

مطالعه عددی اثر عملگر پلاسمایی بر احتراق در شرایط فوق رقیق و پیش گرم

امیر مردانی

استادیار دانشگاه صنعتی شریف
amardani@sharif.edu

اندیشه خانه زر

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف
andisheh_khanehzar@ae.sharif.ir

چکیده

از طرف دیگر، پلاسما، نوع چهارم ماده، باتوجه به توانایی اش در تولید گونه‌های فعال و گرما و بهبود پروسه‌های انتقالی، فرصتی بی‌نظیر برای کنترل احتراق و آلاینده‌ها ایجاد می‌کند. کاربرد میدان الکتریکی روی شعله از اوایل قرن نوزدهم مورد مطالعه قرار گرفته است. زمانی که میدان الکتریکی به اندازه کافی بزرگ باشد، باعث یونیزاسیون سوخت و یا مخلوط می‌شود و مجموعه‌ای از مولکول‌های خنثی، یون‌ها و اتم‌های برانگیخته را به وجود می‌آورد [۵]. در دو دهه گذشته، پلاسما به عنوان یک روش نویددهنده برای بهبود احتراق، کاهش انتشار گازها و بهبود اکسیداسیون سوخت در دمای پایین معرفی شده است [۶]. در طول چند سال اخیر نیز امکان بهبود احتراق و جرقه به کمک گونه‌های فعال و برانگیخته به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. چراکه مولکول‌های برانگیخته، واکنش‌پذیرتر از مولکول‌ها و اتم‌های معمولی هستند [۷]. پلاسما یک راه کار جدید جهت کنترل جرقه و پایداری شعله‌های فوق رقیق و بهبود اختلاط سوخت/هوا فراهم می‌کند [۶، ۸، ۹].

پلاسما با تولید گرما، الکترون‌ها، گونه‌های میانی، رادیکال‌ها، یون‌ها، مولکول‌های برانگیخته، مولکول‌های سوخت کوچکتر، باد یونی و نیروی کولمب و لورنتس، عمدتاً از طریق چهار مسیر متفاوت می‌تواند روی احتراق اثر بگذارد. (۱) اثر دمایی از طریق افزایش دما در جهت افزایش نرخ واکنش‌ها [۱۱] اثر کینتیک از طریق تولید گونه‌های برانگیخته به صورت الکترونیکی و ارتعاشی و تولید گونه‌های فعال (۳) اثر انتقال نفوذی^۵ از طریق تجزیه مولکول‌های سوخت و اکسیداسیون دما پایین (۴) اثر انتقال جابه جایی^۶ که با تولید باد یونی و تولید ناپایداری هیدرودینامیکی توسط پلاسما و همچنین با حرکت جریان توسط نیروهای کولمب و لورنتس همراه است [۹، ۱۰]. در حالت کلی می‌توان پلاسما را به دو نوع مختلف تقسیم‌بندی کرد. (۱) پلاسما تعادلی (۲) پلاسما غیر تعادلی. در پلاسما تعادلی دمای الکترون‌ها و مولکول‌ها به تعادل حرارتی با یکدیگر رسیده‌اند و چگالی الکترون‌ها و دمای گاز خیلی زیاد است. از طرف دیگر، در پلاسما غیر تعادلی دمای الکترون‌ها خیلی زیاد بوده ولی دمای سایر ذرات کم است و در کل دمای گاز و چگالی تعداد الکترون‌ها نسبتاً کم می‌باشد [۷]. در طول ۱۰-۱۵ سال گذشته، پیشرفت قابل توجهی در استفاده از پلاسما غیر تعادلی برای تقویت پدیده احتراق، از جمله کاهش زمان تاخیر اشتعال و دمای احتراق، افزایش پایداری شعله و همچنین گسترش محدوده اشتعال‌پذیری، مشاهده شده است [۱۲]. تاکنون اثر پلاسما در احتراق‌های دما بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که در احتراق‌های دما پایین کمتر مطالعه شده است. در این مقاله مسیرهای مختلفی که پلاسما غیر تعادلی می‌تواند روی احتراق تحت شرایط مایلد اثر بگذارد، به صورت عددی مدلسازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

در این مقاله به مطالعه عددی اثر تزریق پلاسما به محیط احتراق مایلد که بر پایه رقیق‌سازی شدید اکسیژن و افزایش زیاد دمای جریان اکسند استوار است، پرداخته شده است. در این راستا، یک مشعل ساخته شده از سه مجرای هم محور شامل جت سوخت مرکزی، جریان عبوری از راکتور پلاسما استوانه‌ای شکل و جریان هوای پیش گرم رقیق شده از اکسیژن، مبنای مدلسازی قرار گرفته است. پلاسما به کار گرفته شده از نوع غیر تعادلی بوده و از طریق تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک (DBD) به جریان گاز اعمال شده است. در این مدلسازی مشعل به صورت دوبعدی متقارن محوری در نظر گرفته شده است و معادلات RANS و مدل توربولانسی $k - \epsilon$ و همچنین مکانیزم شیمیایی کامل GRI 3.0 مبنای این مدلسازی قرار گرفته‌اند. مطالعات انجام شده نشان داد که اعمال مسیرهای اصلی اثر پلاسما باعث تقویت شدت واکنش و جرقه و در عین حال افزایش طول شعله و کاهش میزان برخاستگی آن می‌شود.

