

بررسی تاثیرات اعمال پلاسمای سرد بر روی سرعت شعله و کاهش آلاینده‌گی سوخت

حسین مهدوی مقدم*^۱ و آرمان سلیمانی^۲

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۲۳

چکیده

هدف از این تحقیق، تحلیل عددی و قیاس با کار تجربی اثرات پلاسمای سرد حاصل از اعمال میدان الکتریکی بر روی پارامترهای احتراق و آلاینده‌های آن می‌باشد. روش اصلی برای این ارزیابی استفاده از متغیرها و پارامترهای تأثیرگذار همچون دما، ولتاژ و متغیرهای وابسته به سوخت است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها حاکی از این است که مثبت بودن پتانسیل الکتروود مرکزی سبب بالا رفتن دمای شعله در محفظه احتراق و نزدیکی دیواره می‌شود که به معنی نزدیک‌تر شدن شعله به دیواره می‌باشد. به همین دلیل انتقال حرارت به دیواره محفظه در این حالت افزایش می‌یابد. میدان الکتریکی سبب ایجاد یک شتاب منفی در مرکز محفظه می‌شود. با افزایش قدرت میدان الکتریکی مثبت، دمای شعله در مرکز محفظه کاهش پیدا کرده و باعث کوتاه‌تر شدن طول شعله می‌شود. با اعمال میدان مشخص گردید که تغییرات درصدی آلاینده‌های شاخص یعنی کربن دی اکسید و اکسیدهای نیتروژن مانند نیتروژن مونواکسید به ترتیب ۸ و ۶٪ کاهش پیدا کرده‌اند. در قطبیت منفی و در خروجی محفظه به دلیل اثر چرخش، سرعت محوری تا حدی در وسط محفظه کاهش می‌یابد. در میدان الکتریکی ۳ کیلوولت و پلاریته مثبت، انتقال حرارت به دیواره‌ها حدود ۵۲٪ بیشتر از حالت بدون وجود میدان الکتریکی می‌باشد.

کلمات کلیدی: میدان الکتریکی، کاهش آلاینده‌ها، احتراق، الکترو هیدرودینامیک، پلاسمای غیر حرارتی.

مقدمه

میدان الکتریکی در احتراق که قدمتی در حدود چهل تا پنجاه ساله دارد، به این برآورد کلی می‌رسیم که هر یک از تحقیقات صورت گرفته تنها براساس آزمایش یک یا دو متغیر احتراق از جمله پایداری احتراق یا افزایش دمای شعله بوده و بررسی همه متغیرهای اساسی در احتراق با یکدیگر صورت نگرفته است.

بیش از هشتاد درصد انرژی مورد نیاز بشر به وسیله احتراق سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. با مطالعات صورت گرفته در رابطه با به‌کارگیری

میدان الکتریکی برای این منظور می‌باشد که در این صورت با داشتن هندسه‌ای ثابت تنها با تغییر پلاریته یا میزان میدان الکتریکی، خواص دینامیکی و ترمودینامیکی شعله را می‌توان کنترل کرد. اثر شیمیایی و باد یونی دو اثر میدان الکتریکی بر روی شعله است که اکثر محققان باد یونی را اصلی‌ترین عامل تغییر در خواص دینامیکی و ترمودینامیکی شعله در مجاورت میدان الکتریکی می‌دانند [۳]. در موسسه فیزیک و فن‌آوری مسکو یک کار عددی توسط آندره استریکوفسکی^۳ با فرض دو بعدی و یک بعدی و با هدف تعیین اثر میدان الکتریکی ضعیف بر روی ساختمان شعله متان و هوا انجام گرفت. در فرض یک بعدی با استفاده از نرم‌افزار CHEMKIN و در فرض دو بعدی با استفاده از حل الکترویدرودینامیکی در نرم‌افزار CFX ANSYS این کار صورت گرفت و نتیجه این بود که با استفاده از میدان الکتریکی می‌توان ساختار شعله را کنترل کرد و همچنین مقدار مونو اکسید کربن را در محصولات احتراق کاهش داد [۴]. تحقیقی از سویوان-نیکولاجفری، توماساکا، عبدالرحمن بروال با هدف تعیین آستانه احتراق شعله برای تولید پلاسمای غیرحرارتی و بهینه‌سازی انواع هندسه راکتور پلاسمای برای کاربردهای گازه‌های خروجی صورت گرفته است. بنابر نتایج به دست آمده از این پژوهش‌ها، فرآیندهای کاهش کاتالیستی انتخابی^۴ SCR کنونی می‌توانند برای کاهش NO_x توسط رفتار پلاسمای غیرحرارتی بهبود یابند. (NTP=Non Thermal Plasma) به تنهایی NO تولیدشده توسط یک موتورحرارتی را به N₂ و O₂ کاهش نمی‌دهد، اما اکسیداسیون NO به NO₂ در بالادست یک کاهنده کاتالیستی انتخابی مرسوم را فراهم می‌کند. بهره‌وری این سیستم بستگی به دو پارامتر اصلی دارد: منبع تغذیه و هندسه راکتور. هدف این تحقیق همان‌گونه که عنوان شد،

چارچوب نظری این تحقیق بر این اصل استوار است که اعمال میدان الکتریکی هنگام احتراق بر میدان سیال عامل، انرژی و دمای ذرات را به واسطه نیروی الکتریکی لورانتس^۱ و انرژی الکتریکی بالا می‌برد و با ایجاد باد یونی^۲ و قطبی کردن ذرات، باعث شتاب‌گیری آنها و در نتیجه افزایش سرعت احتراق می‌شود که به دنبال آن اثراتی بر روی فرایند شکل‌گیری محصولات احتراق همچون دوده و دیگر آلاینده‌های حاصل از احتراق خواهد داشت.

