

بررسی تشکیل آلاینده‌های NO_x در مدل دو بعدی شعله‌ی پیش مخلوط جزئی جریان مخالف

سیامک حسین پور^۱، سیدجعفر پارچینی^۲
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند
(* نویسنده مخاطب: Hossainpour@sut.ac.ir)

چکیده

در این مقاله نتایج مطالعه‌ی عددی تشکیل آلاینده‌ی NO در یک شعله‌ی پیش مخلوط جزئی جریان مخالف در محدوده‌ی نرخ کرنش پایین (کمتر از $20s^{-1}$) ارائه می‌گردد. ساختار شعله با استفاده از مکانیزم GRIMech2.11 محاسبه شده و مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی قبلی انجام شده نشان می‌دهد. با افزایش نسبت پیش مخلوطی جزئی غلظت حداکثر NO ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. همچنین با بیشتر شدن مقدار اکسیژن در سمت سوخت پروپیل اکسید نیتریک پهن تر می‌شود. با افزایش پیش مخلوطی جزئی سهم مکانیزم حرارتی تشکیل NO نسبت به اکسید نیتریک کل افزایش می‌یابد، و در نسبت هم‌ارزی تقریباً ۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد. نسبت NO تولید شده به متان مصرف شده با افزایش درصد پیش مخلوط شدن جزئی سوخت در شعله‌ی پیش مخلوط جزئی جریان مخالف برای محدوده‌ی نرخ کرنش پایین ابتدا افزایش یافته و در نسبت هم‌ارزی تقریباً ۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شعله‌ی پیش مخلوط جزئی، تشکیل آلاینده NO، شعله‌ی جریان مخالف، تشکیل اکسید نیتریک

۱- مقدمه

احتراق یکی از قدیمی‌ترین تکنولوژی‌های بشر است که برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. به علت بحران سوخت، افزایش تقاضا و رو به اتمام بودن منابع سوخت‌های فسیلی از یک سو و ایجاد آلاینده‌های خطرناکی از قبیل اکسیدهای نیتروژن و گوگرد (SO_x & NO_x)، مونو اکسید کربن و دی اکسید کربن از سوی دیگر، نیاز به بهبود عملکرد سیستم‌های احتراقی موجود و همچنین کاهش تولید این آلاینده‌ها احساس می‌شود، که مستلزم طراحی و ساخت سیستم‌های احتراقی با بازدهی بالاتر از سیستم‌های موجود خواهد بود. علیرغم وجود انرژی‌های تجدید پذیر از قبیل هسته‌ای، خورشیدی، بادی، هیدروالکتریک، زمین گرمایی و انرژی حرارتی اقیانوس^۳، طبق آمار تقریباً بیش از ۸۵ درصد انرژی دنیا از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود [1]. راحتی، دارا بودن چگالی بالای انرژی و اقتصادی‌تر بودن آن در مقایسه با سایر منابع انرژی، موجب استقبال از این منابع انرژی شده است. قوانین سختگیرانه‌تری که امروزه برای کاهش اکسیدهای نیتروژن و آلاینده‌های دیگر وضع می‌شود و نیز کوچکتر کردن سیستم‌های احتراق و کاهش هزینه‌های آنها، موجب گردیده که تحقیقات در زمینه کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق در مشعل‌ها و افزایش کارایی آنها صورت گیرد. در این راستا یکی از موضوعات نسبتاً جدیدی که در دهه‌های اخیر مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است، استفاده از تکنیک احتراق پیش مخلوط

^۱-دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند

^۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند

^۳Ocean Thermal Energy (OTE)

جزئی (Partially premixed Combustion) در سیستم‌های احتراقی می‌باشد، که نتایج قابل قبولی نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی ارائه داده است.

احتراق پیش مخلوط جزئیکی از روش‌هایی است که منجر به کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن می‌شود. شعله‌های پیش مخلوط جزئی^۱ هنگامی حاصل می‌شوند که هوایی کمتر از مقدار استوکیومتری به ناحیه‌ی واکنش وارد شود، و در عین حال اکسیدکننده‌یاضافی در ناحیه واکنش موجود باشد تا فرآیند احتراق تکمیل شود. در حقیقت یک جریان غنی از مخلوط سوخت و هوا با یک جریان رقیق (یا فقط هوا) در محفظه‌ی احتراق وارد واکنش می‌شود. این تکنیک آلاینده‌های موجود در محصولات احتراق را کاهش می‌دهد. علت کاهش اکسیدهای نیتروژن در شعله‌های پیش مخلوط جزئی، کاهش دمای شعله و کاهش غلظت اکسیژن می‌باشد.