کلمات کلیدی: مایلد، رقیق‌سازی، پلاسما غیر تعادلی، DBD

مقدمه

امروزه هدف اصلی پژوهشگران توسعه سیستم‌های احتراق با آلاینده‌گی کم و در عین حال با بازده بالا است. این امکان با به کارگیری احتراق مایلد^۱ ایجاد خواهد شد. این تکنولوژی از اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی مورد توجه قرار گرفت [۱]. احتراق مایلد که به نام‌های احتراق اکسیداسیون بدون شعله^۲ و یا احتراق تحت شرایط دمای هوای بالا^۳ نیز شناخته شده است، دارای اصول اولیه خاصی می‌باشد. (۱) دمای مخلوط واکنش‌دهنده‌های ورودی بیشتر از دمای خوداشتعالی مخلوط باشد. (۲) افزایش دما در حین واکنش نسبت به دمای ورودی، کمتر از دمای خوداشتعالی مخلوط باشد [۲، ۳]. از طرفی بالا بردن دمای واکنش‌دهنده‌ها باعث افزایش بیشینه‌ی دمای شعله و به دنبال آن میزان ناکس^۴ تولیدی خواهد شد. یکی از راه‌های جلوگیری از این رویداد، کاهش درصد اکسیژن هوای پیش گرم است. در حقیقت، با افزایش رقیق‌سازی اکسیژن، واکنش‌های احتراقی و انتقال حرارت ناشی از آنها، گسترده‌تر می‌شود. این گسترده‌گی انتقال حرارت، باعث کاهش بیشینه دما در شعله و در نتیجه کاهش میزان ناکس تولید شده در طی فرایند احتراق خواهد شد [۴]. در احتراق مایلد، پیش گرم کردن واکنش‌دهنده‌ها تا بالاتر از دمای خوداشتعالی فرایندی هزینه‌بر است و نیاز به انرژی اولیه زیادی دارد و همچنین رقیق‌سازی غلظت اکسیژن ورودی نیز باعث کم شدن پایداری شعله می‌شود.

¹Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD)

²Flameless Oxidation (FLOX)

³High Temperature Air Combustion (HITAC)

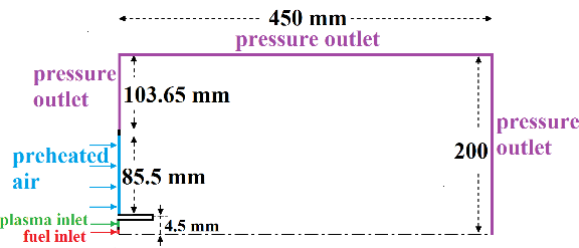
⁴NOx

⁵ Diffusion transport enhancement

⁶ Convective transport enhancement

مدل تجربی و شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق مدل تجربی واد [۶] مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. شکل (۱) شماتیکی از این مدل را به نمایش گذاشته است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این مشعل شامل سه مجرای هم‌محور که به ترتیب از داخل به بیرون، از جت سوخت مرکزی، جریان عبوری از راکتور پلاسما و جریان هوای تضعیف‌شده پیش‌گرم تشکیل شده‌است. شکل (۲) نیز مدل آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه پرینستون^۷ را نشان می‌دهد.



شکل ۳- دامنه محاسباتی مشعل دارای سه مجرای هم‌محور

پس از اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه مورد استفاده، در نهایت شبکه‌ای با تعداد تقریباً ۳۲۰۰ سلول انتخاب و تمامی مدل‌سازی‌ها بر مبنای آن و با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۹ انجام شد. این مدل‌سازی بر مبنای روش حجم محدود و با به کارگیری الگوریتم سیمپل^{۱۰} انجام شده‌است. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، مومنتوم، انرژی و بقای گونه‌ها از روش مرتبه دوم استفاده شده و هم‌چنین توزیع سرعت در ورودی جریان‌ها به دامنه حل، از مدل‌سازی جریان در بالادست آن‌ها به دست آمده‌است.

شرایط مرزی

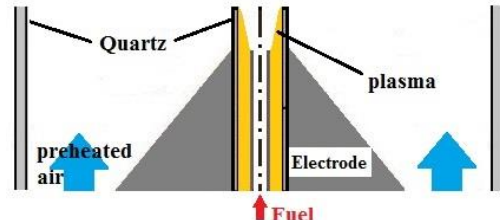
مجرای سوخت شامل ۱۰٪ متان و ۹۰٪ نیتروژن (برحسب مول) و ورودی راکتور پلاسما نیز حاوی ۳٪ متان و ۹۷٪ هوا بوده و هم‌چنین سرعت جریان خروجی از این دو مجرا به ترتیب ۲۰ و ۵ متر بر ثانیه می‌باشد. جریان هوای پیش‌گرم نیز شامل ۶٪ اکسیژن با نسبت هم‌ارزی ۰/۷۵ برای مخلوط نسوخته که در بردارنده $CH_4/O_2/air$ و سرعت جریان خروجی از آن ۱/۹ متر بر ثانیه می‌باشد. واد و همکارانش مقادیر سه گونه اصلی فعال را در فاصله ۷/۵ میلیمتری از دهانه خروجی جت، پس از عبور جریان اولیه از راکتور پلاسما اندازه‌گیری کرده‌اند. از آنجا که مخلوط خروجی بلافاصله به تعادل می‌رسد، این مقادیر که در جدول (۱) به نمایش گذاشته شده‌اند، به عنوان شرایط مرزی ورودی برای راکتور پلاسما لحاظ گردیده‌اند.

