

## بررسی تاثیر رقیق‌سازی بر سرعت شعله و تشکیل آلاینده‌ها در محفظه احتراق

محمد محمودی آریا<sup>۱</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۲</sup>، کاظم بشیر نژاد<sup>۳</sup>

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

[Mohammad.Ary62@gmail.com](mailto:Mohammad.Ary62@gmail.com)

### چکیده

رقیق‌سازی به عنوان یکی از روش‌های کاهش حداکثر دمای محفظه احتراق است که سبب کاهش تشکیل  $\text{NO}_x$  حرارتی می‌شود. روش‌های کنترل تشکیل  $\text{NO}_x$  همگی براساس کنترل دما و یا محدود کردن غلظت اکسیژن استوار است. در این تحقیق، اثر رقیق‌سازی بر روی حداکثر دمای شعله و تشکیل آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  با استفاده از کد Premix نرم افزار CHEMKin II به وسیله رقیق‌سازهای  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$ ، در نسبت‌های رقیق‌سازی مختلف و در محدوده‌ای از نسبت هم‌ارزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت رقیق‌سازی، حداکثر دمای شعله و همچنین انتشار آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  کاهش می‌یابند. همچنین مشخص گردید که، رقیق‌سازی با  $\text{CO}_2$  اثر بیشتری بر کاهش حداکثر دمای شعله، سرعت شعله و انتشار آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  دارد. جهت صحت‌گذاری بر درستی این شبیه‌سازی‌ها، نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که توافق مناسبی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رقیق‌سازی - محفظه احتراق -  $\text{NO}_x$  -  $\text{CO}$  - شبیه‌سازی

### ۱- مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به آلودگی قابل ملاحظه و یکی از عوامل اصلی گرم شدن زمین می‌باشد، که علت این امر انتشار آلاینده‌هایی از قبیل  $\text{NO}_x$  می‌باشد. هنگامیکه سوخت‌های فسیلی از قبیل گاز طبیعی یا روغن و ترکیبات مشتق شده از آنها در هوا می‌سوزد، محصولات اکسیداسیون شامل  $\text{CO}$ ،  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  تشکیل می‌شود. بعلاوه مولکول نیتروژن موجود در هوا با بعضی از مولکول‌های اکسیژن موجود در آن واکنش داده و اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) شکل می‌گیرد.  $\text{NO}_x$  تولید شده از مولکول نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا،  $\text{NO}_x$  حرارتی و  $\text{NO}_x$  تولید شده از مولکول نیتروژن موجود در سوخت،  $\text{NO}_x$  سوخت نامیده می‌شود. گاز طبیعی بعنوان سوختی که احتراق آن انتشار آلاینده کمتری را در پی دارد، از تمیزترین سوختها محسوب می‌شود که علت این امر ساختار شیمیایی ساده و عدم مشکل تبخیر سوخت می‌باشد. اعمال رقیق‌سازی به عنوان یک خط‌مشی جهت دستیابی به انتشار  $\text{NO}_x$  کمتر، در بسیاری از مقالات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. این اصل بر گسترش حدود اشتعال‌پذیری به سمت شرایط کم سوخت استوار است که کاهش قابل توجه اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد [1-5]. احتراق پیش‌آمیخته کم سوخت گاز طبیعی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، زیرا باعث پایین آمدن دمای شعله و در نتیجه انتشار  $\text{NO}_x$  کمتر می‌شود. هرچند در نزدیکی حدود اشتعال‌پذیری کم سوخت، پایداری شعله کم شده و ممکن است پدیده خاموشی اتفاق بیفتد. بعلاوه شعله‌های کم سوخت ممکن است منجر به مشکلاتی از قبیل خاموشی، راندمان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک (تبدیل انرژی) دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد مشهد

۲- استادیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد مشهد

۳- استادیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد مشهد

احتراق پایین و سطوح بالاتر مونوکسید کربن (CO) و هیدروکربن های نسوخته (UHC) شود، که یک راه حل عملی برای غلبه بر این مشکلات، افزودن سوخت های واکنش پذیرتر از قبیل هیدروژن می باشد [6-8]. هوای اضافی موجود باعث رقیق شدن احتراق شده و دمای شعله را پایین نگه می دارد و این امر باعث کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  حرارتی می شود. علاوه بر رقیق ساز  $\text{N}_2$  از  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , Ar, He و حتی NO می توان استفاده کرد. آزمایشات نشان می دهد که رقیق سازی کاهش چشمگیر  $\text{NO}_x$  را به همراه دارد [2,4,6,8,9]. در مورد رقیق سازی با  $\text{N}_2$  یا هوای اضافی، دمای آدیاباتیک شعله کاهش یافته و در هر دو مورد  $\text{NO}_x$  کمتری تشکیل می شود [10]. در مورد رقیق سازی با هوا، حضور اکسیژن در ابتدای احتراق تشکیل  $\text{NO}_x$  حرارتی را از طریق دو مکانیزم زیاد می کند: افزایش سینتیک احتراق و افزایش نرخ تشکیل NO. این احتمالاً به دلیل مشاهده  $\text{NO}_x$  کمتر در هنگامی است که، از  $\text{N}_2$  (در مقایسه با هوا) بعنوان رقیق ساز استفاده شده است [1]. یک تحقیق کامل بر روی این موضوع توسط Kobayashi و همکارانش [12] بر روی شعله های Air -  $\text{CO}_2$  -  $\text{CH}_4$  صورت گرفته است که مخلوط تا دمای 573 K پیش گرم شده و ماکزیمم فشار 1MPa می باشد. یکی از نتایج اصلی این تحقیق این است که با افزایش نسبت رقیق سازی  $\text{CO}_2$ ، شدت احتراق و نرخ مصرف سوخت کاهش می یابد. تحقیقات دیگر صورت گرفته بر روی این شعله نشان می دهد که رقیق سازی با  $\text{CO}_2$  کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  حرارتی را در پی دارد. در نهایت در همه تحقیقات مشاهده شد در هنگامی که نرخ رقیق سازی  $\text{CO}_2$  افزایش می یابد، سرعت شعله آرام کاهش می یابد. رقیق سازی با نیتروژن نیز منجر به کاهش حداکثر دمای شعله و در نهایت کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  حرارتی می شود.