شعله‌های پیش مخلوط جزئی در عمل بطور وسیعی بصورت طراحی شده یا سهواً اتفاق می‌افتد که بدلائل مختلفی مانند اختلاط ضعیف، تبخیر در پاشش [2]، پرتاب شعله [3] و خاموشی موضعی و متعاقباً روشن شدن [4] آن صورت می‌پذیرد. بدلیل استفاده گسترده از این نوع شعله‌ها در موقعیت‌های مختلف عملی مانند مشعل‌های بنسون، شعله‌های لوازم خانگی، شعله‌های بلند شده در کوره‌ها، و شعله‌های توربین گازی و موتورهای احتراق داخلی، شعله‌های پیش مخلوط جزئی در حوزه احتراق اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [5-16].

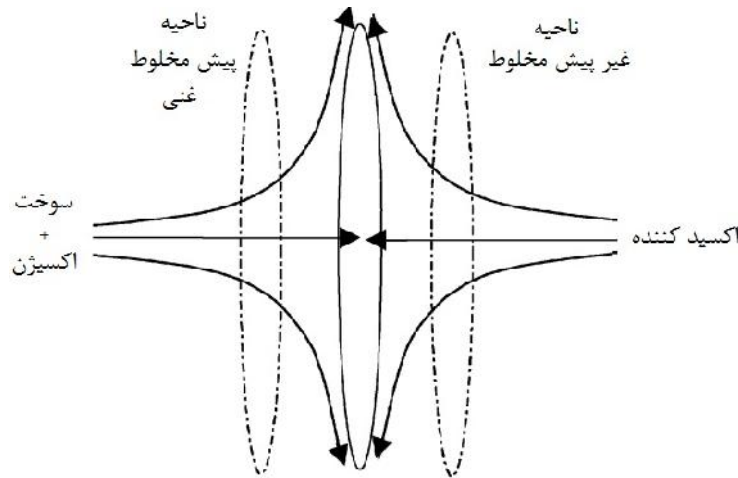
اغلب این مطالعات به ساختار این شعله‌ها و انتشار آلاینده‌ها پرداخته‌اند. برخی نیز به تاثیر پارامترهای گوناگون بر روی خصوصیات این شعله‌ها توجه داشته‌اند.

بدلیل نحوه‌ی تشکیل شعله‌های پیش مخلوط جزئی که در آن دو جریان پیش مخلوط غنی (Rich premixed) و غیرپیش-مخلوط (Non-premixed) باهم ترکیب می‌شوند، چندین ناحیه‌ی واکنش بوجود می‌آید. در حالتی که دو جریان مذکور مخالف جهت همدیگر باشند دونااحیه‌ی واکنش بوجود می‌آید. یکی ناحیه‌ی واکنش پیش مخلوط غنی و دیگری ناحیه‌ی واکنش غیر پیش مخلوط. در چنین رژیم‌ی، شعله‌ها وابسته به یکدیگر هستند بطوریکه ناحیه‌ی پیش مخلوط غنی وابسته به گرمای ناحیه‌ی غیر پیش مخلوط است، در حالی که ناحیه‌ی پیش مخلوط اکسید کربن و هیدروژن را بعنوان سوخت به ناحیه‌ی غیر پیش-مخلوط عرضه می‌کند. مطالعات مختلفی تشکیل اکسید نیتریک در شعله‌های متان-هوا^۱ پیش مخلوط جزئی جریان مخالف را در محدوده‌ی کلی نرخ کرنش (Strain rate) از 5 تا 200 s^{-1} بررسی کرده‌اند. در نرخ کرنش‌های پایین (۵ تا 20 s^{-1}) شاخص انتشار اکسید نیتریک (نسبت اکسید نیتریک تشکیل شده به متان مصرف شده) ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در نسبت هم‌ارزی $W \cdot 2$ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. مطالعات نشان داده است که در نرخ کرنش‌های بالاتر، یک درجه‌ی خاصی از پیش مخلوط کردن جزئی وجود دارد که در آن کمترین میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن با ثابت بودن دبی جرمی سوخت و نسبت هم‌ارزی کلی (Equivalence ratio) اتفاق می‌افتد [10]. لازم به ذکر است که نسبت هم‌ارزی کلی با در نظر گرفتن دبی جرمی سوخت و هوای کلی که در هر دو جریان وجود دارد حاصل می‌شود، ولی وقتی نسبت هم‌ارزی گفته می‌شود منظور نسبت هم‌ارزی جریان پیش مخلوط می‌باشد که با w نشان داده می‌شود. طبق نتایج گزارش شده توسط کیم و همکاران [11] برای شعله‌ی پیش مخلوط جزئی متان/هوا، ($w = 2.2$) نسبت هم‌ارزی بهینه برای کمترین میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. با تغییر این عدد میزان تولید اکسید نیتریک از مکانیسم‌های انگیخته و حرارتی (Prompt & thermal mechanisms) تغییر می‌یابد که در نهایت باعث می‌شود مجموع تولید اکسید نیتریک در این حالات بیشتر شود. در درجات بیشتر پیش مخلوط کردن ($w < 2.2$) ناحیه پیش مخلوط غنی بعنوان تولید کننده اصلی اکسید نیتریک از طریق مکانیزم انگیخته بشمار می‌رود، در صورتی که در درجات کمتر پیش مخلوط کردن ($w > 2.2$) اغلب NO در ناحیه واکنش غیر پیش مخلوط تشکیل می‌شود که مکانیزم حرارتی در آن نقش عمده‌ای دارد.

