

بررسی اثر بازچرخانی گاز آگزوز بر سرعت شعله‌ی مخلوط پیش‌آمیخته‌ی آمونیاک/متان

محمدرضا کهنسال^{۱*}، مهرداد کیانی^۲، مهدی اشجعی^۳، احسان هوشفر^۴

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، kohansal.mr@ut.ac.ir

۲- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، mehrdad.kiani@ut.ac.ir

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ashjaee@ut.ac.ir

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، houshfar@ut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

سوخت‌های کم‌کربن و بی‌کربن، از جایگزین‌های مطرح شده برای سوخت‌های فسیلی به منظور کاهش سرعت گرمایش جهانی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، اثر بازچرخانی گاز آگزوز^۱ با دمای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس و مقدار ۰/۱ و ۰/۲، بر سرعت شعله‌ی مخلوط پیش‌آمیخته‌ی آمونیاک/متان به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. چهار مکانیزم مختلف شامل Okafor، San Diego، reduced Okafor و GRI-Mech 3.0 برای ارزیابی اولیه‌ی دقت عمل‌کرد انتخاب شدند. با مقایسه‌ی مقادیر محاسبه شده با مقادیر تجربی موجود در ادبیات موضوع، دو مکانیزم reduced Okafor و GRI-Mech 3.0 برای بررسی اثر بازچرخانی گاز آگزوز بر سرعت شعله مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی نتایج، کاهش سرعت شعله‌ی مخلوط پیش‌آمیخته‌ی آمونیاک/متان در اثر بازچرخانی گاز آگزوز رو نشان می‌دهد. علاوه بر آن، افزایش ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوسی دمای بازچرخانی اثر ناچیزی بر سرعت شعله دارد. به طور کلی، درصد کاهش سرعت شعله در اثر بازچرخانی گاز آگزوز در یک نسبت هم‌ارزی، تقریباً مستقل از کسر مولی متان است. در شرایطی که دمای گاز بازچرخانی شده ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس باشد، برای مقادیر بازچرخانی ۰/۱ و ۰/۲ میزان کاهش سرعت شعله به ترتیب حدود ۳۰ و ۶۰ درصد است.

کلمات کلیدی: آمونیاک، متان، سرعت شعله، بازچرخانی گاز آگزوز

مقدمه

معضل گرمایش جهانی و اثرات مخرب آن، احساس نیاز به جایگزینی سوخت‌های فسیلی را بیش از پیش کرده است. تا به امروز منابع مختلفی برای تأمین انرژی معرفی شده‌اند؛ از جمله انرژی خورشید و باد. اگرچه اکثر منابع پیشنهاد شده، مانند انرژی خورشید، به صورت رایگان در اختیار انسان قرار دارند، ولی به منظور تبدیل این انرژی به صورتی که قابل استفاده باشد نیازمند تجهیزات مختلفی هستیم. به همین خاطر اگر هدف استفاده از این منابع در مقیاس وسیع باشد، بودجه‌ای کلان برای تأمین این تجهیزات مورد نیاز است. تغییر سوخت مصرفی نیروگاه‌های تولید انرژی، می‌تواند گزینه‌ی مناسب دیگری برای تولید انرژی بدون تشدید گرمایش جهانی باشد. اگر سوخت جایگزین به خوبی مهندسی شود، امکان استفاده از آن در تجهیزات نیروگاهی‌ای که در حال حاضر سوخت‌های هیدروکربنی می‌سوزانند نیز وجود خواهد داشت؛ در نتیجه، برای صنعتی‌سازی آن بودجه و هزینه‌ی هنگفتی نیاز نخواهد بود.

هیدروژن یکی از معروف‌ترین و شناخته‌شده‌ترین سوخت‌های بی‌کربن^۲ محسوب می‌شود. هیدروژن به دلیل نداشتن اتم کربن در ساختار خود، احتراق آن گاز گلخانه‌ای مهم کربن‌دی‌اکسید را منتشر نمی‌کند. با این وجود، استفاده از هیدروژن با چالش‌های فناوری قابل توجهی رو به روست؛ به خصوص مشکلات مربوط به ایمنی و ذخیره‌سازی^۱. پژوهش‌های بسیاری به منظور حل مشکلات مربوط به ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن

انجام شده است که از نتایج آن، پیشنهاد آمونیاک به عنوان حامل هیدروژن بوده است [۲]. آمونیاک به طور معمول توسط فرآیند هابر-بوش تولید می‌شود، هم‌چنین از طریق الکترولیز آب توسط انرژی‌های تجدیدپذیری مانند باد و خورشید نیز قابل تولید است [۳]. هم‌چنین برخلاف هیدروژن مایع که برای نگه‌داری آن نیازمند فشارهای چندصد بار هستیم، آمونیاک در فشار حدود ۸ بار و دمای ۲۱ درجه‌ی سلسیوس امکان ذخیره‌سازی دارد [۴، ۵]. این ویژگی‌های مطلوب، آمونیاک را تبدیل به یک گزینه‌ی مناسب به عنوان یک سوخت مستقل تبدیل کرده است. در مقابل ویژگی‌های مطلوب اشاره شده، آمونیاک دارای ویژگی‌های احتراقی ضعیفی است؛ مانند سرعت شعله‌ی پایین [۶]. به‌منظور استفاده‌ی گسترده از آمونیاک به عنوان یک سوخت مستقل، راه‌کاری برای بهبود ویژگی‌های احتراقی آن نیاز است. یک رویکرد رایج برای بهبود ویژگی‌های احتراقی آمونیاک، هم‌سوزی آن با سوخت‌هایی با ویژگی‌های احتراقی مطلوب مانند هیدروژن و متان است [۷].