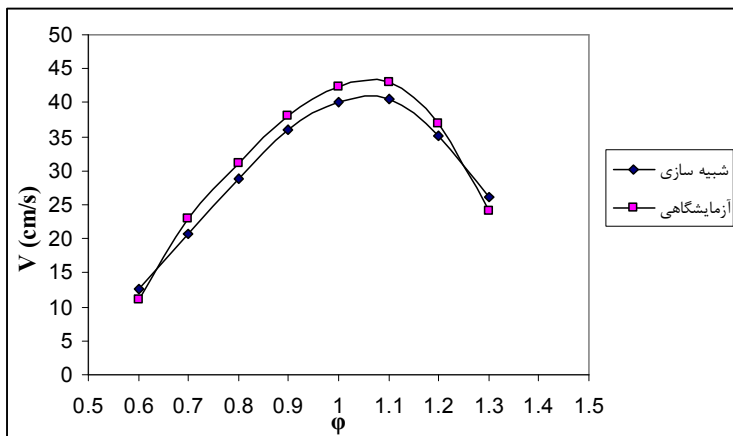
## ۲- شبیه سازی عددی

در مطالعه پیش رو به منظور بررسی تاثیر رقیق سازی بر  $\text{NO}_x$  تولیدی شعله متان-هوا، از کد Premix در نرم افزار CHEMKIN II استفاده شده است. در شبیه سازی ها از مکانیزم زنجیره ای [13] GRI-MECH3.0 بهره گرفته شده است. مشخصات شبکه مش بندی در این شبیه سازی عبارتند از:  $\text{GRAD} = 0.08$  و  $\text{CURV} = 0.8$  و معیارهای خطای نسبی و مطلق به ترتیب  $\text{RTOL} = 1\text{E}-4$  و  $\text{ATOL} = 1\text{E}-9$ . با توجه به معادله کلی واکنش و در نسبت های مختلف رقیق سازی  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  به بررسی تاثیر آن بر دمای شعله، سرعت شعله و تشکیل آلاینده های NO و CO پرداخته شده است. نسبت های مختلف رقیق سازی در ورودی کد Premix اعمال می شود.

## ۳- نتایج و بحث

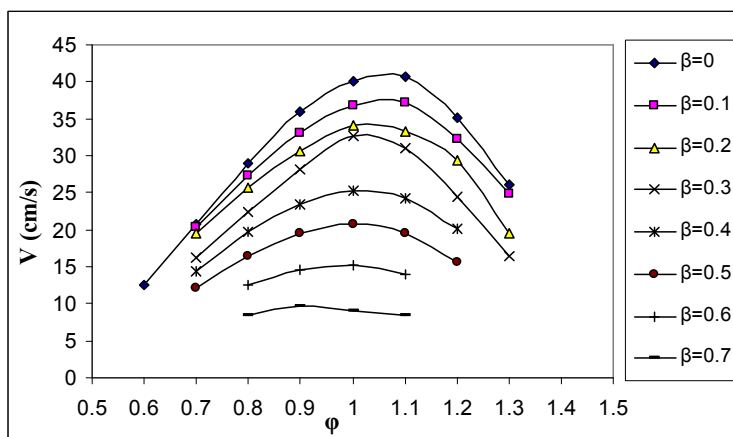
### ۳-۱- تاثیر رقیق کننده های مختلف بر سرعت شعله

در شکل ۱، نتایج شبیه سازی تاثیر رقیق ساز  $\text{CO}_2$  بر روی سرعت شعله متان - هوا در نسبت رقیق سازی  $\beta = 0.1$ ، با نتایج آزمایشگاهی کونپز و کونوف [17] مقایسه شده است که،  $\beta$  نسبت تعداد مول های  $\text{CO}_2$  به مجموع مول های  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}_2$  می باشد.