جدول ۱- مقادیر سه گونه اصلی اندازه‌گیری شده توسط واد [۶] در خروجی راکتور پلاسما

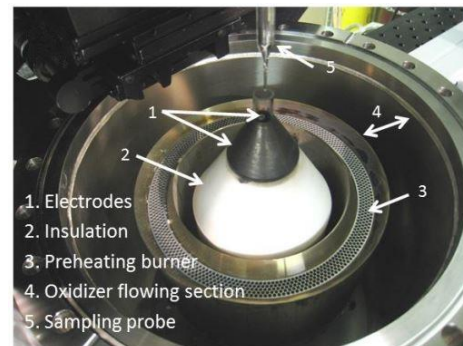
H ₂	CH ₂ O	H ₂ O	نسبت مولی
۰/۰۰۰۱۹۸	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۱۱۴	

در این تحقیق، رابطه بین جریان آشفته و کینتیک شیمیایی توسط مدل احتراقی EDC [۱۳] مدل‌سازی شده است. هم‌چنین پس از بررسی انواع مدل‌های دو معادله‌ای، مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ و تابع دیواره غیرتعادلی^{۱۱} به دلیل تطابق بهتر با نتایج اندازه‌گیری شده، مبنای محاسبات قرار گرفتند. در راستای افزایش دقت مدل‌سازی، تمامی شبیه‌سازی‌ها بر اساس مکانیزم شیمیایی کامل GRI 3.0 انجام شده‌اند. برای اطمینان از همگرایی حل نه تنها مقدار باقی مانده جرمی معادلات بقا به کمتر از ۰/۰۰۰۱ رسیده است، بلکه مقادیر دما و سرعت در نقاط مختلف میدان نیز تقریباً ثابت شده و با ادامه محاسبات تغییر نمی‌کنند.

نتایج و بحث بر روی آن‌ها



شکل ۱- شماتیکی از مشعل واد [۶]



شکل ۲- مدل واقعی مشعل واد [۶]

راکتور پلاسما مورد مطالعه در این بررسی، از نوع تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک^۸ است. عملگر پلاسمای به کار گرفته شده به صورت استوانه‌ای شکل بوده و از دو الکترود هم‌محور یکی به صورت استوانه و دیگری مخروطی شکل ساخته شده است. الکترود درونی که دیواره بیرونی جت سوخت است، به عنوان قطب مثبت در نظر گرفته می‌شود. یک لایه دی‌الکتریک از جنس کوارتز به الکترود بیرونی متصل است و تخلیه الکتریکی به صورت پالسی در نزدیکی کوارتز اتفاق می‌افتد. برای جلوگیری از ایجاد قوس الکتریکی در لبه آن، این دی‌الکتریک به اندازه ۱۲ میلی‌متر بلندتر از دیواره مجرای سوخت و الکترود مخروطی ساخته شده است. هم‌چنین مجرای سوخت و هم راکتور پلاسما از نظر دمایی عایق‌بندی شده‌اند. مشعل مذکور در هوای آزاد حاوی بخار آب قرار گرفته است.

مدلسازی عددی

شکل (۳) نشان‌دهنده دامنه محاسباتی که به صورت دوبعدی متقارن محوری در نظر گرفته شده‌است، می‌باشد.

⁹ Fluent

¹⁰ SIMPLE

¹¹ Non-equilibrium wall function

⁷ Princeton University

⁸ Dielectric Barrier Discharge (DBD)

در ادامه به بررسی مسیره‌های اصلی اثر پلاسما روی رژیم احتراق مایلد پرداخته خواهد شد.

۱. اثر دمایی

همانطور که بیان شد، یکی از مسیره‌های عمده اثر پلاسما روی احتراق اثر حرارتی است. طبق مطالعات انجام شده در دهه‌های اخیر، درصدی از توان ورودی پلاسما همواره صرف تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته تاکنون در این زمینه [۱۴-۱۹] در حدود ۵۰ الی ۸۰ درصد توان پلاسما به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. از آنجا که در رژیم جریان آرام، دمای گاز خروجی و دمای سطح دی‌الکترونیک با یکدیگر برابر بوده و دمای گاز خروجی تنها در حد چند کلون از دمای الکترودها بیشتر می‌شود [۱۵] و هم‌چنین سیستم مورد بررسی در این تحقیق از نظر حرارتی عایق می‌باشد، می‌توان فرض کرد که کل این انرژی حرارتی صرف افزایش دمای گاز خروجی از راکتور پلاسما می‌شود. طبق این تحلیل تقریبی دمای گاز در حدود ۴۷۰ الی ۵۷۰ کلون تخمین زده شده است. معادله (۱) نحوه محاسبه توان بیشینه براساس ماکزیمم ولتاژ و جریان اعمال شده به عملگر پلاسما را نشان می‌دهد. در معادله (۲) براساس مطالعات صورت گرفته توسط الخولی و همکارانش [۱۴] توان کل تقریباً ۵۶ درصد توان بیشینه تخمین زده شده است. معادلات (۳) و (۴) نیز به ترتیب مقادیر تقریبی مینیمم و ماکزیمم دمای پلاسمای خارج شده از راکتور را برآورد می‌کنند.