هایاکاوا و همکاران^۳ [۶] سرعت شعله‌ی آمونیاک خالص را در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۱ تا ۵ اتمسفر مورد پژوهش قرار دادند. نتایج، نشان‌دهنده‌ی سرعت شعله‌ی پایین آمونیاک نسبت به دیگر هیدروکربن‌ها بود. هم‌چنین هان و همکاران^۴ [۸]، به بررسی سرعت شعله‌ی آمونیاک در شرایط پیش‌گرمایش به صورت تجربی پرداختند. نتایج حاصل نشان دادند که با افزایش دمای پیش‌گرمایش تا ۱۷۵ درجه‌ی سلسیوس، بیشینه‌ی سرعت شعله از حدود ۷ سانتی‌متر به حدود ۱۵ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد. اگرچه این افزایش دو برابری سرعت شعله مطلوب است ولی با این وجود نیز، سرعت شعله‌ی آمونیاک نسبت به سوخت‌های صنعتی مانند متان پایین‌تر است [۹].

سوخت هیدروژن به دلیل بی‌کربن بودن آن و ویژگی‌های احتراقی منحصر به فرد آن، همواره مورد توجه بوده است. به همین دلیل، اثر افزودن هیدروژن به آمونیاک به عنوان افزونه در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی سرعت شعله‌ی آمونیاک/هیدروژن در دما و فشار استاندارد توسط هان و همکاران^۵ [۱۰] صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت شعله‌ی این مخلوط با افزایش هیدروژن به صورت نمایی افزایش می‌یابد. سرعت شعله‌ی آمونیاک/هیدروژن در فشارهای بالا توسط ایچی کاوا و همکاران^۶ [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت که مطابق انتظار، با افزایش فشار سرعت شعله کاهش می‌یابد. با وجود بی‌کربن بودن هیدروژن و ویژگی‌های احتراقی مطلوب آن که باعث بهبود و جبران ویژگی‌های احتراقی ضعیف آمونیاک می‌شود، ولی همانطور که پیش‌تر اشاره شد، نگهداری و انتقال هیدروژن کماکان با مشکلات متعدد فناوری رو به روست [۱۲، ۱۳].

⁴ Han et al.

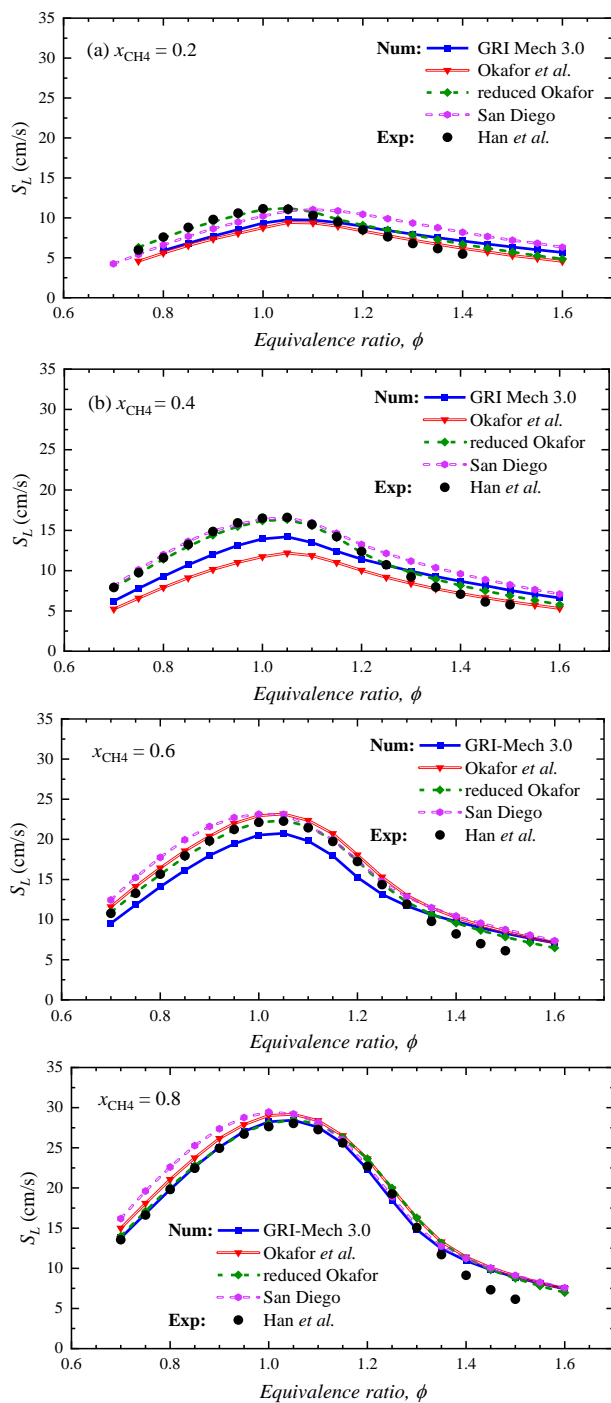
⁵ Han et al.

⁶ Ichikawa et al.

¹ Exhaust gas recirculation (EGR)

² Carbon-free fuels

³ Hayakawa et al.



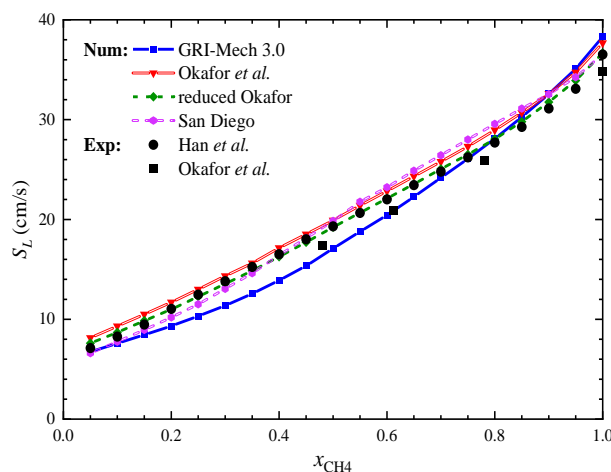
شکل ۲: سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان به ازای نسبت هم‌ارزی و کسر مولی‌های مختلف متان، x_{CH_4} اندازه‌گیری شده توسط هان و همکاران [۱۰] و محاسبه شده توسط چهار مکانیزم در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر.