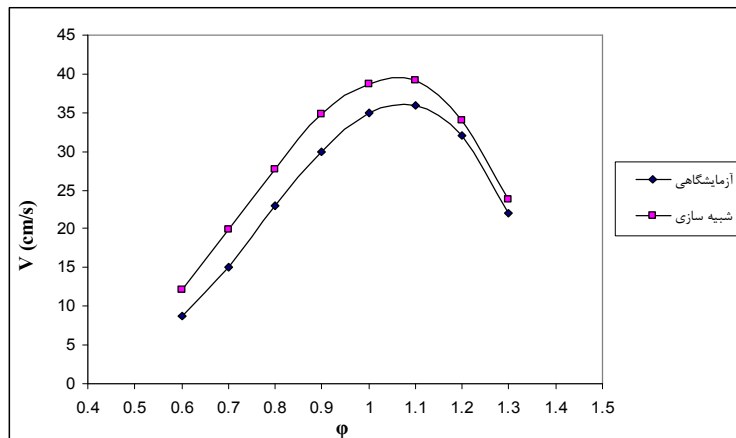
شکل ۱- تاثیر رقیق ساز  $\text{CO}_2$  بر سرعت شعله، در نسبت رقیق سازی  $\beta=0.1$  [17]

مقایسه نتایج شبیه سازی با آزمایشگاهی نشان می دهد که، با افزایش نسبت هم ارزی، تا نزدیک به حالت استوکیومتریکی، نمودار روند صعودی داشته و سپس با حرکت به سمت نواحی پر سوخت سرعت شعله کاهش می یابد. علت این امر این است که، سرعت شعله با دما رابطه معکوس داشته و با فشار نسبت مستقیم دارد. شکل ۲ روند کلی تغییر سرعت شعله را در نسبت هم ارزی های مختلف و در محدوده ای از نسبت های رقیق سازی نشان می دهد.



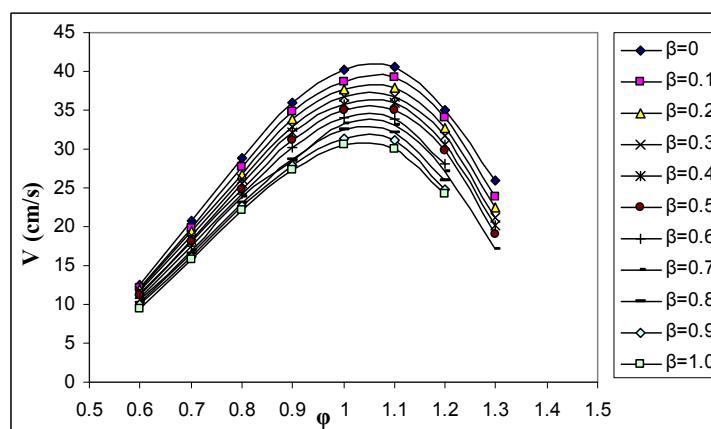
شکل ۲- تاثیر رقیق ساز  $\text{CO}_2$  بر سرعت شعله، در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

شکل ۳ نشان می دهد که، در مورد رقیق ساز  $\text{N}_2$  و در یک نسبت رقیق سازی مشخص با حرکت از ناحیه کم سوخت به ناحیه پر سوخت، سرعت شعله تا نزدیک به شرایط استوکیومتریکی زیاد شده و سپس کم می شود و این نتایج شبیه سازی تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف [18] نشان می دهد.



شکل ۳- تاثیر رقیق ساز  $N_2$  بر سرعت شعله، در نسبت رقیق سازی  $\beta=0.2$  [18]

در شکل ۴، نتایج شبیه سازی تغییر سرعت شعله، در نسبت های مختلف هم ارزی و در محدوده ای از نسبت های رقیق سازی  $N_2$  آورده شده است که روند منطقی و قابل قبولی را نشان می دهد.

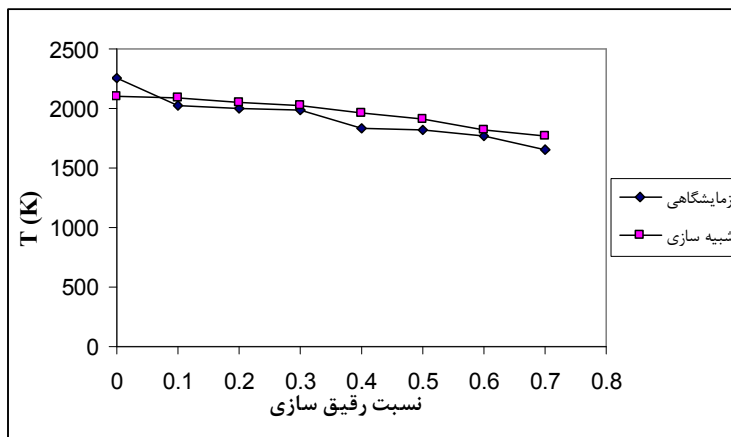


شکل ۴- تاثیر رقیق ساز  $N_2$  بر سرعت شعله، در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