¹Partially premixed flames (PPF)

۲- محاسبات

هدف از محاسبات انجام شده در کار حاضر، بررسی این موضوع است که شاخص تولید اکسید نیتریک در چه شرایطی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به همین منظور شعله‌ی جریان مخالف در محدوده‌ی نرخ کرنش پایین (۱۰ تا $10^5 s^{-1}$) را بصورت دو بعدی با کد تجاری فلونت شبیه سازی کرده‌ایم. محاسبات مربوط به ساختار شعله با استفاده از مکانیزم GRIMech 2.11 انجام گرفته است [17].



شکل ۱: الگوی شعله پیش‌مخلوط جزئی‌جریان مخالف

شعله‌ی پایای متقارن (Steady Axisymmetric) که جت‌های سوخت و اکسید کننده با فاصله‌ی ۳cm از هم قرار دارند و در سمت سوخت با اضافه کردن اکسیژن همراه خواهد بود. محل نواحی واکنش پیش‌مخلوط غنی و غیر پیش‌مخلوط با توجه به استوکیومتری، نرخ کرنش و خواص انتقال گازهای شرکت کننده در واکنش بستگی خواهد داشت. نتایج ارائه شده در شعاع ۲۰ سانتی‌متری محور تقارن متوسط‌گیری شده و دسته‌بندی می‌شوند. جهت اعتبار سنجی، بخشی از نتایج کار حاضر با نتایج بدست آمده از کار عددی و آزمایشگاهی مونگکار و آتربا [18] مقایسه شده است. در مطالعه‌ی یاد شده بخش عددی بصورت یک مدل‌سازی یک بعدی انجام شده است.

مدل آشفستگی انتخابی برای این مسئله $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشد. این مدل بر پایه‌ی شبیه‌سازی معادلات انتقال برای انرژی سینتیکی آشفستگی (k) (Turbulence kinetic energy) و نرخ اتلاف آن (ϵ) پایه ریزی شده است. انرژی سینتیکی آشفستگی k و نرخ اتلاف ϵ آن از معادلات انتقال زیر بدست آمده‌اند:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

و

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \epsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

تشکیل NO حرارتی یک فرآیند کند ولی حساس به دمای زیاد است، از اینروست که شدیداً تحت تاثیر میدان جریان است. وارد کردن شیمی دقیق در محاسبات عددی مکانیک سیالات، نیازمند زمان محاسبه زیادی است. در اینجا پتانسیل

تئوری فلیملت (Flamelet) برای مدلسازی شعله‌های موجود با هدف خاص پیش بینی تشکیل NO در زمان کمتر را بررسی می‌کنیم.

در این تئوری واکنش‌ها بی‌نهایت سریع فرض می‌شوند، مانند اینکه ناحیه‌ی واکنش یک سطح مشترک بی‌نهایت نازک است. با فرض ضریب پخش برابر و احتراق با فشار ثابت و بدون افت حرارتی، خواص ترموشیمیایی با استفاده از حالت اختلاط محلی، کاملاً تعیین می‌شوند که توسط کسر مخلوط (Mixture fraction) توصیف می‌شود. نگرش فلیملت فرض شیمی بی-نهایت سریع را آسان‌تر می‌کند، به این صورت که با تعریف نرخ اتلاف اسکالر (Scalar dissipation rate) بعنوان یک پارامتر، میزان انحراف از حالت تعادلی را توصیف می‌کند. با این وجود نگرش فلیملت به این فرض متکی است که مقیاس زمانی برای سینتیک شیمیایی خیلی کوچکتر از مقیاس زمانی برای جابجایی و پخش است. تحت این شرایط که مقیاس‌های زمانی به طور گسترده از هم جدا شده‌اند، شیمی احتراق به یک حالت شبه تعادلی رسیده و بلافاصله با شرایط محلی جریان تنظیم می‌شود. با تبدیل و کاهش مختصات فیزیکی به تعداد یک بُعد همراه با کسر مخلوط و فرض شعله‌ی نازک، پیترز [19] نشان داده است که در حالت پایدار، دما و گونه‌ها با ایجاد تعادل مابین واکنش شیمیایی و پخش هر نسبت هم‌ارزی تعیین می‌شوند، بصورتی که

$$\frac{\chi d^2 T}{2 df^2} = \frac{1}{C_p} \sum_{k=1}^N \omega_k h_k \quad (3)$$

و

$$\frac{1}{Le_k} \frac{\chi d^2 Y_k}{2 df^2} = -\omega_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

برای چند رشته از نرخ‌های اتلاف اسکالر بصورت عددی حل می‌شوند. نتایج بدست آمده برای تولید یک کتابخانه‌ی فلیملت بکار می‌رود که در آن خواص ترموشیمیایی بعنوان توابعی از کسر مخلوط و نرخ اتلاف اسکالر بیان می‌شوند. با داشتن توزیع کسر مخلوط و نرخ اتلاف اسکالر می‌توان چگالی، دما و غلظت گونه‌ها را از کتابخانه‌ی فلیملت، توسط یک میانبایی خطی تعیین کرد.

