "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing", *IPCC Fourth Assessment Report 2007*.
- 5- Frenklach, M., and Bornside, D.E., "Shock-initiated ignition in methane-propane mixtures", *Combustion and Flame*, Vol. 56, pp. 1-27, 1984.
- 6- Jinhua Wang, Zuohua Huang, Yu Fang, Bing Liu, Ke Zeng, Haiyan Miao, "Combustion behaviors of a directinjection engine operating on various fractions of natural gas-hydrogen blends", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 3555-3564, 2007.
- 7- Das, L.M., Rohit Gulati, and Gupta, P.K., "A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25, pp. 783-793, 2000.
- 8- Bade Shrestha SO, Karim G.A., "Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, pp. 577-586, 1999.
- 9- Bell, S.R., Gupta, M., "Extension of the lean operating limit for natural gas fueling of a spark ignited engine using hydrogen blending", *Combustion Science and Technology*, Vol. 123, pp. 23-48, 1997.
- 10- Yamaoka I, Tsuji H. 22nd Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, KS: The Combustion Institute, 1988.
- 11- Yu G, Law CK, Wu CK. "Laminar flame speeds of hydrocarbon air mixtures with hydrogen addition", *Combustion and Flame*, Vol. 63, pp.339-347, 1986.
- 12- Halter, F., Chauveau, C., Djebaili-Chaumeix, N., and Gokalp, I., "Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane- hydrogen-air mixtures", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 201-208, 2005.

- 13- Göttgens, J., Mauss, F., and Peter, N., "Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thickness of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene and Propane Flames", Symposium (international) on Combustion, Vol.24, pp. 129–135, 1992.
- 14- Andrews, G., E., and Bradley, D., "The Burning Velocity of Methan-Air Mixtures", Combustion and Flames, Vol. 19, pp. 275–288, 1972.
- 15- Eastman Kodak Co., (USA) 'Schlieren photography pamphlet', 1977.
- 16- Law Chung, K., "Combustion physics", New York: Cambridge University Press; 2006.
- 17- Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D., and Miller, J.A., "PRMIX: a FORTRAN program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames", Report. Sandia National Laboratories, SAND 85–8240, 1985.
- 18- Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., "CHEMKIN-II: a fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics", Technical report SAND89- 8009. Sandia National Laboratories; 1989.
- 19- Smith Gregory P, Golden David M, Frenklach Michael, Moriarty Nigel W, Eiteneer Boris, Goldenberg Mikhail, Bowman C Thomas, Hanson Ronald K, Song Soonho, Gardiner William C Jr., Lissianski Vitali V, Qin Zhiwei. Available from: <http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/>.
- 20- Zuohua Huang, Yong Zhang, Ke Zeng, Bing Liu, Qian Wang, Deming Jiang, "Measurements of laminar burning velocities for natural gas–hydrogen–air mixtures", Combustion and Flame, Vol. 146, pp. 302–311, 2006.
- 21- Jinhua Wang, Zuohua Huang, Chenglong Tang, Haiyan Miao, Xibin Wang, "Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane–air mixtures combustion", international journal of hydrogen energy, Vol. 34, pp. 1084–1096, 2009.
- 22- Turns, S.R., and Mantel, S.J., *An Introduction to Combustion*, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.