$$P_{max} = V \times I \times t_p \times f = 2 \times 10^4 \times 47 \times 12 \times 10^{-9} \times 10^4 \quad (1)$$

$$= 112.8 \text{ w}$$

$$P_{total} = 0.5625 \times P_{max} = 63.45 \text{ w} \quad (2)$$

$$Q = 0.5 \times P_{total} = 31.725 \rightarrow \Delta T = \frac{Q}{\dot{m}c_p} = \frac{31.725}{0.185} = 171 \quad (3)$$

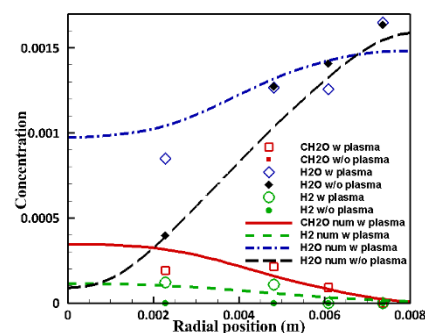
$$\rightarrow T_{max} = 300 + 171 \sim 470 \text{ k}$$

$$Q = 0.8 \times P_{total} = 50.76 \rightarrow \Delta T = \frac{Q}{\dot{m}c_p} = \frac{50.76}{0.185} = 274 \quad (4)$$

$$\rightarrow T_{max} = 300 + 274 \sim 570 \text{ k}$$

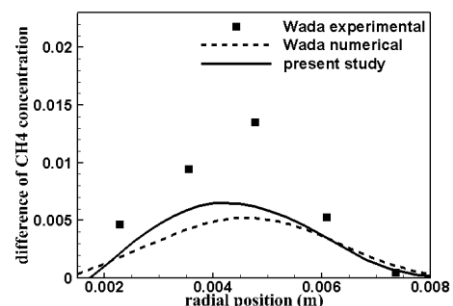
که در روابط بالا t_p مدت زمان فعال بودن پالس، f فرکانس ولتاژ اعمال شده، P_{max} توان ماکزیمم، P_{total} توان کل، Q انرژی حرارتی، \dot{m} دبی جرمی، c_p ضریب گرمایی ویژه و T دمای جریان پلاسما می‌باشد. در ادامه مدل‌سازی دو حالت اعمال این دما به پلاسما (دمای پلاسما ۴۷۰ کلون) و بدون اعمال آن (دمای پلاسما ۳۰۰ کلون) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همانطور که می‌دانیم در مجموعه واکنش‌های تبدیل CO به CO₂ واکنش $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$ مهم‌ترین واکنش است که همراه با آزادسازی زیاد حرارت می‌باشد [۲۰]. شکل (۶) و (۷) به ترتیب کانتورهای نرخ واکنش آزادسازی حرارت و غلظت مولی رادیکال هیدروکسیل را در این دو حالت با یکدیگر مقایسه می‌کنند. با توجه به این شکل‌ها در نظر گرفتن اثر دمایی پلاسما باعث افزایش طول شعله، کمتر شدن برخاستگی آن و افزایش شدت واکنش و آزادسازی حرارت خواهد شد.

در ابتدا جهت اطمینان از صحت شبیه‌سازی صورت گرفته، نتایج حاصل با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط وادا مقایسه شده‌اند. شکل (۴) توزیع شعاعی غلظت گونه‌های اصلی در ارتفاع ۲۷/۸ میلی‌متری از دهانه خروجی جت را در دو حالت با پلاسما (علامت‌های توخالی) و بدون آن (علامت‌های توپر) نشان می‌دهد. در هر دو حالت جریان عبوری از جت سوخت شامل CH₄ /N₂ ۱۰٪ است. جریان راکتور پلاسما شامل CH₄ /air ۳٪ است که در حالت فعال بودن عملگر پلاسما، این مخلوط در خروجی راکتور تبدیل به گونه‌های فعال می‌شود، اما در حالتی که عملگر فعال نباشد، این ترکیب تغییر نخواهد کرد. در این اندازه‌گیری‌ها جریان هوای پیش‌گرم لحاظ نشده‌است. نتایج نشان می‌دهند که اختلاط تا حد قابل قبولی به خوبی پیش بینی شده‌است. اما در عین حال به دلیل نادیده گرفتن گونه‌های فعال دیگر و رادیکال‌ها و یون‌ها و در اختیار نبودن داده‌های مورد نیاز، در حدود ۲۱ درصد خطا با نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود.