مروری بر تحقیقات انجام شده

در سال ۱۹۵۷ تحقیقاتی در زمینه فهم مکانیزم تشکیل یون در شعله‌ها براساس یونیزه شدن شیمیایی و حرارتی انجام شد. یونیزه شدن به سه شکل ۱- حرارتی^۲- تحریک الکترونی و ۳- شیمیایی مشاهده شده است. براساس این فرضیات بارمینا و همکارانش به بررسی نقش اعمال میدان الکتریکی بر روی شکل‌گیری شعله و دوده و دیگر پارامترهای احتراق پرداختند که نتایج حاکی از کاهش تولید دوده و بهینه‌تر شدن سوختن شعله بوده است [۱]. در یک پژوهش صورت گرفته توسط نورانی و همکاران، به صورت عددی اثر دمای ورودی و نسبت تعادل را بر نفوذ اسپری، کیفیت اختلاط، توزیع دما و تولید NO_x در یک محفظه احتراق استوانه‌ای با جت دیواره را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش دمای ورودی، NO_x تشکیل شده در ناحیه ابتدایی (منطقه احتراق اولیه) کاهش می‌یابد و در نتیجه عمق نفوذ بیشتری از جت مشاهده می‌شود. با افزایش دمای ورودی، سرعت جریان افزایش می‌یابد ولی در سایر نقاط محفظه احتراق، NO_x به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد [۲].

بنابر اظهارات و آزمایش‌های متعدد زیگ و همکاران که بیان گردیده است، دو روش به طور معمول برای کنترل شعله از نظر پایداری و تولید آلاینده‌ها استفاده می‌شود. یکی با تغییر در هندسه نازل و تغییرات در نسبت هم ارزی و روش دیگر استفاده از

1. Larentz Electrical Force

2. Ionic Wind

3. Anderi Starikowski

4. Selective Catalytic Reduction

حداکثر حذف NO_x در چگالی انرژی ۲۷ (ژول/متر) به دست آمد. اثبات شد که پلاسما برای حذف دوده بسیار مؤثر است و می‌تواند به عملکرد کامل حذف برای ذرات در مود انباشتگی برسد. هرچند، وقتی ولتاژ اعمال شده به ۱۲ کیلوولت برسد، تعداد کل ذرات مواد هسته‌زایی با یک ضریب ۵۰ برابر بیشتر از تعداد ذرات کل ورودی رآکتور افزایش می‌یابد [۸].

روش تحقیق

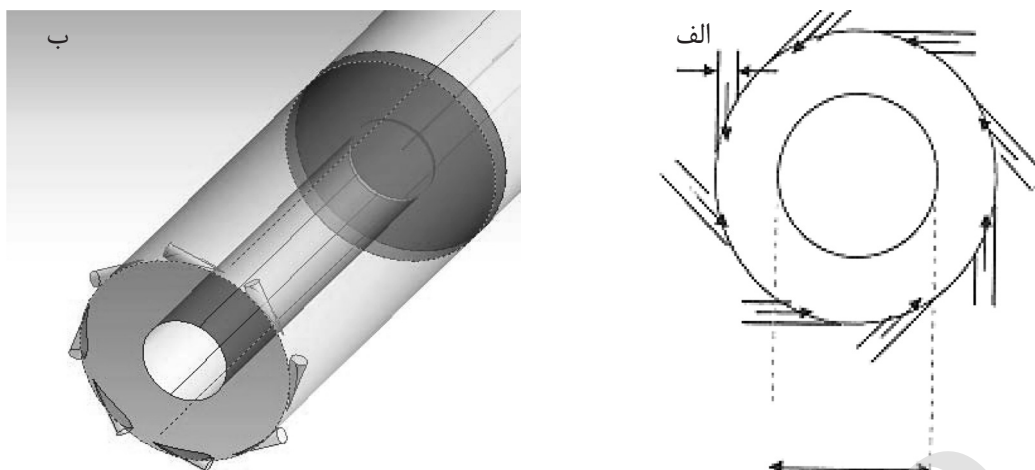
مشخصات شکل هندسی محفظه احتراق

محفظه احتراق استوانه‌ای شکلی با هشت راه مماسی ورودی هوا به شعاع ۲ mm و یک ورودی محوری سوخت به قطر ۱۶ mm در نظر گرفته شده است. الکتروود مرکزی به قطر ۰/۵ mm و از جنس فولاد و قطر کلی محفظه ۴۰ mm و طول آن ۲۶۰ mm در نظر گرفته شده است. هوای ورودی با سرعت بین ۳/۵ تا ۷ m بر ثانیه از هشت مجرا وارد محفظه می‌گردد که شماتیک آن در شکل ۱ الف و ب مشاهده می‌گردد.