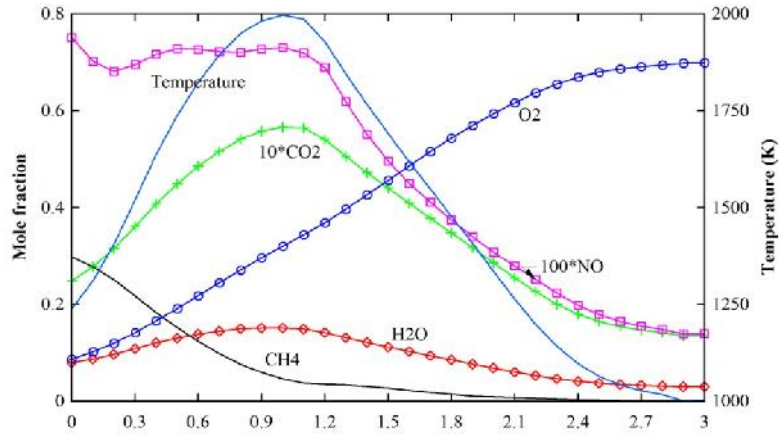
شرایط مرزی مسئله در جدول ۱ شرح داده شده است. در شعله‌ی A^* که سوخت و اکسیدکننده از دو جهت مخالف وارد محفظه‌ی احتراق می‌شوند رژیم شعله بصورت نفوذی (Diffusion) می‌باشد. در شعله‌های A تا D مقداری اکسیژن برای پیش-مخلوط کردن جزئی سمت سوخت اضافه شده است. همچنین از گاز هلیوم برای تعادل نیروی شناوری در سمت اکسیدکننده استفاده شده است که در مسیر واکنش‌ها نیز بی‌تاثیر است.

جدول ۱: شرایط مرزی شعله

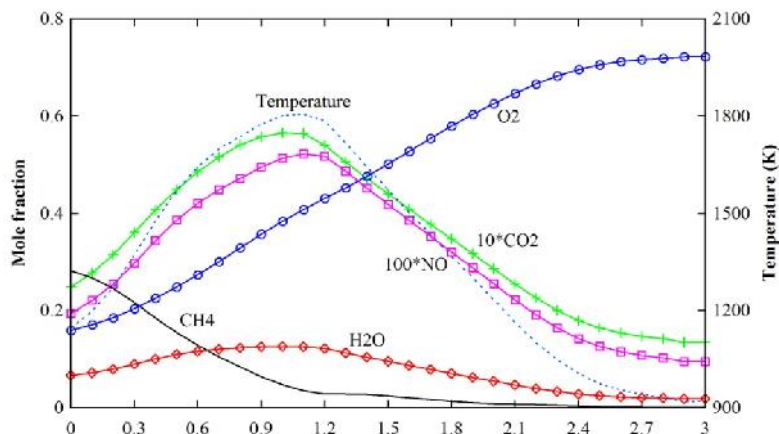
شعله	جت اکسیدکننده	جت سوخت
A^*	23.9%He+76.1%O ₂ T=717K, v=22.3cm/s	50.7%CH ₄ +49.3%N ₂ T=531K, V=10.68 cm/s
پیش‌مخلوط کردن جزئی در سمت جت سوخت		
A	23.9%He+76.1%O ₂ T=741K, v=23.1cm/s	46.1%CH ₄ +9%O ₂ +44.9%N ₂ T=547K, V=12.1 cm/s
B	23.9%He+76.1%O ₂ T=770K, v=23.9cm/s	43.3%CH ₄ +14.5%O ₂ + 42.2%N ₂ T=557K, V=13.1 cm/s
C	23.9%He+76.1%O ₂ T=812K, v=25.3cm/s	41.4%CH ₄ +18.2%O ₂ + 40.4%N ₂ T=578K, V=14.2 cm/s
D	23.9%He+76.1%O ₂ T=935K, v=29.1cm/s	39.1%CH ₄ +22.8%O ₂ + 38.1%N ₂ T=614K, V=15.9 cm/s