باید توجه داشت که اگرچه انتظار می‌رود بازچرخانی گاز آگزوز اثر مثبتی بر میزان آلاینده‌های منتشر شده داشته باشد، ولی اثر آن بر نحوه‌ی عمل‌کرد سوخت نیز دارای اهمیت است.

هدف این پژوهش بررسی اثر میزان بازچرخانی گاز آگزوز و دمای آن، بر سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان در نسبت هم‌ارزی‌ها و کسر مولی‌های مختلف

متان سوختی صنعتی با ویژگی‌های احتراقی مناسب است که زیرساخت‌های تولید، انتقال و نگهداری آن، موجود است. علاوه بر آن، احتراق آن در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. به همین خاطر، متان جزء گزینه‌های مناسب برای بهبود ویژگی‌های احتراقی آمونیاک محسوب می‌شود. احتراق مخلوط آمونیاک/متان توسط آکافور و همکاران^۱ [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش علاوه بر بررسی سرعت شعله در دما و فشار اتاق، مکانیزمی برای محاسبه‌ی ویژگی‌های احتراقی این سوخت نیز ارائه شد. در بررسی دیگر همین گروه، پژوهشی پیرامون سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان در فشارهای بالا تا ۵ اتمسفر ارائه شد. علاوه بر آن، مکانیزم کاهیده‌ای^۲ بر اساس مکانیزم قبلی و بهینه شده توسط مقادیر تجربی جدید به دست آمده، ارائه شد [۱۵]. بررسی‌های مشابه دیگری به منظور بررسی سرعت شعله‌ی این مخلوط توسط گروه‌های دیگری مانند هان و همکاران^۳ [۱۰] و ژیا و همکاران^۴ [۱۶] نیز ارائه شده است. نتایج تمامی تحقیقات نشان‌دهنده‌ی مؤثر بودن افزودن متان بر بهبود ویژگی‌های احتراقی آمونیاک است. اگرچه احتراق مخلوط سوختی آمونیاک/متان باعث تولید گاز گلخانه‌ای کربن‌دی‌اکسید خواهد شد ولی این مقدار به مراتب از سوزاندن متان خالص کمتر خواهد بود. علاوه بر آن، این احتمال نیز وجود دارد که پس از بررسی‌های بیشتر و کسب اطلاعات دقیق‌تر از نحوه‌ی احتراق این مخلوط، امکان احتراق سوخت آمونیاک/متان در محفظه‌های احتراق موجود در صنعت که متان می‌سوزاند نیز وجود داشته باشد.

امروزه اثراتی که آلاینده‌ها بر محیط زیست دارند بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است و رو به روز قوانین سخت‌گیرانه‌تری برای کاهش انتشار آلاینده‌ها اتخاذ می‌شود. بازچرخانی گاز آگزوز با کاهش غلظت اکسیژن و یکنواخت‌سازی توزیع دما، مانع ایجاد بیشینه‌ی دمایی بالا می‌شود که این موضوع باعث کاهش اکسیدهای نیتروژن^۵ خواهد شد. در زمینه‌ی اثر بازچرخانی گاز آگزوز بر عمل‌کرد موتورهای دیزلی و آلاینده‌های آن تحقیق‌های بسیاری انجام شده است [۱۷، ۱۸]. عبدالآل^۴ [۱۷] نشان داد که با داشتن ۱۰ تا ۲۵ درصد بازچرخانی گاز آگزوز، مقدار اکسیدهای نیتروژن به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل ۱: سرعت شعله‌ی استوکیومتری آمونیاک/متان نسبت به کسر مولی متان، x_{CH_4} اندازه‌گیری شده توسط هان و همکاران [۱۰] و آکافور و همکاران [۱۴]، و محاسبه شده توسط چهار مکانیزم معرفی شده.

⁴ Xiao et al.