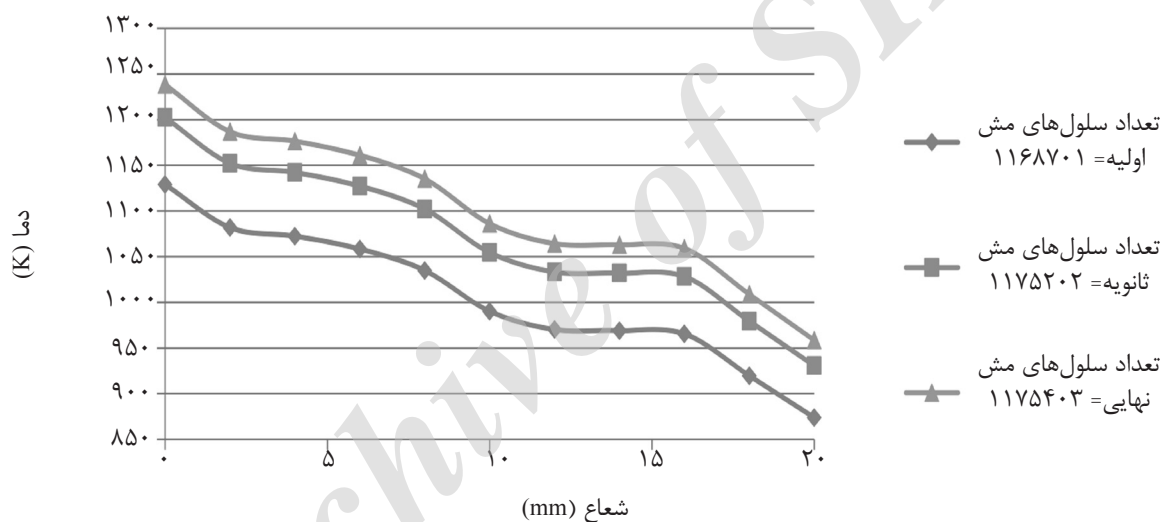
مشخصات مش اولیه و بهینه شده سه بعدی

انتخاب شبکه مناسب، عامل مهمی در حصول جواب صحیح در یک مسئله دینامیک سیالات محاسباتی به شمار می‌رود. از طرفی، شبکه مناسب، به شبکه‌ای اطلاق می‌شود که مش در آن مستقل از شبکه باشد. به بیان دیگر، با ریزتر کردن شبکه مقدار جواب تغییر نکند. برای این منظور، ابتدا لازم است که نتایج حل با تنظیمات یکسان برای شبکه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرند. لذا با بررسی دما بدون اعمال میدان مغناطیسی برای مش‌های مختلف، حل آن صورت گرفت که به صورت شکل‌های ۱ و ۲ برای پروفیل‌های دما و سرعت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این نمودارها اختلاف دما و سرعت مماسی برای شبکه بهینه شده نهایی نسبت به شبکه ثانویه ناچیز است. لذا شبکه بهینه شده نهایی به عنوان شبکه اصلی برای محاسبات انتخاب گردید.

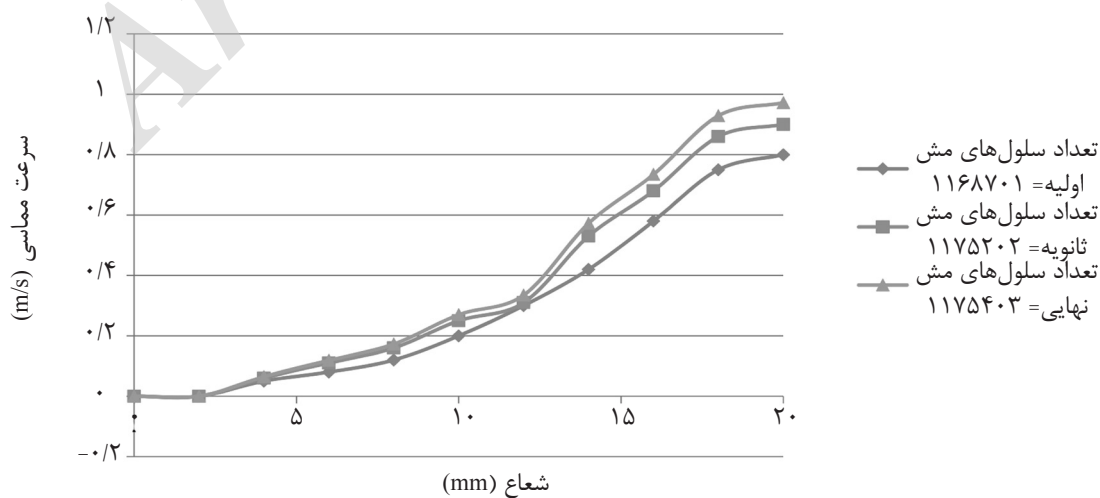
تولید و بهینه‌سازی پلاسما برای کنترل آلودگی در موتورهای حرارتی خودرو بوده است [۵]. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط الکساندر بارناولی از تأثیرات مستقیم میدان الکتریکی بر روی احتراق می‌توان به قطبی‌سازی بیشتر ذرات واکنش دهنده اشاره کرد. در هنگام اعمال جریان الکتریکی در شعله، دمای شعله افزایش می‌یابد و نیز سرعت شعله و احتراق افزایش و ارتفاع شعله کاهش پیدا می‌کند. میدان الکتریکی مولکول‌های گاز را قطبی‌تر می‌کند و الکترون‌ها هنگام عبور از مشعل شتاب می‌گیرند. با اعمال میدان، هدایت حرارتی افزایش و مقاومت به دنبال آن کاهش و غلظت یون‌ها افزایش می‌یابد [۶]. آزمایش‌های تجربی انجام گرفته شده توسط مارک زیگ و همکارانش، نشان از تأثیر مستقیم افزایش قدرت میدان الکتریکی بر پایه انتقال جرم بر روی اجزا و ترکیبات شعله و احتراق سوخت دارد. با تغییر نسبت هم‌ارزی و قدرت میدان، می‌توان متغیرهایی مثل دما، فرآیند شکل‌گیری دوده و تجزیه ترکیبات سوخت را به دست آورد. اثر میدان الکتریکی بر روی تشکیل دوده، جداسازی ترکیبات، برای جریان جرمی یک سوخت غنی برای کاهش سطح آلاینده‌گی از شعله است. با افزایش قدرت میدان بر مبنای (حرارت/جرم) در دیواره‌های کانال برای شرایط سوخت فقیر، کنترل بیشتری بر روی احتراق سوخت و دمای شعله و دمای محسوس آلاینده‌گی NO_x صورت می‌گیرد که این نتایج در میدان با قدرت کمتر از ۱/۲ کیلو ولت مشاهده شده است [۷]. اثر فن‌آوری پلاسما غیرحرارتی برای حذف ماده دارای ذرات ریز و کاهش انتشارات اکسیدنیترژن از خروجی موتور دیزل توسط حسین رحیم‌زاده و همکاران بررسی شده است. یک نمونه از خروجی تا دمای محیط سرد شد و از داخل یک رآکتور، تخلیه بین موانع دی‌الکتریک انجام شد. این رآکتور برای تولید پلاسما داخل موتور دیزل به کار گرفته شد. نتیجه مطلوب با توجه به غلظت انتشارات NO_x