۳- ساختار شعله‌ها

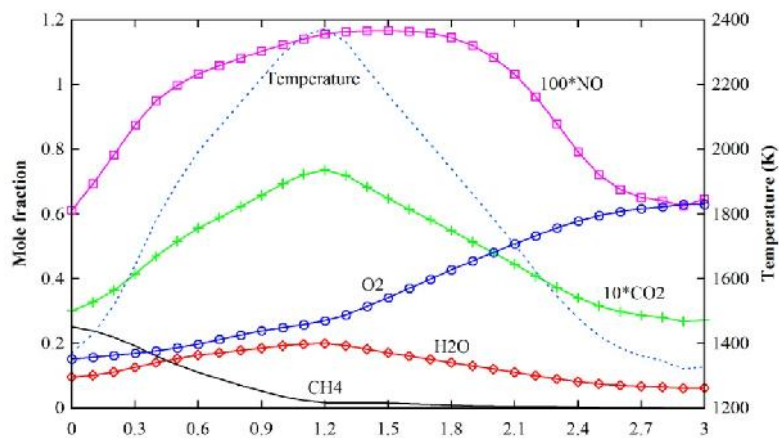
کسر مولی اجزاء مهم و پروفیل دمای شعله‌های بررسی شده در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۲: دما و ساختار شعله‌ی A° (غیر پیش مخلوط)

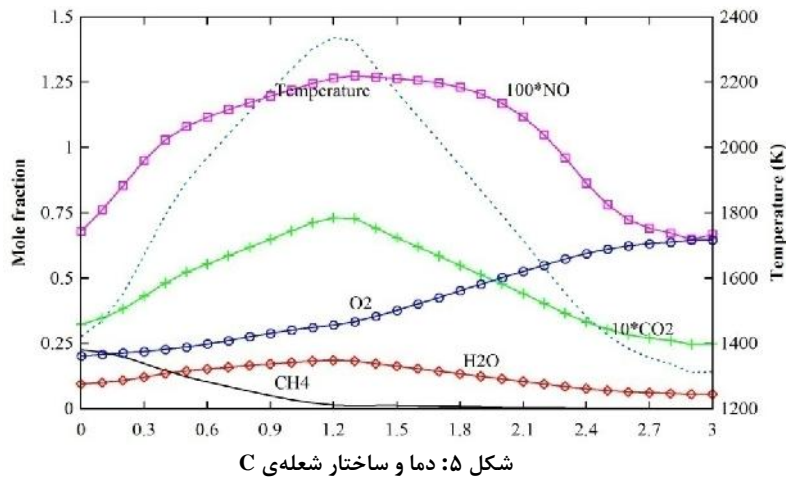


شکل ۳: دما و ساختار شعله‌ی A

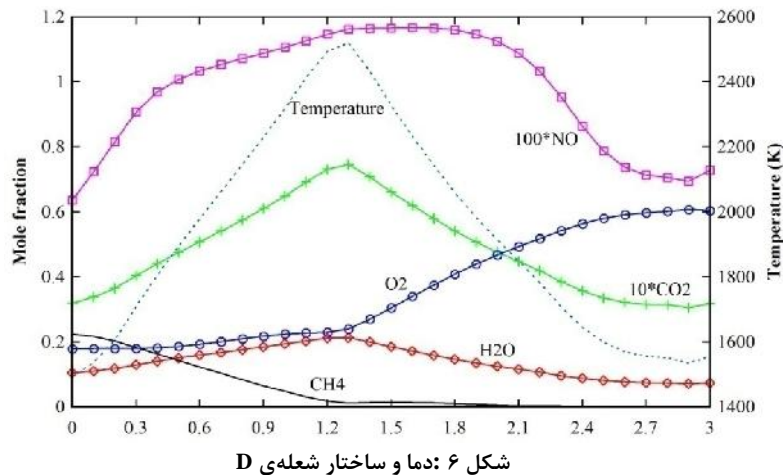


شکل ۴: دما و ساختار شعله‌ی B

با افزایش پیش مخلوطی جزئی مشاهده می شود که پروفیل دما گسترده تر شده و جدایی دو ناحیه ی واکنش پیش مخلوط جزئی و غیر پیش مخلوط از هم بیشتر می شود. با افزایش درصد اکسیژن اضافه شده در جت سوخت که منجر به افزایش پیش-مخلوطی جزئی می شود، کسر مولی اکسید نیتریک پهن تر شده و نقطه ی اوج آن در شعله ی C به حداکثر مقدار خود می رسد و سپس در شعله ی D دوباره کاهش می یابد.