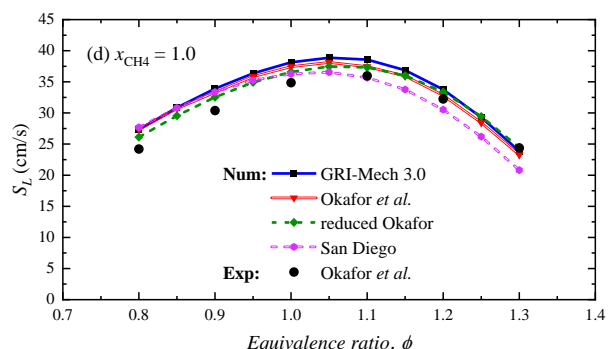
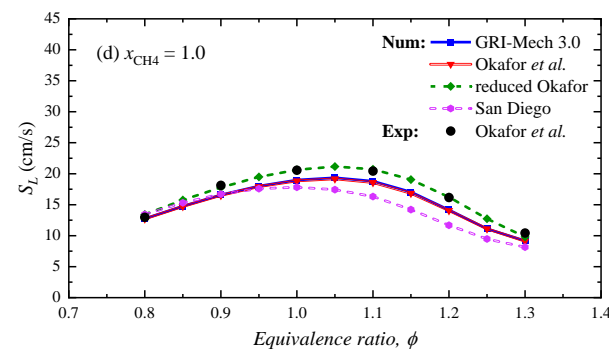
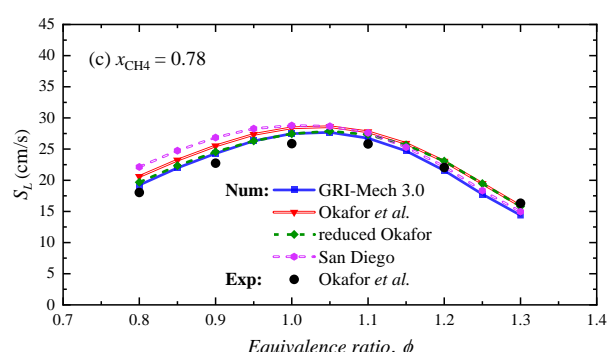
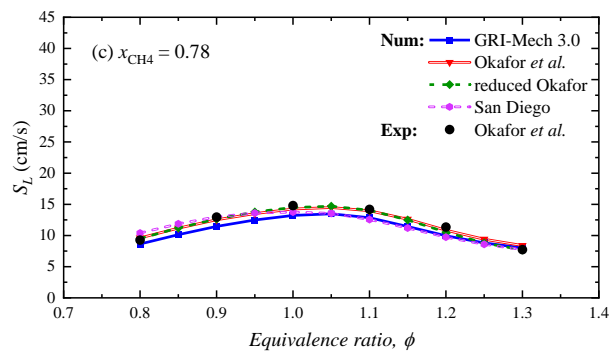
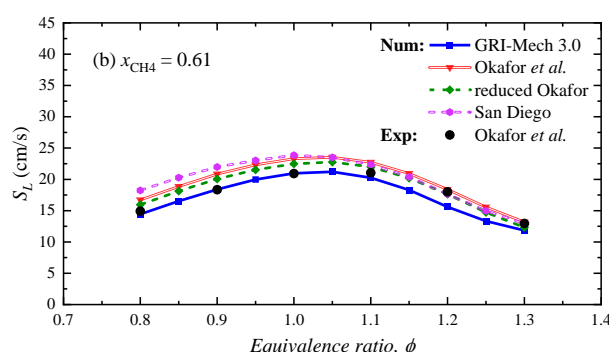
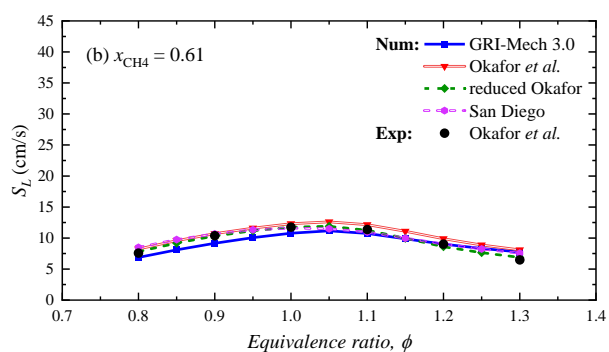
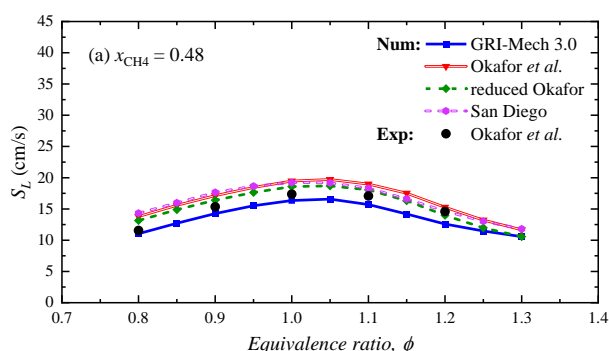
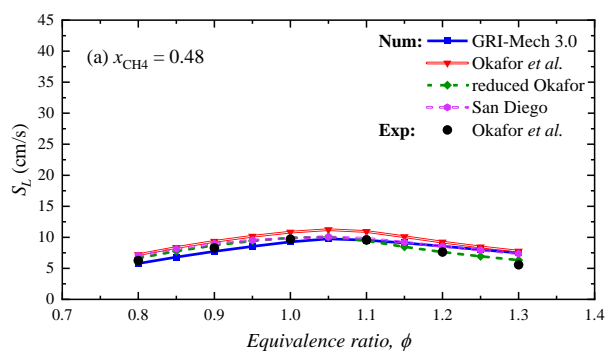
⁵ NOx

⁶ Abd-Alla

¹ Okafor et al.

² Reduced mechanism

³ Han et al.



شکل ۴: سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان به ازای نسبت هم‌ارزی و کسر مولی‌های مختلف متان، x_{CH_4} اندازه‌گیری شده توسط آکافور و همکاران [۱۵] و محاسبه شده توسط چهار مکانیزم در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۵ اتمسفر.

شکل ۳: سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان به ازای نسبت هم‌ارزی و کسر مولی‌های مختلف متان، x_{CH_4} اندازه‌گیری شده توسط آکافور و همکاران [۱۴] و محاسبه شده توسط چهار مکانیزم در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۱ اتمسفر.

برای این بررسی، در ابتدا مقادیر محاسبه شده توسط مکانیزم‌های موجود در ادبیات موضوع با مقادیر تجربی مقایسه شده و سپس بهترین مکانیزم‌ها از نظر عمل‌کرد انتخاب شده‌اند.

متان به صورت عددی است. میزان بازچرخانی گاز آگزوز ۱۰ و ۲۰ درصد (از کل مقدار گاز خروجی آگزوز) در نظر گرفته شده است. طبق پژوهش سانگ و همکاران^۱ [۱۹]، دمای دودکش نیروگاه‌های سوخت فسیلی حدود ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس است، به همین خاطر دمای گاز بازچرخانی شده‌ی ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی جنبشی^۲

مکانیزم‌های GRI-Mech 3.0 [۲۰] (توسعه‌یافته برای متان)، Okafor [۱۴] (توسعه‌یافته بر اساس مکانیزم GRI-Mech 3.0 برای آمونیاک/متان)،

² Kinetic modeling

¹ Song et al.

جدول ۱: سرعت شعله (سانتی‌متر بر ثانیه) و خطای آن در کسر مولی ۰/۶ متان در حالت‌های ۱ و ۲؛ حالت ۱: در نظر گرفتن تمامی گونه‌های با کسر مولی بزرگتر از 10^{-4} ، حالت ۲: در نظر گرفتن تنها سه گونه‌ی نیتروژن، کربن‌دی‌اکسید و بخار آب.