شکل ۱ الف- نمای از پایین محفظه احتراق و ب- نمای از کنار محفظه احتراق (ورودی‌های هوا و سوخت و مشعل)



شکل ۲ تغییرات دما برای شبکه با ابعاد مختلف در ۴۵ mm از نازل.



شکل ۳ تغییرات سرعت مماسی برای شبکه با ابعاد مختلف در ۴۵ mm از نازل.

پیچیده همچون احتراق مناسب است.

۳- شرایط مرزی حرارتی برای دیواره محفظه به صورت شار حرارتی با استفاده از پروفیل ورودی و فرمول بارتز^۲ جهت محاسبه شار و ظرفیت حرارتی و ضریب گرمای هم رفتی و برای ورودی های هوا و پروپان، دما ثابت فرض و تنظیم شده است تا از اثرات اعمال مدل تشعشع بتوان با وارد کردن مشخصه های تشعشع بهره برد و مدل را بهتر شبیه سازی کرد. فرمول بارتز به صورت معادله ۱ آورده شده است:

$$h_g = \left[\frac{0.026}{D_i^{0.2}} \left(\frac{\mu^{0.2} C_p}{Pr^{0.6}} \right) \left(\frac{g^* (P_c)}{C^*} \right)^{0.8} \left(\frac{D_i}{R} \right)^{0.1} \right] \left(\frac{A_i}{A} \right)^{0.9} \sigma \quad (1)$$

h_g ضریب انتقال حرارت گاز، R شعاع انحنای محفظه احتراق (in)، σ ضریب تصحیح برای تغییرات خواص در لایه مرزی، A سطح در طول محور محفظه (in²), C^* محیط دیواره محفظه، g ضریب تبدیل جرم برابر با ثابت 12×32.12 in/s² است. مقدار σ بر اساس دمای سکون نازل، دمای محلی دیواره محفظه احتراق و عدد ماخ محلی به دست می آید. t اندیس اغتشاش و D قطر مقطع مورد محاسبه می باشد.

تنظیمات مربوط به حلگر و مدل های سیالاتی و حرارتی

پس از اعمال تغییرات و به دست آوردن مش نهایی بهینه، تنظیمات مربوط به روش های حل و نوع تنظیمات سیالاتی و حرارتی مورد استفاده در شبیه سازی می بایست مشخص گردند که به اختصار و جهت کوتاه کردن مطالب در جدول ۱ به اختصار آورده شده است و در ادامه و در بخش بعد به چگونگی و دلایل انتخاب این نوع تنظیمات اشاره خواهد شد.

ویژگی های تنظیمات استفاده شده برای شبیه سازی

۱- مدل RNG-KE دیفیوژن کمتری داشته و حتی برای جریان گذرا و شبهه گذرا که در این نمونه از محاسبات گونه پیزو ترانزینت انتخاب شده بود (احتراق در کل به صورت فیزیکی نا پایا است)، مناسب بود و نتایج خوبی داشت. این نمونه جهت توربولانس تعادلی مناسب است و با جدایش مشکل کمتری دارد و در کل به توابع دیوار تجربی نیاز کمتر دارد و یا نیازی ندارد.

۲- مدل لایه مرزی بهبود یافته wall treatment، ترکیبی از قانون جهانی دیواره^۱ و دو ناحیه لایه مرزی بهبود یافته است و برای جریان ها و شبیه سازی های

جدول ۱ تنظیمات مربوط به حلگر و مدل های سیالاتی و حرارتی در ورودی نرم افزار.

(نوع)	(اطلاعات سرعت)
Pressure Based	Absolute
Time	2D space
Steady	Planar
Energy	Radiation (تشعشع)
on	DO
Viscous Model	Species Model (مدل گونه ها)
Enhanced Wall Treatment • RNG KE	Eddy Dissipation • Species Transport
MHD Model (مدل هیدرو دینامیک مغناطیسی)	NO _x
Electrical Potential	Intermediate • Prompt • Thermal

1. Wall Global Law
2. Bartz Equation

در هر المان کاملاً همگن است.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + f \quad (3)$$

μ در معادله ۳ ویسکوزیته دینامیکی است. اگر معادله ۳ را به صورت باز شده بنویسیم به معادله ۴ خواهیم رسید که در راستای x است.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right) + f_x \quad (4)$$

بررسی نیروی الکتریکی [۱۰]