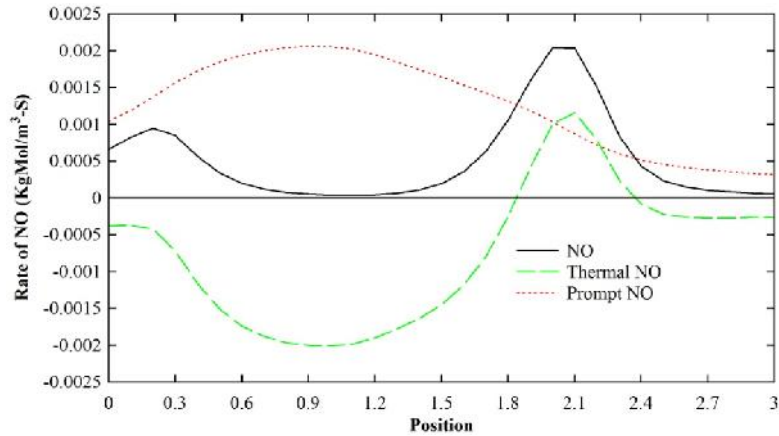


علت این امر را می توان به پروفیل دما نسبت داد. دمای حداکثر شعله از 1805K در شعله ی A به 2520K در شعله ی D می رسد. همچنین کاهش نسبی اوج اکسید نیتریک در شعله ی D نسبت به شعله ی C را می توان در کاهش پهنای پروفیل دمای شعله ی D جستجو کرد.



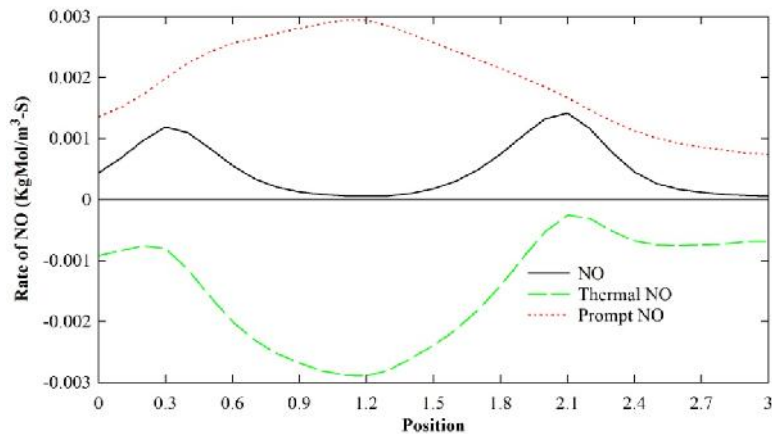
۴- مسیرهای تولید اکسید نیتریک

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مسیرهای تولید NO برای هر شعله نشان داده شده است. در این شکل‌ها نرخ تولید NO کلی، NO حرارتی (مکانیزم زلدویچ Zeldovich mechanism) و NO انگیزته برحسب $\text{KgMol/m}^3\text{-s}$ کشیده شده است.

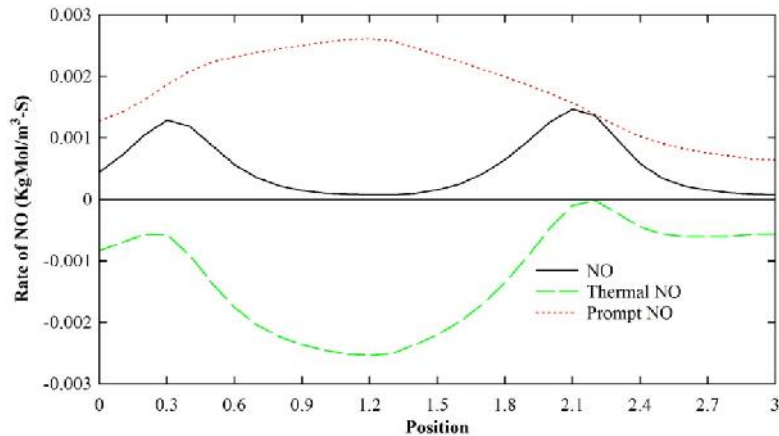


شکل ۷: نرخ تولید NO حرارتی، انگیزته و کل در شعله‌ی A*

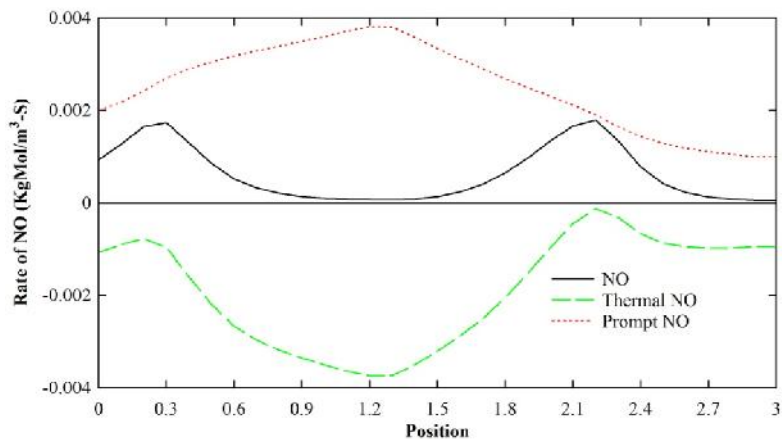
همانطور که از شکل‌ها نمایان است NO انگیزته و NO حرارتی نرخ تولید اکسید نیتریک را نشان می‌دهند و NO کلی مجموع این نرخ‌ها می‌باشد. ناحیه‌ی واکنش پیش مخلوط در سمت نازل سوخت و ناحیه‌ی واکنش غیر پیش مخلوط در سمت اکسیدکننده قابل مشاهده است.