شکل ۴- توزیع شعاعی گونه‌های اصلی در حالت با (علامت توخالی) و بدون پلاسما (علامت توپر) و مقایسه با نتایج حاضر (خطوط ممتد)

در راستای صحت‌سنجی نتایج حاصل از حل احتراقی میدان، نمودار شکل (۵) توزیع شعاعی اختلاف غلظت متان در دو حالت با تخلیه پلاسما و بدون آن در فاصله ۲۷/۸ میلی‌متری از مکان خروجی جت را نشان می‌دهد. در این شرایط جریان اکسیدایزر شامل ۶٪ اکسیژن است و تا دمای ۱۰۵۰ کلون پیش‌گرم شده است. هم‌چنین جریان خروجی از راکتور پلاسما و جت سوخت نیز همانند شرایط توضیح داده شده در قبل می‌باشد. وادا و همکارانش در کنار اندازه‌گیری‌های تجربی، یک مدل‌سازی عددی نیز تنها در حالت غیر احتراقی انجام دادند که نتایج آن نیز در شکل زیر قابل مشاهده است. شکل (۵) نشان می‌دهد که اگرچه مقادیر بدست آمده تا حدود زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف دارند، اما درصد خطا نسبت به حل عددی غیر احتراقی انجام شده توسط وادا، از ۶۷٪ به ۴۴٪ کاهش یافته است و اثرات پلاسما روی میدان سرعت بصورت کیفی مناسب پیش بینی شده‌اند.



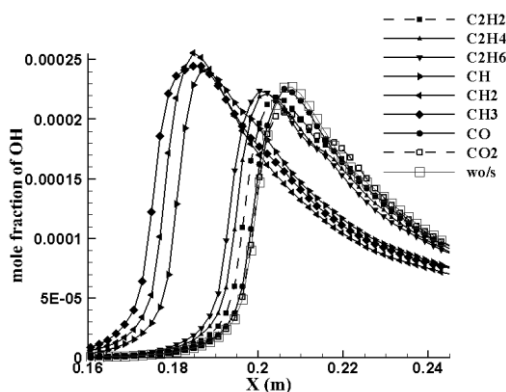
شکل ۵- توزیع شعاعی اختلاف غلظت متان در دو حالت با و بدون تخلیه پلاسما

حرارت و نیز ماکزیمم مقدار رادیکال OH با انتخاب CH_2 به عنوان گونه چهارم به بیشترین مقدار خودشان خواهند رسید.

جدول ۲- مقایسه مقادیر بیشینه دما، هیدروکسیل، هیدروژن، فرمالدهید و نرخ شیمیایی واکنش مربوط به آزادسازی حرارت برای گونه‌های مختلف

R99 _{max}	CH ₂ O _{max}	H ₂ max	OH _{max}	T _{max}	
۰/۰۲۶۰۶۹۹۳	۰/۰۰۰۶۱۲۰۲۵۸	۰/۰۰۰۸۸۲۶۳۵۱	۰/۰۰۰۲۱۸۲۵۱۴	۱۳۱۶	C ₂ H ₂
۰/۰۲۶۶۴۵۸	۰/۰۰۰۶۱۷۳۶۶۷	۰/۰۰۰۸۸۶۷۵۱۴	۰/۰۰۰۲۳۱۶۵۸۴	۱۳۱۷	C ₂ H ₄
۰/۰۲۶۵۵۷۹۵	۰/۰۰۰۶۱۵۰۵۹۷	۰/۰۰۰۸۸۸۷۱۲۶	۰/۰۰۰۲۳۳۹۰۲۵	۱۳۱۸	C ₂ H ₆
۰/۰۳۰۴۸۲۱۶	۰/۰۰۰۶۵۵۵۶۰۲	۰/۰۰۰۹۴۴۳۶۲	۰/۰۰۰۲۴۲۱۷۵۱	۱۳۲۶	CH
۰/۰۳۰۹۵۱۷۱	۰/۰۰۰۶۹۰۶۷۶۶	۰/۰۰۰۹۶۴۰۲۶	۰/۰۰۰۲۵۵۷۰۲۹	۱۳۲۶	CH ₂
۰/۰۳۰۵۹۵۶۵	۰/۰۰۰۸۱۱۹۱۷	۰/۰۰۰۹۵۰۱۸۳۴	۰/۰۰۰۲۴۴۹۲۲۴	۱۳۲۲	CH ₃
۰/۰۲۵۸۲۲۱۳	۰/۰۰۰۶۰۸۶۴۴۹	۰/۰۰۰۸۸۳۱۴۴۱	۰/۰۰۰۲۲۵۴۱۸۹	۱۳۲۳	CO
۰/۰۲۵۴۴۴۷۲	۰/۰۰۰۶۱۰۹۲۹۳	۰/۰۰۰۸۷۸۰۶۲۶	۰/۰۰۰۲۰۵۶۹۲۹	۱۳۱۳	CO ₂