### ۳-۲- تاثیر رقیق کننده های مختلف بر $NO_x$ انتشار یافته

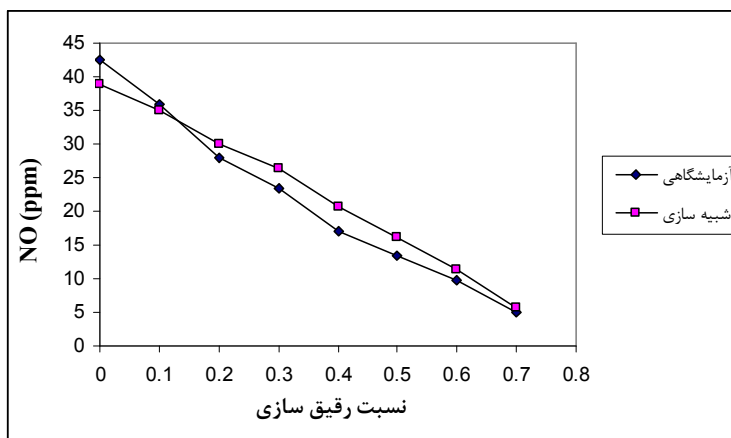
نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش نسبت رقیق سازی برای رقیق کننده های مختلف، حداکثر دمای شعله کاهش یافته و در نتیجه  $NO_x$  انتشار یافته کاهش می یابد. در میان رقیق کننده های مختلف،  $CO_2$  به علت ظرفیت حرارتی بالا باعث کاهش چشمگیر انتشار  $NO_x$  می شود. نتایج آزمایشگاهی کوپنز و همکارانش در دانشگاه بروکسل بلژیک [14,15] نشان می دهد که، با افزایش کسر مولی  $CO_2$  بعنوان رقیق کننده، حدود ۸۵٪  $NO_x$  انتشار یافته کاهش می یابد. نتایج شبیه سازی صورت گرفته تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

در شکل ۵ نتایج شبیه سازی تاثیر رقیق ساز  $CO_2$  بر حداکثر دمای شعله در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$ ، با نتایج آزمایشگاهی کوپنز [14,15] مقایسه شده است.



شکل ۵- تاثیر رقیق ساز CO<sub>2</sub> بر حداکثر دمای شعله در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  [14,15]

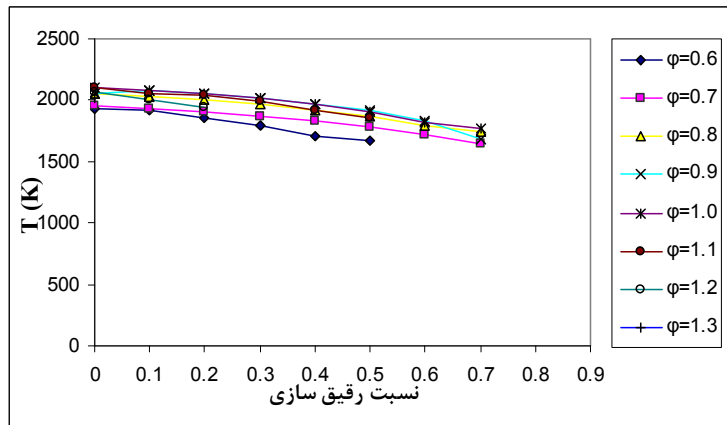
نتایج نشان می دهد که، با افزایش کسر مولی رقیق ساز CO<sub>2</sub>، حداکثر دمای شعله و بالتبع انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> کاهش می یابد، که علت این امر بالا بودن ظرفیت حرارتی CO<sub>2</sub> و توانایی آن در جذب گرمای محفظه احتراق و پایین آوردن بیشینه دمای شعله است.



شکل ۶- تاثیر رقیق ساز CO<sub>2</sub> بر تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  [14,15]

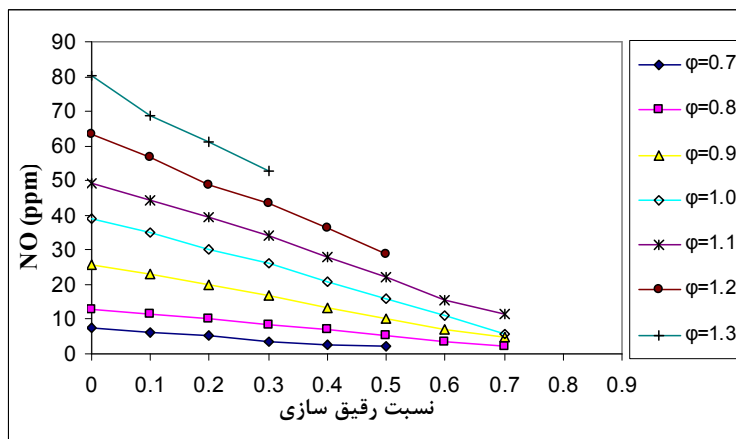
همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، با افزایش نسبت رقیق سازی، NO<sub>x</sub> انتشار یافته از کوره بطور چشمگیری کاهش می یابد، که علت آن کاهش حداکثر دمای شعله می باشد.