شکل ۸: نرخ تولید NO حرارتی، انگیزته و کل در شعله‌ی B



شکل ۹: نرخ تولید NO حرارتی، انگیخته و کل در شعله‌ی C



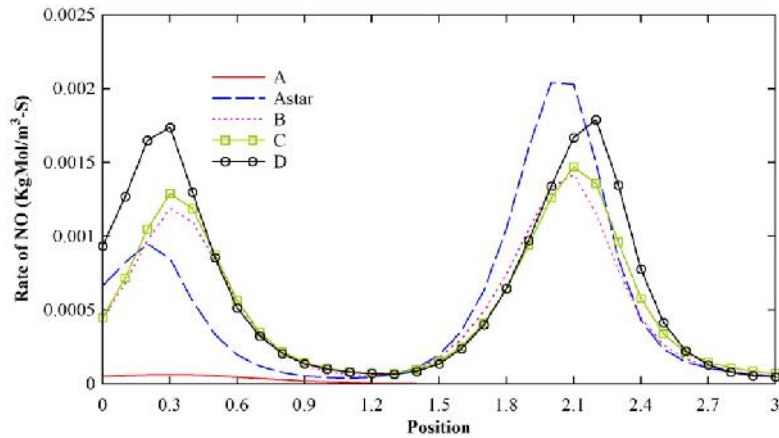
شکل ۱۰: نرخ تولید NO حرارتی، انگیخته و کل در شعله‌ی D

۵- واکنش‌های اکسید نیتریک حرارتی

این روابط که به مکانیزم زلدویچ معروف است دارای سه واکنش است:

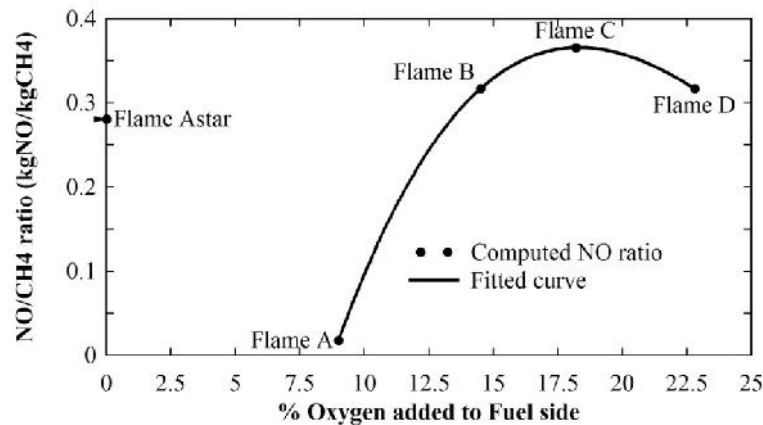


معمولاً در دماهای بالاتر از 1600K پیوندهای اتمی نیتروژن و اکسیژن موجود در هوای احتراقی گسسته شده و مولکول‌های جدید را تشکیل می‌دهند. دلیل انتخاب نام حرارتی برای این روش این است که واکنش شماره ۱ به علت پیوند سه گانه قوی که در مولکول N_2 وجود دارد، از انرژی فعال سازی بسیار بالایی برخوردار است. بنابراین این واکنش فقط در دماهای بالا صورت می‌گیرد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش دمای شعله نرخ تولید اکسید نیتریک هم افزایش می‌یابد. بنابراین در اثر افزایش دما میزان NO حرارتی در این نواحی دارای نقطه‌ی پیک شده و متعاقباً NO کل نیز در این نقاط افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نرخ خالص تولید اکسید نیتریک را در تمامی شعله‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نرخ تولید NO در شعله‌ها

با افزایش پیش مخلوطی جزئی نرخ تولید NO هم افزایش می‌یابد. ولی باید این نکته را هم در نظر داشت که طبق شرایط مرزی که در جدول ۱ آورده شده است، با افزایش پیش مخلوطی، سرعت ورود جریان‌ها به محفظه‌ی احتراق نیز افزایش می‌یابد که باعث می‌شود دبی سوخت و اکسیدکننده‌ی مصرفی نیز افزایش پیدا کند. بنابراین برای مقایسه‌ی بهتر تولید NO در هر شعله، میزان اکسید نیتریک تولیدی را برحسب دبی جرمی سوخت مصرف شده بیان می‌کنیم. به همین منظور از نسبت NO به CH_4 استفاده کرده و در شکل ۱۲ به بررسی آن می‌پردازیم. لازم به ذکر است که برای شعله‌ی A* هیچ اکسیژنی در سمت سوخت اضافه نشده است و برای پیش مخلوط کردن جزئی سایر شعله‌ها به ترتیب ۹، ۱۴.۵، ۱۸.۲ و ۲۲.۸ درصد از کسر مولی سوخت را به اکسیژن اختصاص داده‌ایم.