نسبت هم‌ارزی	مکانیزم	حالت ۱	حالت ۲	خطا
۰/۸	GRI	۸/۹۷	۸/۶۶	۳/۴۵٪
	Reduced Okafor	۱۰/۵۱	۱۰/۱۰	۳/۸۶٪
۱/۰	GRI	۱۳/۷۵	۱۳/۴۰	۲/۵۲٪
	Reduced Okafor	۱۵/۱۴	۱۴/۷۹	۲/۳۱٪
۱/۳	GRI	۷/۶۶	۷/۴۸	۲/۲۳٪
	Reduced Okafor	۷/۵۱	۷/۳۹	۱/۵۴٪

هم‌ارزی ۱/۰۵ اتفاق می‌افتد، غیر از کسر مولی ۰/۲ که بیش‌ترین سرعت در نسبت هم‌ارزی ۱/۰ رخ می‌دهد.

شکل ۳ و ۴ داده‌های تجربی و شبیه‌سازی سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان به ازای نسبت هم‌ارزی و کسر مولی‌های مختلف متان در فشار ۱ و ۵ اتمسفر را نمایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فشار، سرعت شعله کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش متان، همانطور که انتظار می‌رود، سرعت شعله‌ی مخلوط آمونیاک/متان افزایش می‌یابد. این نتایج نیز عمل کرد بهتر مکانیزم reduced Okafor را در پیش‌بینی سرعت شعله نشان می‌دهند، به خصوص در فشار ۵ اتمسفر. قابل توجه است که در بعضی حالات مانند کسر مولی ۰/۴ متان و فشار ۱، مکانیزم GRI-Mech 3.0 عمل کرد بهتری نسبت به سایر مکانیزم‌ها داراست. نکته‌ی قابل توجه آن است که همانند فشار ۱ اتمسفر، در فشار ۵ اتمسفر نیز پیش‌بینی سرعت شعله در نسبت هم‌ارزی ۱/۰۵ رخ می‌دهد.

با توجه نتایج ارائه شده، به طور کلی در اکثر شرایط مکانیزم reduced Okafor عمل کرد و دقت بهتری نسبت به سایر مکانیزم‌ها و مکانیزم پایه‌ی خود (مکانیزم Okafor) ارائه داده است. مکانیزم GRI-Mech 3.0 اگرچه در اکثر شرایط دقت بالایی ندارد ولی با افزایش میزان متان در مخلوط، عمل کرد آن بهبود می‌یابد و حتی در برخی شرایط دقت بالاتری نسبت به مکانیزم reduced Okafor نیز نمایش می‌دهد. بنابراین، دو مکانیزم reduced Okafor و GRI-Mech 3.0 به منظور بررسی اثر بازچرخانی گاز اگزوز بر سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان مورد استفاده قرار گرفتند.

اثر بازچرخانی گاز اگزوز بر سرعت شعله

به منظور کاهش محاسبات در بررسی اثر بازچرخانی گاز اگزوز بر سرعت شعله، تنها گونه‌های نیتروژن، کربن‌دی‌اکسید و بخار آب به عنوان گازهای بازگردانده شده در نظر گرفته شدند. برای اطمینان از دقت محاسبات و پایین بودن اثرگذاری سایر گونه‌ها بر سرعت شعله، در جدول ۱ سرعت شعله‌ی محاسبه شده توسط دو مکانیزم منتخب در شرایطی که تمامی گونه‌های با کسر مولی بیشتر از 10^{-4} در نظر گرفته شده‌اند، با حالتی که تنها سه گونه‌ی نیتروژن، کربن‌دی‌اکسید و بخار آب بازچرخانی شده‌اند، در نسبت هم‌ارزی ۰/۶، میزان بازچرخانی ۰/۱ و دمای ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس، مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت این دو مقدار در بیشترین حالت خود ۴ درصد است. با توجه به میزان کاهش‌ی که در محاسبات با در نظر گرفتن تنها سه گونه‌ی نیتروژن، کربن‌دی‌اکسید و بخار آب رخ می‌دهد، این مقدار از خطا ناچیز محسوب می‌شود. بنابراین در محاسبات بعدی، تنها سه گونه‌ی نیتروژن، کربن‌دی‌اکسید و بخار آب به عنوان گونه‌های بازچرخانی شده در نظر گرفته شده‌اند.

اثر بازچرخانی گاز اگزوز در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. در شرایطی که سرعت شعله بسیار پایین بوده است، مانند کسر مولی ۰/۲ متان و نسبت هم‌ارزی ۰/۸، مکانیزم‌ها قادر به محاسبه‌ی سرعت شعله نبوده‌اند. مشاهده می‌شود که بازچرخانش گاز اگزوز باعث کاهش سرعت شعله می‌شود. هم‌چنین با افزایش مقدار بازچرخانی، سرعت شعله بیشتر کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که حتی افزایش ۱۰۰ درجه‌ای دمای گاز بازچرخانی شده سرعت شعله را به مقدار بسیار ناچیزی افزایش می‌دهد و تأثیر بسیار کمی بر آن دارد. همانطور که انتظار می‌رفت، در کسر مولی‌های پایین متان، اختلاف بین مکانیزم reduced Okafor و GRI-Mech 3.0 بالاست و این اختلاف با افزایش کسر مولی متان کاهش

redcude Okafor [۱۵] (بهبود یافته و کاهیده‌ی مکانیزم Okafor) و San Diego [۲۱] (ترکیبی از مکانیزم نیتروژن به‌روز رسانی شده در ۲۰۱۸/۰۷/۲۳ و مکانیزم اصلی شامل گونه‌های کربن به‌روز رسانی شده در ۲۰۱۶/۱۲/۱۴) به منظور بررسی عددی انتخاب شده‌اند. نرم‌افزار Ansys Chemkin Pro [۲۲] نسخه‌ی ۱۷ با GRAD و CURV برابر ۰/۱ برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در تمامی حالات شبیه‌سازی، دما و فشار سوخت و هوا، به ترتیب برابر ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است.