شکل های ۷ و ۸ نشان می دهند که، با افزایش نسبت رقیق سازی، حداکثر دمای شعله و میزان تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> روند کاهشی دارند، که علت این امر ظرفیت حرارتی بالای CO<sub>2</sub> می باشد، که در نسبت های رقیق سازی بالاتر گرمای بیشتری از محفظه احتراق جذب کرده و باعث کاهش بیشتر حداکثر دمای شعله شده و در نتیجه انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> می شود. در نسبت های رقیق سازی بالاتر از  $\beta = 0.7$ ، بعلت سنگین شدن محفظه احتراق و زیاد شدن تعداد گونه هایی که در واکنش شرکت نمی کنند، شعله خاموش می شود.



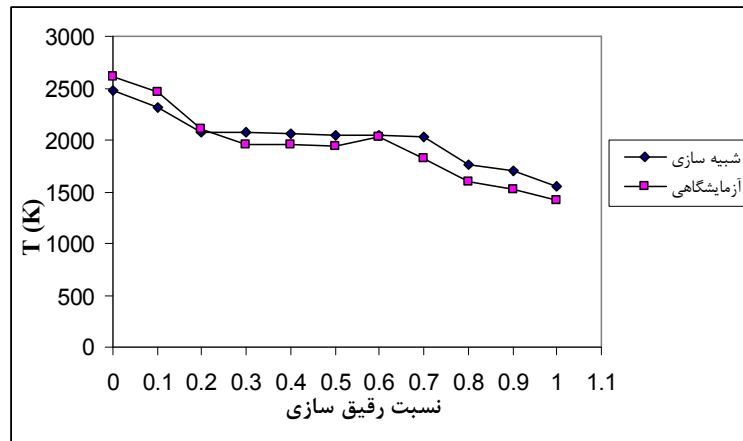
شکل ۷- تاثیر رقیق ساز CO<sub>2</sub> بر حداکثر دمای شعله، در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

علت اینکه در نسبت های رقیق سازی بالاتر از  $\beta=0.7$  شعله خاموش می شود، سنگین شدن محفظه احتراق و در واقع خفه شدن شعله می باشد.



شکل ۸- تاثیر رقیق ساز CO<sub>2</sub> بر تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

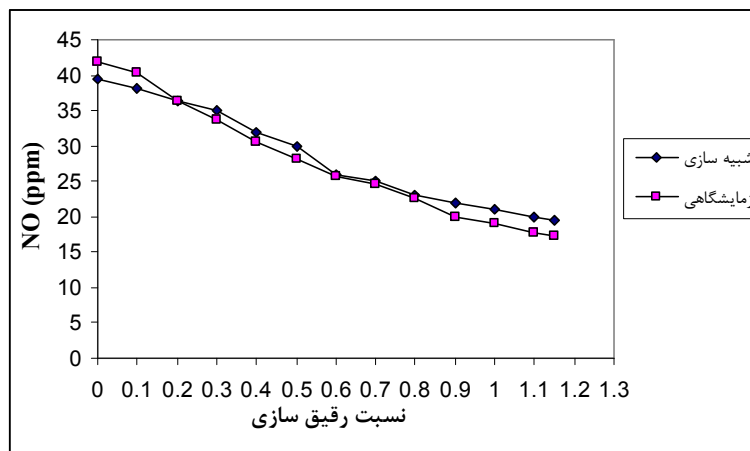
رقیق سازی با N<sub>2</sub> نیز باعث کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش میزان انتشار NO<sub>x</sub> می شود. در مورد رقیق ساز N<sub>2</sub>، چون بین اتمهای نیتروژن پیوند سه گانه برقرار است و شکستن این پیوند نیاز به انرژی زیادی دارد لذا باعث کاهش حداکثر دمای شعله و تشکیل آلاینده NO<sub>x</sub> می شود. نتایج آزمایشگاهی سالوادور و همکارانش [16] نشان می دهد که، افزودن نیتروژن به احتراق متان- هوا باعث کاهش میزان انتشار NO<sub>x</sub> می شود. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود نتایج شبیه سازی تطابق نسبتاً خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. در شکل ۹، نتایج شبیه سازی تاثیر رقیق ساز N<sub>2</sub> بر حداکثر دمای شعله با نتایج آزمایشگاهی سالوادور [16] در حالت استوکیومتری و در محدوده ای از نسبت های رقیق سازی آورده شده است.



شکل ۹- تاثیر رقیق سازی  $N_2$  بر حداکثر دمای شعله، در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  [16]

روند نزولی حداکثر دمای شعله با افزایش نسبت رقیق سازی مبین این مطلب است که، مقداری از گرمای محفظه احتراق صرف شکسته شدن پیوند بین اتم های نیتروژن شده است.

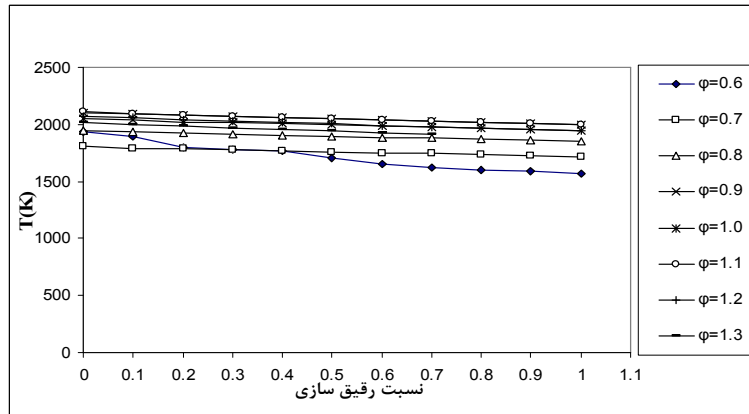
در شکل ۱۰، تاثیر افزودن رقیق سازی  $N_2$  بر انتشار آلاینده  $NO_x$  با نتایج آزمایشگاهی سالوادور [16] در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  مقایسه شده است و بر طبق پیش بینی ها، با افزایش نسبت رقیق سازی حداکثر دمای شعله روند نزولی دارد.