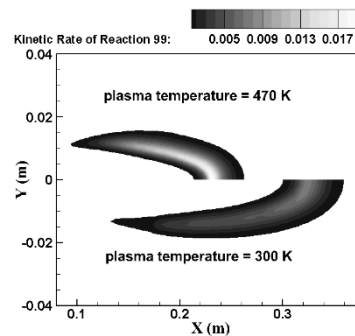
شکل (۸) نیز نشان‌دهنده توزیع غلظت رادیکال OH برای حالت‌های مختلف ذکر شده در جدول (۲) روی محور مشعل است. اگر مقدار OH جهت مقایسه میزان بر خاستگی و طول شعله مینا قرار گیرد. با توجه به این نمودار، در حالت انتخاب CH_3 طول شعله به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بر خاستگی شعله ۱۰٪ نسبت به حالتی که گونه‌های فعال در نظر گرفته نشوند، کاهش می‌یابد و نیز محل وقوع واکنش نسبت به حالتی که اثر گونه‌ها اعمال نشود، ۱۲٪ به سمت بالادست جریان جابه‌جا می‌شود. با انتخاب CO و CO₂ به عنوان گونه چهارم، تغییرات صورت گرفته در ساختار شعله بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین ترکیب پلاسما و انتخاب صحیح گونه چهارم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



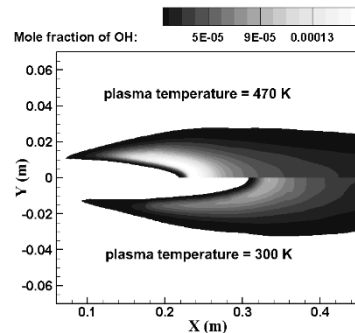
شکل ۸- مقایسه توزیع غلظت رادیکال OH برای حالات مختلف ذکر شده در جدول (۲) روی محور مشعل

۳. اثر انتقالی

همانطور که می‌دانیم پلاسما از طریق ایجاد باد یونی، ناپایداری دینامیکی و حرکت سیال توسط نیروهای کولمب و لورنتس، باعث تغییر و اصلاح سرعت محلی جریان و افزایش آشفستگی جریان و بهبود اختلاط آن می‌شود [۹]. پلاسما با ایجاد گرادیان دمایی زیاد در نزدیکی دیواره کوارتز مدل تجربی باعث شتابدهی به گاز یونیزه شده در آن نواحی می‌شود [۱۲]. در راستای مطالعه و مدل‌سازی اهمیت این اثر سه نوع پروفیل ورودی سرعت برای جریان خروجی از راکتور پلاسما مورد سنجش قرار گرفته است. در اولین تخمین، پروفیل خطی به نحوی که ماکزیمم آن در کنار دیواره و مینیمم آن در فصل مشترک جریان خروجی از جت سوخت و جریان پلاسما باشد، انتخاب شده است. پروفیل‌های سهمی کاملاً توسعه یافته و همچنین پروفیل توانی در جریان خروجی از راکتور نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (۹) توزیع غلظت رادیکال OH را در طول محور برای این سه حالت



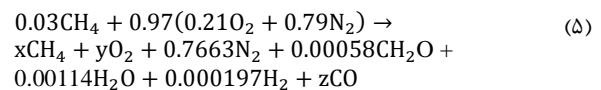
شکل ۶- مقایسه کانتور نرخ واکنش آزادسازی حرارت در دو حالت با و بدون اعمال اثر حرارتی پلاسما



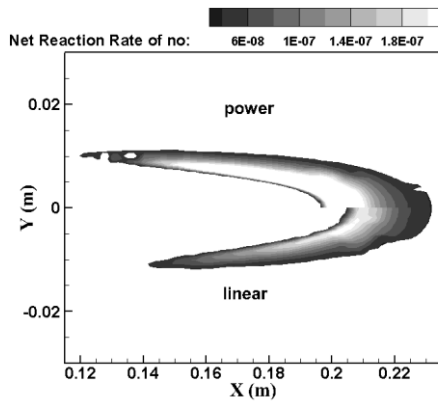
شکل ۷- مقایسه کانتور غلظت مولی رادیکال هیدروکسیل در دو حالت با و بدون اعمال اثر حرارتی پلاسما

۲. اثر کینتیک شیمیایی

همانطور که بیان گردید، یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار ناشی از اعمال پلاسما به احتراق، اثر شیمیایی است. این اثر در واقع از وجود یون‌ها، الکترون‌ها و گونه‌های فعال و رادیکال‌ها ناشی می‌شود. این بخش به مطالعه اثر حضور گونه‌های فعال شیمیایی می‌پردازد. همانند آنچه که در بخش‌های قبل مطرح شد، ورودی راکتور پلاسما مخلوطی شامل ۳٪ مولی متان و ۹۷٪ مولی هوا است. این مخلوط پس از عبور از راکتور و تحت تاثیر میدان الکتریکی پالسی ناشی از آن، به مجموعه‌ای از یون‌ها و الکترون‌ها و گونه‌های فعال شیمیایی تبدیل خواهد شد. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط وادا غلظت سه گونه اصلی تولید شده مشخص شده است. برای ایجاد امکان موازنه واکنش شیمیایی زیر نیاز به در نظر گرفتن گونه چهارم (در این معادله CO انتخاب شده است) می‌باشد.