برای بررسی نیروی الکتریکی وارد بر سیال ابتدا پدیده باد یونی را بررسی می‌کنیم. در یک محرک الکترو هیدرودینامیکی واقع در داخل یک گاز مانند هوا، با برقراری یک اختلاف ولتاژ بالای الکتریکی بین دو الکترود آن (معمولاً یک الکترود سیمی یا سوزنی شکل به همراه یک الکترود صفحه‌ای) در اثر یونیزاسیون در مجاورت الکترود با شعاع انحنای کمتر، یون‌های مثبت ایجاد می‌شوند. این یون‌ها در طی رانده شدن از الکترود تزریق کننده یون (آند) به سمت الکترود جمع کننده یون (کاتد) در اثر نیروهای الکتریکی با ذرات خنثی سیال، تبادل اندازه حرکت انجام می‌دهند و باعث به حرکت درآوردن سیال می‌شوند و این حرکت انتقال القا شده در سیال را به اصطلاح باد یونی می‌نامیم. در درون شعله به دلیل ماهیت باردار بودن خود آن، این حرکت انتقالی بسیار موثر و مشهود تر صورت می‌گیرد.

مقدار نیروی جسمی الکتریکی بر واحد حجم از رابطه ۵ به دست می‌آید. رابطه ۵ با توجه به این فرض که قطبی شدن سیال تابعی خطی از میدان الکتریکی می‌باشد و تنها به چگالی بستگی دارد به دست آمده است.

$$\bar{f}_e = \rho_e \bar{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon - \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \right] \quad (5)$$

در رابطه ۵، E شدت میدان الکتریکی، چگالی حجمی بار الکتریکی، ε ضریب گذردهی الکتریکی

مدل تشعشع مورد استفاده در این شبیه‌سازی پس از اعمال چندین نوع مدل اولیه و با بررسی همگرایی و خروجی دما با قیاس با مدل تجربی و مدل شبیه‌سازی شده بدون میدان و با میدان تنظیم گردید که دو نوع مدل P_1 و DO مدد نظر بودند که مدل P_1 دارای دقتی مناسب و کمترین هزینه محاسباتی بود اما در همگرایی به صورت تناوبی همگرا می‌شد ولی در مدل دیگر یعنی DO همگرایی به صورت غیر متناوب بود و سرعت همگرایی از همان ابتدای شبیه‌سازی و پس از چند تکرار به خوبی مشاهده گشت و مدل DO نهایتاً انتخاب شد. لازم به یادآوری است که در مدل‌های P_1 و DO تنها می‌توان پراکنش یا scattering را مشاهده کرد. جهت اعمال پلازما به هوای غیر واکنشی کد جهت اعمال بر روی محفظه احتراق به صورت یک UDF وارد شده است.

روابط سیالاتی [۹]

با توجه به این که فرض‌های پیوستگی و بقای جرم برای مسأله برقرار است و سیال ما نیز سیالی نیوتنی می‌باشد، اصلی ترین معادله حاکم بر قسمت سیالاتی مسأله استفاده از قانون دوم نیوتن (بقای اندازه حرکت) در کنار بقای انرژی و قانون بقای جرم که مشتق از معادله اویلر هستند، می‌باشند. مجموع این قوانین منتج به معادله ناویر-استوکس می‌شوند و معادله ۲ آن را بیان می‌کند.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f \quad (2)$$

در رابطه ۲، V سرعت، ρ چگالی سیال، P فشار، T تانسور تنش، و f برابند نیروهای دیگر وارد شده به بدنه سیال می‌باشند. فرض تراکم‌ناپذیری برای سیالات تا جایی که شوک نداشته باشیم (جریان فراصوت نباشد) فرض قابل قبولی است. بنابراین با در نظر گرفتن این فرض و ساده کردن رابطه ۲ به معادله ناویر استوکس می‌رسیم که معادله ۳ می‌باشد. همچنین فرض شده است که سیال ما

رابطه ۱۰ تبدیل می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho_e \mu_e \bar{E}) = 0 \quad (10)$$

رابطه بین شدت میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی براساس معادلات ماکسول به صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود.

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (11)$$

در معادله ۱۱، B شار مغناطیسی یا همان بردار القای مغناطیسی می‌باشد. جریان الکتریکی که باعث القای میدان مغناطیسی (طبق قانون اورستد^۱) می‌شود، در حالت کلی برای جریان‌های کوچک در تخلیه کرونا بی اهمیت می‌باشد. بنابراین در غیاب میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی را می‌توان توسط قوانین الکترواستاتیک بیان کرد. یعنی رابطه ۱۱ به صورت رابطه ۱۲ در می‌آید.

$$\nabla \times \bar{E} = 0 \quad (12)$$

یا این که می‌توان میدان الکتریکی را به صورت گرادیان یک پتانسیل الکتریکی مطابق رابطه ۱۳ در نظر گرفت.

$$\bar{E} = -\nabla \phi \quad (13)$$

طبق روابط ماکسول چگالی شار الکتریکی و چگالی حجمی بار الکتریکی به صورت رابطه ۱۴ بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_e \quad (14)$$

که در رابطه ۱۴، D با توجه به رابطه ۱۵ بیان می‌گردد.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (15)$$

که ϵ ضریب گذردهی الکتریکی محیط می‌باشد. با ترکیب رابطه‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ حاصل می‌شود.

$$\nabla \cdot (\epsilon \bar{E}) = \rho_e \quad (16)$$

با جای‌گذاری بردار شدت میدان الکتریکی در رابطه ۱۶ برحسب گرادیان پتانسیل الکتریکی معادله ۱۷ به دست می‌آید.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) + \rho_e = 0 \quad (17)$$