شکل ۱۰- تاثیر رقیق سازی  $N_2$  بر آلاینده  $NO_x$ ، در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  [16]

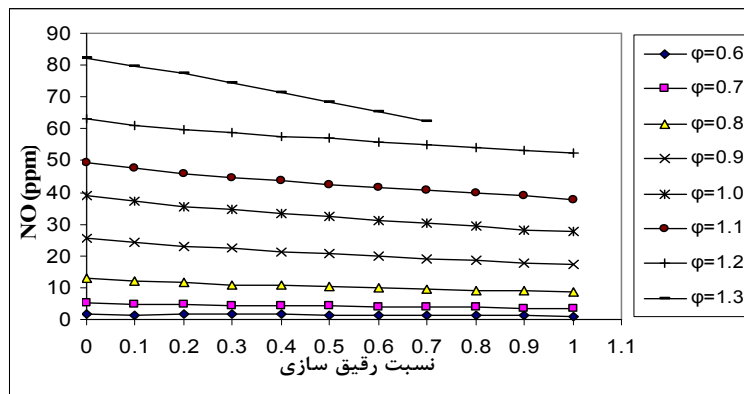
شکل ۱۰ تاثیر افزودن رقیق سازی  $N_2$  بر  $NO_x$  انتشار یافته را در احتراق متان - هوا و در نسبت هم ارزی  $\phi = 1.0$  نشان می دهد که روند کاهشی تولید  $NO_x$  به علت کاهش حداکثر دمای شعله در محفظه احتراق است.

شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان می دهند که، با افزایش نسبت رقیق سازی، حداکثر دمای شعله و میزان تشکیل آلاینده  $NO_x$  روند کاهشی دارند که علت این امر انرژی زیاد مورد نیاز برای شکستن پیوند سه گانه بین اتم های نیتروژن می باشد، که در نسبت های رقیق سازی بالاتر گرمای بیشتری از محفظه احتراق جذب کرده و باعث کاهش بیشتر حداکثر دمای شعله شده و در نتیجه میزان انتشار آلاینده  $NO_x$  می شود.



شکل ۱۱- تاثیر رقیق ساز N<sub>2</sub> بر حداکثر دمای شعله در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

شکل ۱۲ تاثیر رقیق ساز N<sub>2</sub> بر انتشار آلاینده NO<sub>x</sub>، در نسبت های مختلف هم ارزی را نشان می دهد که، شیب منفی نمودارها بیانگر کاهش انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> می باشد، که مبین روند درست شبیه سازی های صورت گرفته است.



شکل ۱۲- تاثیر رقیق ساز N<sub>2</sub> بر آلاینده NO<sub>x</sub>، در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

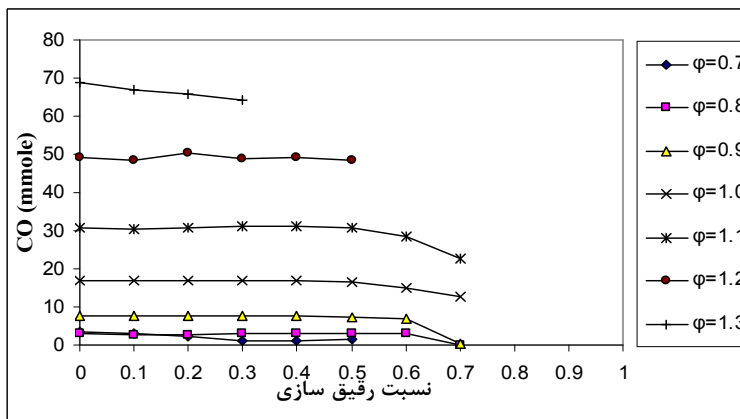
رقیق سازی با N<sub>2</sub> مطابق پیش بینی نیز، مانند رقیق سازی با CO<sub>2</sub>، منجر به کاهش NO<sub>x</sub> انتشار یافته از محفظه احتراق می شود. اگرچه رقیق سازی با CO<sub>2</sub> باعث کاهش بیشتر انتشار NO<sub>x</sub> شده و اثر بخش تر به نظر می رسد، اما محدودیت آن در خاموشی شعله و در نسبت های رقیق سازی بالا باعث می شود که، از رقیق سازهای دیگر نیز استفاده شود.

### ۳-۳- تاثیر رقیق کننده های مختلف بر میزان CO انتشار یافته

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که، با افزایش نسبت رقیق سازی برای رقیق کننده های مختلف، با کاهش حداکثر دمای شعله، میزان CO انتشار یافته نیز کاهش می یابد، که علت آن کاهش حداکثر دمای شعله و پایین آمدن نرخ تجزیه CO<sub>2</sub> می باشد.