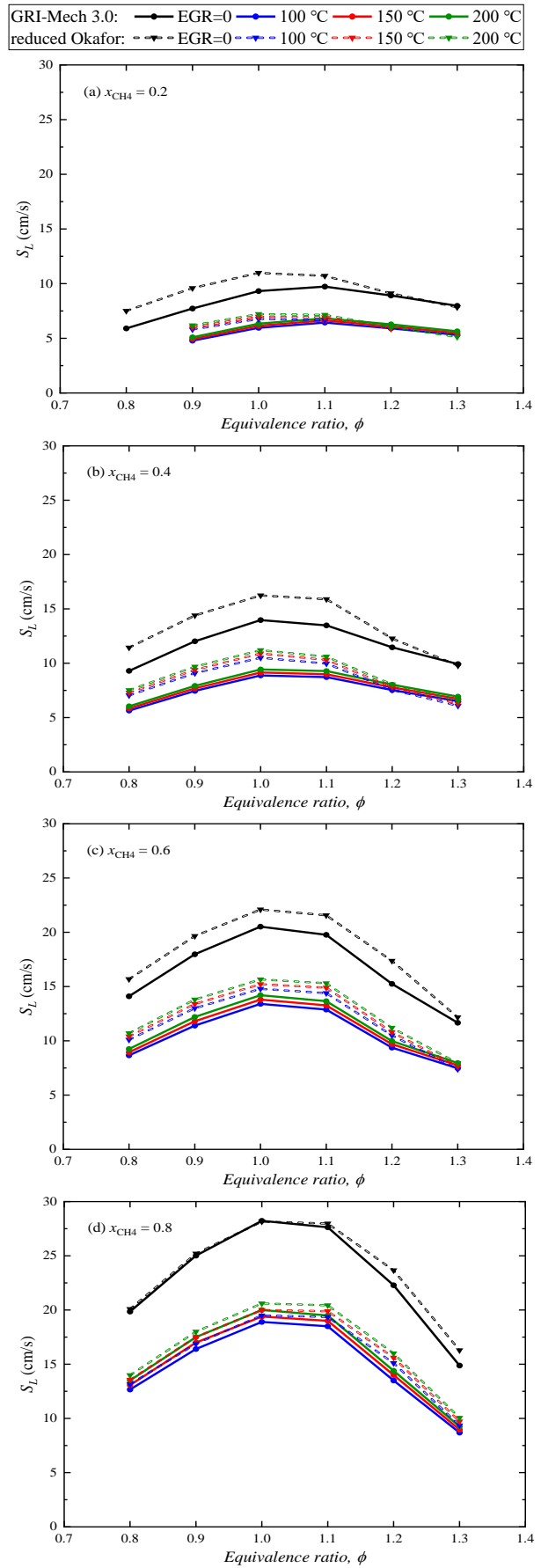
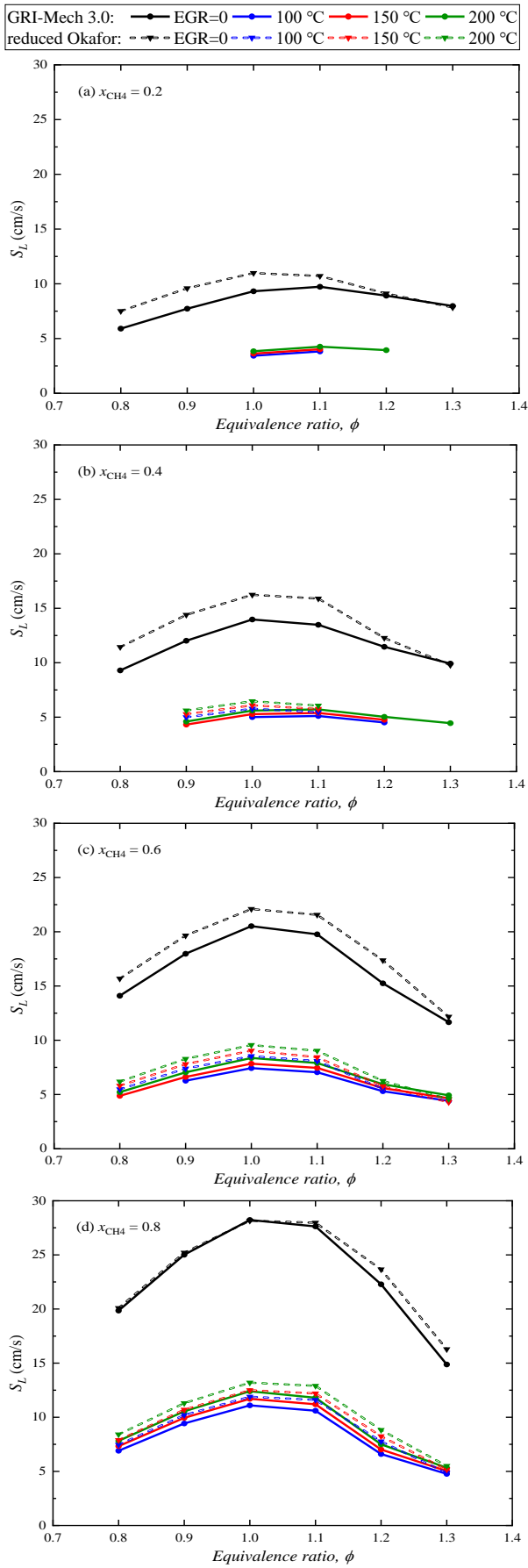
نتایج

مقایسه‌ی مکانیزم‌ها از نظر دقت عمل کرد

به منظور اعتبارسنجی و بررسی میزان دقت مکانیزم‌ها، نتایج محاسبه شده توسط مکانیزم‌ها با داده‌های تجربی موجود در ادبیات موضوع مقایسه شدند.