شکل ۱۲: نسبت NO تولیدی به CH_4 مصرف شده

برای نمایش بهتر نتایج منحنی درجه سومی را رسم کردیم که از چهار نقطه‌ی A، B، C و D عبور می‌کند. با افزایش پیش مخلوطی جزئی تولید NO ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. حداکثر تولید NO در نسبت هم‌ارزی $2.2 \cdot W$ اتفاق می‌افتد که تطابق خوبی با کار قبلی موگنکار و آتريا نشان می‌دهد. کارهای قبلی [16,19,20] در محدوده نرخ کرنش پایین نشان می‌دهد که برای شعله‌ی متان/هوا نسبت NO به متان در نسبت هم‌ارزی تقریباً ۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۶- نتیجه گیری

نتایج زیر برای مطالعه‌ی حاضر که به بررسی تاثیر اضافه کردن افزایشی اکسیژن بر روی انتشار آلاینده‌ی NO در یک شعله‌ی پیش‌مخلوط جزئی مخالف پرداخته است، بدست آمده است.

- ۱- غلظت حداکثر NO با افزایش پیش‌مخلوط کردن جزئی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. همچنین با بیشتر شدن افزودن اکسیژن در سمت سوخت پروفیل اکسید نیتریک پهن تر می‌شود که آنهم در اثر افزایش دما می‌باشد.
- ۲- با افزایش پیش‌مخلوطی جزئی سهم مکانیزم حرارتی تشکیل NO نسبت به اکسید نیتریک کل افزایش می‌یابد، و در نسبت هم-ارزی تقریباً ۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد.

نسبت NO تولید شده به متان مصرف شده با افزایش پیش‌مخلوط کردن جزئی سوخت در شعله‌ی پیش‌مخلوط جزئی جریان مخالف برای محدوده‌ی نرخ کرنش پایین (کمتر از $20s^{-1}$) ابتدا افزایش می‌یابد و در نسبت هم‌ارزی تقریباً ۲ به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, Combustion, Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, p. 1.
- [2] F. F. Flynn, R. P. Durrett, G. L. Hunter, et al, 1999. "Diesel combustion: An Integrated View Combining Laser Diagnostics, Chemical Kinetics, And Empirical Validation". SAE, Paper 99-01-0509.
- [3] B. J. Lee, S. H. Chung, Combustion And Flame, 109 (1997) 163.
- [4] L. Vervisch, Proceedings Of The Combustion Institute, Vol 28, The Combustion Institute, Pittsburgh, 2000, P. 11.
- [5] I. Yamaoka, H. Tsuji, Proc. Combust. Inst. 16 (1976) 1145.
- [6] I. Yamaoka, H. Tsuji, Proc. Combust. Inst. 17 (1978) 843.
- [7] J. F. Driscoll, R. H. Chen, Y. Yoon, Combust. Flame 88 (1992) 37.
- [8] S. R. Turns, F. H. Myhr, R. V. Bandaru, E. R. Maund, Combust. Flame 93 (1993) 255.
- [9] N. A. Rokke, J. A. Hustad, O. K. Sonju, Combust. Flame 97 (1994) 88.
- [10] H. Xue, S. K. Aggarwal, Combustion and Flame 132 (2003) 723-741.
- [11] T. K. Kim, B. J. Alder, N. M. Laurendeau, J. P. Gore, Combust. Sci. Technol. 110 (1995) 361.
- [12] V. Dupont, A. Williams, Combust. Flame 114 (1998) 103.
- [13] K. H. Lyle, L. K. Tseng, J. P. Gore, N. M. Laurendeau, Combust. Flame 116 (1999) 627.
- [14] T. W. Lee, A. Mitrovic, T. Wang, Combust. Flame 121 (1999) 379.
- [15] J. P. Gore, N. J. Zhan, Combust. Flame 105 (1996) 414.
- [16] M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa, T. Takeno, Combust. Flame 98 (1994) 127.
- [17] http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- [18] H. Mungekar, A. Atreya, Combustion and Flame 148 (2007) 148-157.
- [19] Peters, N., prog. Energy Combust. Sci. 10: 319-339 (1984)
- [20] L. G. Blevins, J. P. Gore, Combust. Flame 116 (1999) 546.
- [21] X. L. Zhu, T. Takeno, J. P. Gore, A study of effects of radiation on methane-air counter-flow partially premixed flames by using detailed chemical kinetics, Joint US States Meeting of the Combustion Institute, Washington, DC, 1999.