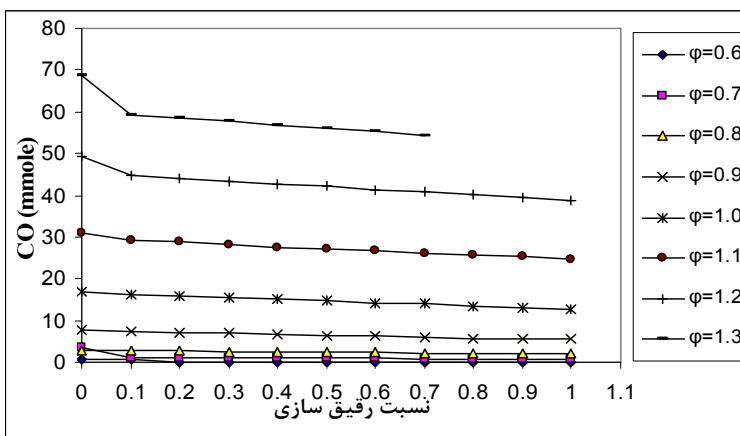
در شکل های ۱۳ و ۱۴، تاثیر رقیق سازهای CO<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> بر تشکیل آلاینده CO در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی نشان داده شده است.





شکل ۱۳- تاثیر رقیق ساز  $\text{CO}_2$  بر تشکیل CO در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

همانگونه که مشاهده می شود در یک نسبت هم ارزی مشخص، و با افزایش نسبت رقیق سازی، CO انتشار یافته از محفظه احتراق مانند  $\text{NO}_x$  تولید شده روندی کاهشی داشته، که به علت پایین آمدن بیشینه دمای شعله است، و نرخ تجزیه  $\text{CO}_2$  را کاهش می دهد.



شکل ۱۴- تاثیر رقیق ساز  $\text{N}_2$  بر تشکیل CO، در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی

در مورد رقیق ساز  $\text{N}_2$  نیز، با افزایش نسبت رقیق سازی در یک نسبت هم ارزی مشخص، کاهش آلاینده CO را خواهیم داشت. البته در نسبت های هم ارزی پایین تر، CO انتشار یافته از محفظه احتراق کمتر است، که به علت پایین تر بودن حداکثر دمای شعله و همچنین کم سوخت بودن احتراق است، چون در احتراق پرسوخت مقداری از کربن هیدروکربن به علت کمبود هوا بطور ناقص می سوزد و این خود دلیلی برای انتشار بیشتر آلاینده CO می باشد.

در جدول ۱، تاثیر رقیق سازهای مختلف بر حداکثر دمای شعله، سرعت شعله و تشکیل آلاینده های CO و NO استوکیومتریک آورده شده است.  $\beta$  کسر مولی رقیق کننده، یعنی نسبت تعداد مول های رقیق کننده به مجموع تعداد مول های رقیق کننده و هیدروکربن در معادله واکنش می باشد. در حالی که نسبت رقیق سازی برای  $\text{CO}_2$  از  $\beta = 0.7$  تجاوز کند، به علت زیاد شدن تعداد گونه هایی که در احتراق شرکت ندارند و سنگین شدن محفظه احتراق، باعث خفه شدن و درنهایت خاموشی شعله می شود.

جدول ۱- تاثیر رقیق سازهای مختلف بر حداکثر دمای شعله، سرعت شعله و تشکیل آلاینده های NO و CO در  $\phi = 1.0$

رقیق ساز $\beta$	CO <sub>2</sub>				H <sub>2</sub> O				N <sub>2</sub>			
	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)	T (K)	V (cm/s)	NO (ppm)	CO (mmole)
0	2104	40.16	38.9	16.85	2014	40.16	38.9	16.85	2104	40.16	38.9	16.85
0.1	2085	36.75	34.97	16.87	2088	38.24	35.53	15.77	2090	38.73	37.06	16.26
0.2	2054	33.14	30.1	16.88	2077	36.79	33.11	14.88	2079	37.7	35.66	15.84
0.3	2021	32.7	26.26	16.87	2066	35.5	30.91	14.16	2069	36.78	34.58	15.46
0.4	1967	25.3	20.78	16.78	2054	34.04	28.8	13.29	2059	35.83	33.44	15.02
0.5	1907	20.72	16.08	16.35	2042	32.69	26.85	12.58	2049	35.03	32.37	14.66
0.6	1818	15.12	11.28	15.13	2030	31.25	25.15	11.82	2038	34.03	31.32	14.26
0.7	1766	9.086	5.779	12.82	2019	29.92	23.76	11.29	2029	33.24	30.4	13.94
0.8	خاموشی شعله				2003	28.6	22.19	10.52	2019	32.42	29.5	13.55
0.9					1994	27.37	20.82	9.918	2008	31.32	28.34	13.07
1.0					1981	27.16	19.6	9.411	1999	30.57	27.74	12.81