سرعت شعله‌ی احتراق استوکیومتری آمونیاک/متان به ازای کسر مولی‌های مختلف متان، پیش‌بینی شده توسط مکانیزم‌های معرفی شده در بخش مدل‌سازی جنبشی و نتایج پژوهش‌های هان و همکاران [۱۰] و آکافور و همکاران [۱۴] در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق آن، غیر از مکانیزم GRI-Mech 3.0 که در مقادیر متان پایین دقت عمل کردی پایینی را نشان می‌دهد، در سایر موارد، مقادیر محاسبه شده و مقادیر تجربی مطابقت خوبی را نشان می‌دهند. نکته‌ی حائز اهمیت، تابعیت خطی سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان نسبت به کسر مولی متان است.

شکل ۲ داده‌های تجربی سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان حاصل از پژوهش هان و همکاران [۱۰] و مقادیر محاسبه شده توسط مکانیزم‌ها را با تابعیت نسبت هم‌ارزی و به ازای کسر مولی‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متان نمایش می‌دهد. مکانیزم reduced Okafor تقریباً در تمامی شرایط و به خصوص در نسبت هم‌ارزی کمتر از ۱/۲ بهترین عمل کرد را داراست. البته در کسر مولی ۰/۸ متان و در نسبت هم‌ارزی ۱/۴-۱/۱۵، مکانیزم GRI-Mech 3.0 عمل کرد بهتری نسبت به مکانیزم reduced Okafor نشان می‌دهد. با توجه به آنکه مکانیزم GRI-Mech 3.0 برای سوخت متان توسعه یافته است، این نتیجه می‌تواند نشان دهنده‌ی نقش غلب متان در احتراق مخلوط آمونیاک/متان در کسر مولی‌های بالای متان باشد. باید توجه داشت که پیش‌بینی سرعت شعله در تمامی کسر مولی‌های متان در نسبت



شکل ۶: سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان با میزان بازچرخانی گاز آگزوز ۰/۲ و دمای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس به ازای نسبت هم‌ارزی‌ها و کسر مولی‌های مختلف متان، x_{CH_4} محاسبه شده توسط مکانیزم‌های reduced Okafor و GRI-Mech 3.0.

شکل ۵: سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان با میزان بازچرخانی گاز آگزوز ۰/۱ و دمای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس به ازای نسبت هم‌ارزی‌ها و کسر مولی‌های مختلف متان، x_{CH_4} محاسبه شده توسط مکانیزم‌های reduced Okafor و GRI-Mech 3.0.

جدول ۲: میزان کاهش سرعت شعله در میزان بازچرخانی ۰/۱ و دمای ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس (%)

XCH4	مکانیزم	نسبت هم‌ارزی					
		۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۰/۹	۰/۸
۰/۲	GRI	۲۹	۳۰	۳۰	۳۲	۳۴	-
	reduced Okafor	۳۵	۳۳	۳۳	۳۴	۳۵	-
۰/۴	GRI	۳۰	۳۰	۳۱	۳۳	۳۴	۳۵
	reduced Okafor	۳۳	۳۴	۳۳	۳۱	۳۳	۳۴
۰/۶	GRI	۳۲	۳۵	۳۱	۳۱	۳۲	۳۴
	reduced Okafor	۳۵	۳۶	۲۹	۲۹	۳۰	۳۲
۰/۸	GRI	۳۸	۳۵	۲۹	۲۹	۳۰	۳۲
	reduced Okafor	۳۸	۳۲	۲۷	۲۷	۲۹	۳۰

جدول ۳: میزان کاهش سرعت شعله در میزان بازچرخانی ۰/۲ و دمای ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس (%)

XCH4	مکانیزم	نسبت هم‌ارزی					
		۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۰/۹	۰/۸
۰/۲	GRI	-	۵۶	۵۶	۵۹	-	-
	reduced Okafor	-	-	-	-	-	-
۰/۴	GRI	۵۵	۵۶	۵۸	۶۰	۶۲	-
	reduced Okafor	-	-	۶۲	۶۰	۶۱	-
۰/۶	GRI	۵۸	۶۱	۶۰	۵۹	۶۱	۶۳
	reduced Okafor	۶۲	۶۴	۵۸	۵۷	۵۸	۶۰
۰/۸	GRI	۶۴	۶۶	۵۷	۵۶	۵۸	۶۱
	reduced Okafor	۶۶	۶۳	۵۴	۵۳	۵۵	۵۸

در یک نسبت هم‌ارزی، درصد کاهش سرعت شعله در اثر بازچرخانی گاز اگزوز تقریباً مستقل از کسر مولی متان است. میزان کاهش سرعت شعله در حالتی که دمای بازچرخانی ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس باشد، برای میزان بازچرخانی ۰/۱ و ۰/۲ به ترتیب حدود ۳۰ و ۶۰ درصد است.

مراجع

- Law CK, Kwon OC. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation. *Int J Hydrogen Energy* 2003;29:867e79.
- Zamfirescu C, Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel. *J Power Sources* 2008;185:459-65.
- Brandhorst H, Baltazar-Lopez M, Tatarchuk B, Cahela DR, Barron T. Ammonia -its transformation and effective utilization. In: 6th International energy conversion engineering conference. Cleveland, Ohio; 2008, p. 1-11.
- Thomas G, Parks G. Potential roles of ammonia in a hydrogen economy; 2006.
- P. Kumar, T.R. Meyer, Experimental and modeling study of chemical-kinetics mechanisms for H₂-NH₃-air mixtures in laminar premixed jet flames, *Fuel* 108 (2013) 166-176.
- Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Arakawa, Y., Kudo, T., Kobayashi, H., 2015, "Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures", *Fuel*, 159, 98-106.
- J. Li, H. Huang, N. Kobayashi, Z. He, Y. Osaka, T. Zeng. Research on Combustion and Emission Characteristics of Ammonia under Preheating Conditions. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 49, No. 7, pp. 641-648, 2016.
- X. Han, Z. Wang, S. Wang, R. Whiddon, Y. He, Y. Lv, A. A. Konnov, 2019, "Parametrization of the temperature dependence of laminar burning velocity for methane and ethane flames", *Fuel*, 239, 1028-1037.
- F. N. Egolfopoulos, P. Cho, C. K. Law. laminar flame speed of methane-air mixture under reduced and elevated pressures. *Combustion and flame* 76,375-391,(1989).
- Han X, Wang Z, Costa M, Sun Z, He Y, Cen K. Experimental and kinetic modeling study of laminar