طبق مطالعات صورت گرفته توسط لفقویترز و همکارانش [۲۱] گونه‌های فعال ذکر شده در جدول (۲) به عنوان گونه‌های اصلی در خروجی عملگر پلاسما می‌باشد که جریان عبوری از آن متان رقیق شده با هلیوم است، مطرح شده‌اند. با انتخاب هر یک از آنها به عنوان گونه چهارم احتمالی، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه و در جدول (۲) ماکزیمم دما، نسبت مولی هیدروکسیل، هیدروژن، فرمالدهید و نرخ شیمیایی واکنش مربوط به آزادسازی حرارت گزارش شده‌اند. رادیکال فرمالدهید محل وقوع جرقه و رادیکال هیدروکسیل محل وقوع واکنش را نشان می‌دهند [۲۲]. همانطور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم دما و همچنین بیشترین شدت جرقه در حالتی که گونه چهارم CH_3 باشد، رخ می‌دهد. شدت واکنش نرخ آزادسازی



شکل ۱۱- مقایسه کانتور نرخ خالص واکنش نیتروژن مونواکسید برای دو نوع پروفیل توانی و خطی

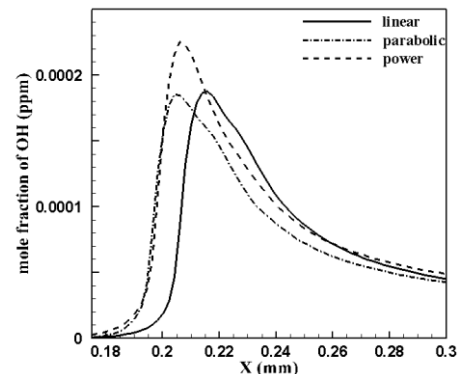
جمع بندی

در مقاله جاری، به مطالعه عددی مسیریهای مختلف اثرگذاری پلاسما به صورت جداگانه روی احتراق تحت شرایط رقیق سازی و پیش گرم بالا پرداخته شده است. به این منظور یک مشعل آزمایشگاهی سه کاناله، شامل جت سوخت مرکزی، جریان عبوری از راکتور پلاسمای هم محور و جریان هوای پیش گرم و رقیق شده در اطراف آن به صورت عددی شبیه سازی شده است. راکتور پلاسمای استفاده شده از نوع عملگر DBD بوده و ولتاژ پالسی نانو ثانیه ای به آن اعمال می شود. با تغییر دمای پلاسما، تغییر گونه های فعال تشکیل شده و توزیع سرعت جریان خروجی از راکتور پلاسما به بررسی اثر هر یک از این عوامل پرداخته شده است. نتایج نشان می دهند که در نظر گرفتن افزایش دمای مجموعه ذرات و گونه های فعال در ناحیه خروجی راکتور پلاسما باعث افزایش شدت واکنش، کاهش برخاستگی شعله و افزایش طول آن خواهد شد. در مطالعه اثر کینتیک شیمیایی با تغییر گونه چهارم جهت فراهم نمودن امکان انجام موازنه معادله (۵) مشاهده شد که رادیکال CH_3 بیشترین اثر را روی پارامترهای موثر در ساختار شعله می گذارد و باعث کاهش میزان برخاستگی آن تا حدود ۱۰٪، افزایش طول شعله و جابه جایی محل وقوع واکنش ها به بالادست جریان نسبت به حالتی که اثر گونه ها به طور کلی در نظر گرفته نشود، خواهد شد. همچنین بررسی اثر نوع توزیع تخمین زده شده سرعت خروجی پلاسما نشان می دهد که اعمال توزیع توانی به نحوی که ماکزیمم سرعت در دیواره کوارتر اتفاق بیفتد، باعث افزایش شدت واکنش و جرقه نسبت به دو حالت دیگر (پروفیل های خطی و سهموی) خواهد شد. انتخاب این پروفیل به طور صحیح در جهت مطالعه روی میزان تولید ناکس نیازمند بررسی بیشتر می باشد.

مراجع

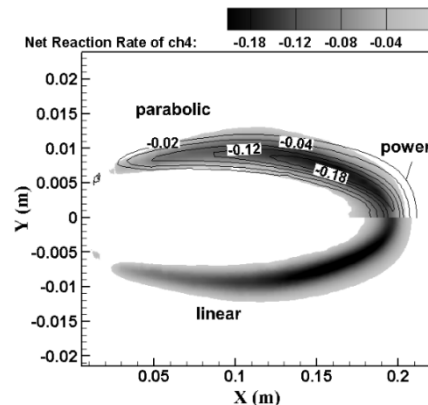
- ۱- امیر مردانی، صادق تابع جماعت، ۱۳۸۸، "مطالعه عددی اثر دینامیک جریان و اکسیژن بر احتراق متان-هیدروژن در شرایط Mild"، نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، تهران.
- 2- Cavaliere, A., Joannon, M. de, 2004, "Mild combustion", *Progress in Energy and Combustion science*, vol. 30, 329-366.
- ۳- امیر مردانی، ۱۳۸۹، "اثر دینامیک جریان و مکانیزم شیمیایی بر شعله در رژیم احتراقی HiTAC"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- 4- Mohamed, H., Hmaeid, B. and Mohamed S., 2012, "Fundamentals and simulation of MILD combustion", *Thermal Power Plants*, ed: InTech.