#### ۴- نتیجه گیری کلی

با شبیه سازی احتراق متان - هوا با رقیق سازهای مختلف مشخص گردید که، در نسبت های مختلف رقیق سازی و با افزایش نسبت رقیق سازی، حداکثر دمای شعله و در نتیجه آلاینده NO<sub>x</sub> روند کاهشی را طی می کند. در مورد رقیق سازی با CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O بعلاظرفیت حرارتی بالا، تاثیر بیشتری بر کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> دارد. رقیق ساز N<sub>2</sub> بعلاظرفیت حرارتی پایین و انرژی اکتیواسیون بالا، نیز تاثیر مشابهی بر روند کاهشی آلاینده NO<sub>x</sub> دارد. رقیق ساز CO<sub>2</sub> در نسبت های رقیق سازی بالاتر از  $\beta = 0.7$ ، بعلاظرفیت سنگین شدن و زیاد شدن گونه هایی که در واکنش شرکت نمی کنند، باعث خفگی و درنهایت خاموشی شعله می شود. همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد که، رقیق سازی باعث کاهش آلاینده CO نیز می گردد و علت آن پایین آمدن حداکثر دمای شعله و در نتیجه آن کم شدن نرخ تجزیه CO<sub>2</sub> می باشد، که البته در نسبت های هم ارزی بالاتر محسوس تر و ملموس تر است، چون در احتراق پرسوخت به علت کمبود هوا مقداری CO نیز در اثر کامل نسوختن کربن، به هیدروکربن تبدیل می شوند. سرعت شعله نیز در نزدیک به حالت استوکیومتریکی دارای ماکزیمم مقدار است. نتایج حاصل از شبیه سازی تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد، و اختلاف جزئی بین نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی، نمایانگر درستی شبیه سازی صورت گرفته است.

#### مراجع

1. S. R. Bell, M. Gupta, Combust. Sci. Technol. 123, pp. 23-48, 2003
2. R.W. Schefer, D.M. Wicksall, A.K. Agarwal, Proc. Combust. Inst. 29, pp. 843-851, 2002
3. J. Y. Ren, W. Qin, F.N. Egolfopoulos, T.T. Tsotsis, Combust. Flame 124, pp. 717-720, 2001
4. G. J. Rortveit, K. Zepter, Skreiberg, M. Fossum, J.E. Hustad, Proc. Combust. Inst. 29, pp. 1123-1129, 2002
5. A.F. Ghoniem, A. Annaswamy, S. Park, Z.C. Sobhani, Proc. Combust. Inst. 30, pp. 1765-1773, 2005
6. I. Yamaoka, H. Tsuji, Anomalous behavior of methane-air and methane-hydrogen-air flames diluted with nitrogen in a stagnation flow, Publ by Combustion Inst, Pittsburgh, PA, USA, Sydney, Engl, pp. 145-152, 1992
7. I. Wierzbna, B.B. Ale, Rich flammability limits of fuel mixtures involving hydrogen at elevated temperatures, International Journal of Hydrogen Energy 25, pp. 75-80, 2000
8. G.S. Jackson, R. Sai, J.M. Plaia, C.M. Boggs, K.T. Kiger, Influence of H<sub>2</sub> on response of lean premixed CH<sub>4</sub> flames to high strained flows, Combustion and Flame 132, pp. 503-511, 2003



FCCI2010-1157

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

9. A.A. Konnov, I.V. Dyakov "Nitrous oxide conversion in laminar premixed flames of CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>+Ar" , Proceedings of the Combustion Institute 32, pp. 319-326, 2009
10. Z. Huang, Y. Zhang, K. Zeng, B. Liu, Q. Wang, D. Jiang, Combust. Flame 146, pp. 302-311, 2006
11. E.N. Ruddy, L.A. Carroll, Select the best VOC control strategy, Chemical Engineering Progress 89(7), pp. 28-35, 1993
12. H. . Kobayashi, H. Hagiwara, H. Kaneko, Y. Ogami, Proc. Combust. Inst. 31, pp. 1451-1458, 2007
13. <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech>
14. F.H.V. Coppens, J. De Ruyack, A.A. Konnov, "Effects of CO<sub>2</sub> addition on burning velocity and NO formation in methane+air flames", Contents lists available at Science Direct, Fuel 87, 2008
15. F.H.V. Coppens, J. De Ruyack, A.A. Konnov, Combust. Flame 149, pp. 409-417, 2007
16. S. Salvador, Y. Kara, J. M. Commandre, "Reduction of NO emissions from a VOC recuperative incinerator by dilution of fuel supply", Applied Thermal Engineering 24, pp. 245-254, 2004
17. Frederic H.V. Coppens, Alexander A. Konnov, "The effect of enrichment by H<sub>2</sub> on propagation speeds in adiabatic flat and cellular premixed flames of CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>", Fuel 87, pp. 2866-2870, 2008
18. D.A. Knyazkov, A.G. Shmakov, I.V. Dyakov, O.P. Korobeinichev, J. De Ruyck, A.A. Konnov, "Formation and destruction of nitric oxide in methane flames doped with NO at atmospheric pressure", Proceedings of the Combustion Institute 32, pp. 327-334, 2009.