می‌یابد. قابل توجه است که با افزایش کسر مولی متان تا ۰/۸، در شرایطی که بازچرخانی صورت نگیرد این دو مکانیزم نتایج تقریباً مشابهی ارائه می‌دهند ولی در صورت بازچرخانی گاز اگزوز، اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده توسط مکانیزم‌ها افزایش می‌یابد و با افزایش میزان بازچرخانی، این اختلاف بیشتر خواهد شد. دلیل این امر، تفاوت واکنش‌های موجود در این دو مکانیزم است. با توجه به آنکه غلظت گونه‌های حاصل از احتراق، و در نتیجه مقادیر گونه‌های مختلف در گاز بازچرخانی شده، با توجه به همین واکنش‌ها محاسبه می‌شود، افزایش اختلاف در مقادیر محاسبه شده با افزایش میزان بازچرخانی، قابل پیش‌بینی است.

میزان کاهش سرعت شعله در اثر بازچرخانی گاز اگزوز در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس و میزان بازچرخانی ۰/۱ و ۰/۲ به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. میزان کاهش پیش‌بینی شده توسط دو مکانیزم در شرایط یکسان تقریباً مشابه است و میزان کاهش در مقدار بازچرخانی ۰/۱ و ۰/۲، به ترتیب حدود ۳۰ و ۶۰ درصد می‌باشد. اگرچه در شرایط کم‌سوخت، میزان کاهش سرعت شعله با افزایش کسر مولی متان کاهش می‌یابد ولی به طور کلی در یک نسبت هم‌ارزی یکسان، میزان کاهش سرعت شعله در اثر بازچرخانی گاز اگزوز تقریباً مستقل از کسر مولی متان است.

به منظور تحلیل دقیق‌تر اثر بازچرخانی گاز اگزوز، پژوهش‌هایی در زمینه‌ی بررسی آلاینده‌ها به خصوص اکسیدهای نیتروژن در شرایط بازچرخانی به منظور ارزیابی مفید بودن این تکنیک نیاز است.

نتیجه‌گیری

اثر میزان و دمای بازچرخانی گاز اگزوز بر سرعت شعله‌ی آمونیاک/متان در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه‌ی داده‌های تجربی موجود با داده‌های عددی، دو مکانیزم از مکانیزم‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، به عنوان مکانیزم‌های منتخب برای پیش‌بینی رفتار سرعت شعله انتخاب شدند.

نتایج حاصل حاکی از آن است که بازچرخانی گاز اگزوز باعث کاهش سرعت شعله خواهد شد و با افزایش مقدار بازچرخانی، میزان کاهش سرعت شعله افزایش خواهد یافت. افزایش ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوسی دمای بازچرخانی از ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس به ۲۰۰، اثر کمی بر سرعت شعله داشته و سرعت شعله به میزان بسیار ناچیزی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن،

- burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames. *Int J Combustion and Flame* 2019;206:214-226.
- 11- A . Ichikawa , A . Hayakawa , Y. Kitagawa , K.K.A. Somarathne , T. Kudo , H. Kobayashi , Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures, *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (2015) 9570–9578.
 - 12- Lee JH, Lee SI, Kwon OC. Effects of ammonia substitution on hydrogen/air flame propagation and emissions. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(20): 11332e41.
 - 13- Lan R, Irvine JTS, Tao S. Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(2):1482-94.
 - 14- E.C. Okafor , Y. Naito , S. Colson , A. Ichikawa , T. Kudo , A. Hayakawa , H. Kobayashi , Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames, *Combust. Flame* 187 (2018) 185–198.
 - 15- E.C. Okafor , Y. Naito , S. Colson , A. Ichikawa , T. Kudo , A. Hayakawa , H. Kobayashi , measurement and modeling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using reduced reaction mechanism, *Combust. Flame* 204 (2019) 162-175.
 - 16- H. Xiao, A. Valera-Medina, Philip J Bowen. Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels. *Energy* 140 (2017) 125-135.
 - 17- G.H. Abd-Alla. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1027–1042.
 - 18- Lapuerta M, Hernandez JJ, Gimenez F. Evaluation of exhaust gas recirculation as a technique for reducing Diesel engine NOX emissions. *Proc Instn Mech Engrs Part D, J Autom Engng* 2000;214:85–93.
 - 19- C. Song, W. Pan, S. T. Srimat, J. Zheng, Y. Li, Yu-He Wang, Bo-Qing Xu, Qi-Ming Zhu. Tri-reforming of Methane over Ni Catalysts for CO₂ Conversion to Syngas With Desired H₂/CO Ratios Using Flue Gas of Power Plants Without CO₂ Separation. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 153, 315-322.
 - 20- G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Golden-berg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W. Gardiner Jr, GRI-Mech 3.0, 1999, combustion.berkeley.edu/gri_mech, (2011).
 - 21- U. Mechanism, Chemical-kinetic mechanisms for combustion applications, mechanical and aerospace engineering (combustion research), University of California at San Diego, 2014. <https://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>
 - 22- ANSYS Chemkin-Pro® Release 17.0 (Chemkin-Pro 15151) ANSYS, Inc. (2016-01-11).