با فرض ثابت بودن قابلیت گذردهی الکتریکی، ϵ معادله ۱۷

محیط و ρ چگالی سیال می‌باشد. برای پدیده باد یونی در یک گاز تراکم‌ناپذیر تنها مولفه نیروی جسمی وارد بر سیال، نیروی کولمبی^۱ خواهد بود. برای یک گاز تحت اثر میدان الکتریکی رابطه ۴ در راستای محور x به شکل رابطه ۶ در می‌آید.

$$\rho \frac{D(\bar{u})}{Dt} = \rho_e \bar{E} - \nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad (6)$$

در معادله ۶، \bar{u} مولفه افقی سرعت سیال در میدان محاسبه، P فشارنسبی سیال و μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. با توجه به رابطه ۶ ملاحظه می‌شود که با توجه به جمله نیروی جسمی الکتریکی نیاز به دانستن توزیع بار الکتریکی و نیز چگالی بار الکتریکی در سیال داریم. برای به دست آوردن این دو مورد می‌توان از قانون پایستاری بار الکتریکی و نیز قانون گوس در میدان الکتریکی (معادلات ماکسول) کمک گرفت. قانون پایستاری بار الکتریکی در رابطه ۷ بیان شده است.

$$\nabla \cdot \bar{J} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

در رابطه ۷، J چگالی بار الکتریکی بوده و مطابق رابطه ۸ بیان می‌شود.

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} + \rho_e \bar{u} + \rho_e \mu_e \bar{E} \quad (8)$$

در معادله ۸، μ_e معرف تحرک یونی می‌باشد. جمله‌های سمت راست معادله ۸ به ترتیب بیانگر مولفه‌های رسانشی، جابه‌جایی و تحرک یونی می‌باشند. در این معادله جمله مربوط به رسانش الکتریکی در گازها قابل صرف نظر کردن است. همین‌طور زمانی که سرعت جریان سیال در راستای افقی خیلی کمتر از سرعت تحرک بار الکتریکی باشد، جمله دوم نیز قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه رابطه ۸ به صورت رابطه ۹ در می‌آید.

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \bar{E}) = 0 \quad (9)$$

از طرفی هنگامی که ولتاژ اعمالی به الکترودها از نوع مستقیم باشد، درحالت پایا چگالی یون‌های تولیدی مستقل از زمان خواهند بود و جمله اول رابطه ۹ برابر صفر می‌شود. بنا بر این رابطه ۹ به

1. Columbus Force
2. Orsted law

همان‌طور که گفته شد در پلاسماهای غیرحرارتی، ذرات پلاسما در تعادل حرارتی قرار ندارند. بدین معنی که الکترون‌ها، یون‌ها و ذرات خنثی دارای دما و انرژی جنبشی متفاوتی هستند که در این بین الکترون‌ها به دلیل جرم کمتر دارای بیشترین دما هستند. الکترون‌هایی که در پلاسماهای غیرحرارتی وجود دارند، دارای انرژی زیادی هستند که به آنها اجازه می‌دهد رادیکال‌های آزاد را از دیگر مواد موجود در فاز گاز، عمدتاً گاز زمینه و نه آلاینده، تولید کنند. در ادامه از این رادیکال‌های آزاد برای از بین بردن آلاینده‌ها استفاده می‌شود. تخلیه کلی در این سیستم در برگیرنده تعداد زیادی تخلیه‌های بسیار کوچک است که هر چند دارای عمر کوتاهی هستند ولی جریان لحظه‌ای زیادی دارند. این آرایش با مانع دی‌الکتریکی، باعث به وجود آمدن یک تخلیه الکتریکی با قابلیت خود تمام‌کنندگی می‌شود که نسبتاً مستقل از شکل موج ولتاژ ورودی است. عملاً هر یک از این تخلیه‌های بسیار کوچک، منبعی برای پلاسماهای غیرحرارتی است که مشخصه آنها نیز الکترون‌های انرژی داری است که قادر است رادیکال‌های آزاد بسیار فعال تولید کنند. مکانیسم پلاسما هنگام تخریب آلاینده‌ها بسیار پیچیده است و برای شناخت این مکانیزم تحقیقات وسیعی در دست انجام است. خوشبختانه برای استفاده مناسب از این تکنولوژی نیازی به دانستن مکانیزم کامل آن نیست.

مبانی نظری و ترمودینامیکی استفاده شده برای

محاسبات آلاینده‌ها [۱۲]

نحوه شکل‌گیری و محاسبه اکسیدهای نیتروژن NO_x به وسیله چهار مکانیزم تشکیل می‌شود. اولین مکانیزم، مکانیزم NO_x حرارتی است که به وسیله غلظت‌های مولار اکسیژن و نیتروژن در دمای احتراق بالاتر از 1300°C تشکیل می‌شود. مکانیزم

به صورت معادله ۱۸ درمی‌آید که یک معادله پواسون^۱ می‌باشد.