نشان می دهد. با توجه به این شکل محل شروع واکنش در حالتی که پروفیل سهموی و یا توانی باشد، به بالادست جریان انتقال یافته (برخاستگی کمتر) و طول شعله نیز در مقایسه با حالت پروفیل خطی افزایش خواهد یافت. در تمامی این مدل سازی ها دمای پیش گرم جریان هوا ۱۲۰۰ کلوین می باشد.



شکل ۹- توزیع غلظت رادیکال OH در طول محور مشعل برای سه حالت مختلف پروفیل سرعت خروجی راکتور پلاسما

شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب کانتور نرخ خالص مصرف متان را برای این سه حالت و کانتور نرخ خالص تولید نیتروژن مونواکسید را برای دو حالت پروفیل های خطی و توانی نشان می دهند. همانطور که مشخص است، اگرچه تغییر این پروفیل سرعت روی اختلاط اثر قابل ملاحظه ای نمی گذارد اما در میزان تولید ناکس بسیار موثر است. بنابراین در راستای مطالعه ناکس می بایست نوع این پروفیل سرعت به درستی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۰- کانتور نرخ خالص واکنش متان را برای سه نوع پروفیل سرعت خروجی پلاسمای متفاوت (پروفیل خطی: نیمه پایین، پروفیل توانی: نیمه بالا خطی، پروفیل سهموی: نیمه بالا)

- 19- Sadat, H., Dubus, N., and Dubus, J. x, 2012, "Temperature runaway in a pulsed dielectric barrier discharge reactor," *Applied Thermal Engineering*, vol. **37**, 324-328.
- 20- Turns, S. R., 1996, "An introduction to combustion" vol. **287**, McGraw-hill New York.
- 21- Lefkowitz, J. K., Guo, P., Rousso, A., and Ju, Y., 2015, "Species and temperature measurements of methane oxidation in a nanosecond repetitively pulsed discharge," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. **373**, p. 20140333.
- 22- Galletti, C., Parente, A., and Tognotti, L., 2007 "Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner," *Combustion and flame*, vol. **151**, 649-664
- 5- Matveev, I. B., Ardelyan, N., Bychkov, V., Bychkov, D. and Kosmachevskii, K., 2013, "Plasma Assisted Combustion, Gasification and Pollution Control", *Int. Plasma Technol. Center*, vol. **1**, pp. 1-28.
- 6- Ju, Y., Sun, W., 2015, "Plasma assisted combustion : Dynamics and chemistry", *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. **48**, 21-83.
- 7- Starik, A., Loukhovitski, B. Sharipov, A. and Titova, N, 2015, "Physics and chemistry of the influence of excited molecules on combustion enhancement", *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. **373**, p. 20140341.
- 8- Ju, Y., Lefkowitz, J. K., Reuter, C. B., Won, S. H., Yang, X., Yang, S., *et al.*, 2016, "Plasma assisted low temperature combustion", *Chemistry and Plasma Processing*, vol. **36**, 85-105.
- 9- Ju, Y., Lefkowitz, J. K., Wada, T., Yang, X., Won, S. H., Sun, W., 2015, "Plasma Assisted Combustion: New Combustion Technology and Kinetic Studies", *53th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Kissimmee, Florida*.
- 10- Ombrello, T., Ju, Y. and Fridman, A., 2008, "Kinetic ignition enhancement of diffusion flames by nonequilibrium magnetic gliding arc plasma", *AIAA J*, vol. **46**, 2424-2433.
- 11- Adamovich, I. V., Lempert, W. R., 2014, "Challenges in understanding and predictive model development of plasma-assisted combustion", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol. **57**, p. 014001.
- 12- Wada, T., Lefkowitz, J. K., Ju, Y., 2015, "Plasma Assisted MILD Combustion", *53th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Kissimmee, Florida*
- 13- Mardani, A., 2017, "Optimization of the Eddy Dissipation Concept (EDC) model for turbulence-chemistry interactions under hot diluted combustion of CH₄/H₂", *Fuel*, vol. **191**, 114-129.
- 14- Elkholy, A., Nijdam, S., Oijen, J. van, Goey and L. de, 2017, "A new DBD microplasma burner for measuring the effect of nanosecond discharge on burning velocity of CH₄-Air flame at atmospheric pressure", *Fundamentals of Aerodynamic Flow and Combustion Control by Plasmas, Saint Petersburg, Russia, Saint Petersburg, Russian Federation*.
- 15- Jidenko, N., Bourgeois, E. and Borra, J., 2010, "Temperature profiles in filamentary dielectric barrier discharges at atmospheric pressure", *Journal of physics D :applied physics*, vol. **43**, p. 295203.
- 16- Nozaki, T., Miyazaki, Y., Unno, Y. and Okazaki, K., 2001, "Energy distribution and heat transfer mechanisms in atmospheric pressure non-equilibrium plasmas", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **34**, p. 3383.
- 17- Kappes, T., Schiene, W. and Hammer, T., 2002, "Energy balance of a Dielectric Barrier Discharge reactor for hydrocarbon steam reforming", *8th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry proceedings, HAKONE*.
- 18- Sadat, H., Dubus, N., Pinard, L., Tatibouet, J.-M. and Barrault, J., 2009, "Conduction heat transfer in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor," *Applied Thermal Engineering*, vol. **29**, 1259-1263.