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon} \quad (18)$$

قابلیت روش پلاسماهای غیرحرارتی در حذف آلاینده‌ها [۱۱]

در سال‌های اخیر از سیستم‌های مختلف پلاسماهای غیرحرارتی برای حذف انواع آلاینده بهره گرفته شده است. بعضی از این سیستم‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی و برخی دیگر در مقیاس صنعتی ساخته و راه‌اندازی شده‌اند. اساساً انجام تست‌های آزمایشگاهی و نیمه صنعتی برای فهمیدن امکان‌پذیری تکنیک و فهم جنبه‌های فرآیندی تکنیک انجام می‌شود و سیستم‌های صنعتی برای حصول به پارامترهای اقتصادی مثل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه جاری ایجاد می‌شوند. واحدهای صنعتی همچنین از دیدگاه مقیاس‌پذیری اصول فرآیند نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. پلاسماهای غیرحرارتی قادرند گازهایی با حجم کم یا زیاد را تصفیه کنند که این مزیت باعث خواهد شد این فن آوری برای محدوده وسیعی از فرآیندها قابل استفاده باشد. در روش پلاسماهای تخلیه بدون صدا از انرژی الکتریکی جهت ایجاد مقدار زیادی رادیکال‌های آزاد بسیار فعال در یک محیط گازی استفاده می‌شود و نکته اصلی آنکه در دمای محیط انجام می‌پذیرد. در ادامه این رادیکال‌ها با آلاینده‌های موجود در جریان گاز واکنش کرده و باعث اکسیداسیون تقریباً کامل ترکیبات آلی به CO_2 و H_2O می‌شوند و ترکیباتی از قبیل کلر، گوگرد و نیتروژن نیز به HNO_3 ، H_2SO_4 ، HCl تبدیل خواهند شد. فن آوری پلاسماهای غیر حرارتی قادر است به طور همزمان تعداد زیادی از آلاینده‌ها از قبیل VOC^2 ، SO_x ، و NO_x و ترکیبات آلی کلرینه و سولفونه شده را که در اغلب گازهای صنعتی وجود دارند را حذف کند که این یکی دیگر از مزایای این فن آوری است.

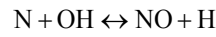
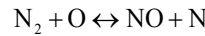
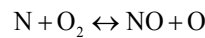
1. Poisson Equation

2. Volatile Organic Compounds

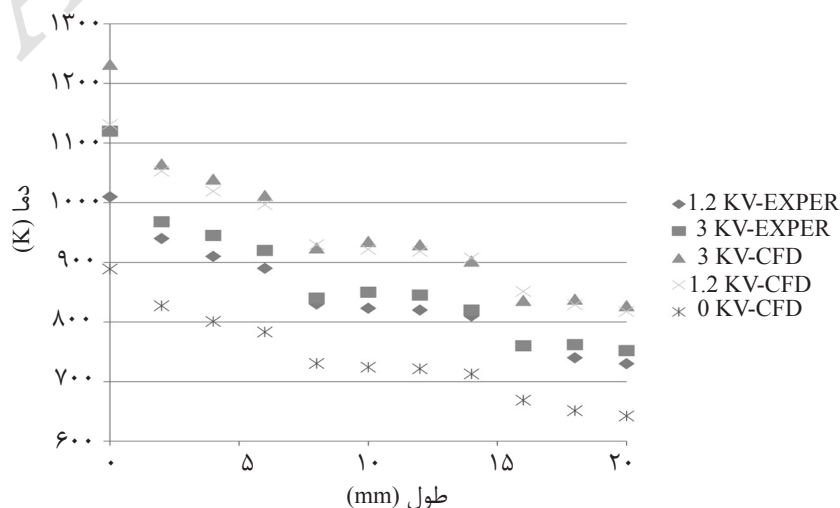
نتایج حاصل از اعمال میدان در حالت سه بعدی

در شکل‌های ۴ و ۵ در فاصله ۴۵ mm از نازل، ناحیه تاثیر این نیروی الکتریکی به شدت ناچیز بوده و تقریباً می‌توان گفت به جز در ناحیه نزدیک به خط مرکزی که مقادیر دمایی به میزان کمی دستخوش تغییر شده در سایر نقاط توزیع دما تغییر چندانی از خود نشان نمی‌دهد. با پیشروی در طول محفظه و عبور از محل اعمال عملگر پلاسما، ناحیه تاثیرپذیری گسترش یافته و شعاع بیشتری را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. یکنواخت شدن و همگن‌تر شدن توزیع دما در نزدیکی خط مرکزی به علت اختلاط و آشفتنگی ایجاد شده به وسیله نیروی حجمی القا شده عملگر پلاسما می‌باشد. همچنین وقوع ماکزیمم دما در ناحیه‌ای بین خط مرکزی و دیواره به علت ایجاد ناحیه چرخشی ایجاد شده در ناحیه اختلاط سوخت و هوا می‌باشد. نتایج به دست آمده حکایت از یکنواخت تر شدن توزیع دما به صورت شعاعی داخل محفظه و کاهش دمایی ماکزیمم و در نتیجه کاهش آلایندگی NO_x تولید شده دارد. نتایج به دست آمده نشان دهنده کاهش دمایی ماکزیمم در اثر اعمال عملگر پلاسما می‌باشد که این موضوع خود عاملی برای کاهش میزان آلایندگی مضر و خطرناک تولید شده به وسیله ماکزیمم حرارتی می‌باشد.

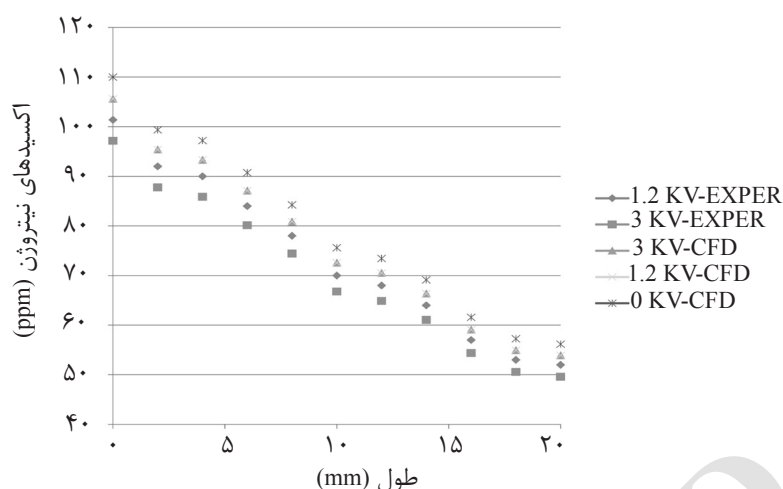
زدوویچ (Zeldovich) توسعه یافته برای تشکیل NO_x حرارتی به کار برده می‌شود.



چون شکستن پیوند سه گانه N_2 و تشکیل N نیاز به حرارت بالا دارد، در نتیجه تشکیل NO_x حرارتی در دمایی بالاتر از 1600°C اهمیت دارد. در کل برای تشکیل NO_x حرارتی زمان، دما و در دسترس بودن اکسیژن به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته می‌شوند. دومین مکانیزم، مکانیزم فوری (PROMPT) است که از مولکول نیتروژن در مخلوط با سوخت در شرایط سوخت غنی شکل می‌گیرد. این نیتروژن، سپس در طول سوخت اکسید می‌شود و به NO_x تبدیل می‌گردد. سومین مکانیزم، مکانیزم NO_x سوخت است، یعنی سوخت‌هایی که حاوی نیتروژن هستند می‌توانند تولید NO_x نمایند. در آخر تولید NO_x از N_2O میانی، در این نوع مکانیزم که در نسبت‌های هم ارزی کمتر از ۰/۸ و در دماهای پایین معمولاً رخ می‌دهد، N_2O تولید NO_x می‌کند، اتم اکسیژن به مولکول نیتروژن در حضور عنصر سوم حمله کرده و N_2O تولید می‌کند. N_2O با اتم اکسیژن واکنش داده تا NO_x تشکیل شود معمولاً در سیستم‌های احتراقی NO مهم است نه NO_2 ولی در احتراق پیش آمیخته NO در دماهای پایین به NO_2 تبدیل می‌شود.



شکل ۴ مقایسه دمایی بین شبیه‌سازی و کار تجربی در ۴۵ mm از نازل با قطبیت مثبت، $S=0$ ، $Re=1500$ ، $pH=1$.



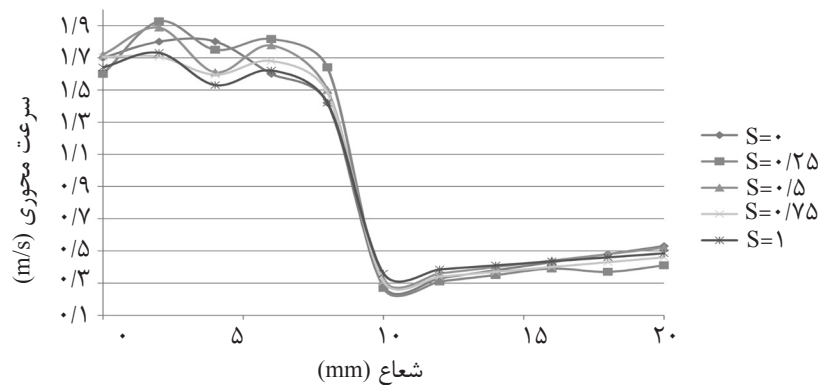
شکل ۵ مقایسه ناکس تولید شده بین شبیه‌سازی و کار تجربی در ۴۵ mm نازل با قطبیت مثبت، $pH=1$ ، $Re=1500$ ، $S=0$.

بر پروفیل سرعت دارد. این اثر به صورت کاهش سرعت محوری در وسط محفظه و افزایش آن در نزدیک دیواره‌ها نمایان می‌باشد. علاوه بر روند کاهش سرعت محوری در مرکز محفظه، بیشینه سرعت محوری به صورت محسوس‌تری به سمت دیواره‌ها متمایل می‌گردد. دلیل این امر کاهش مومنتوم جریان در نزدیکی خروجی و در نتیجه افزایش تأثیر نیروی جانب مرکز ناشی از جریان چرخشی می‌باشد.

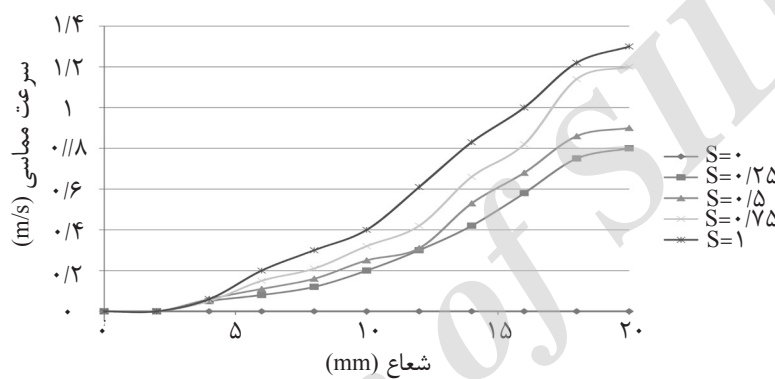
در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده در مقایسه با کار تجربی در ۴۵ mm نازل برای آلاینده‌های حاصل از احتراق از جمله ناکس و کربن دی‌اکسید و نیز انتهای محفظه با قطبیت منفی الکتروود مرکزی آورده شده است که در آن کاهش این آلاینده‌ها در انتهای محفظه به خوبی مشاهده می‌گردد. قطبیت به کار گرفته شده منفی و عدد رینولدز ۱۵۰۰ و نسبت هم‌ارزی ۱/۱ است. عدد چرخش نیز یک فرض شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه از مرکز محفظه دورتر می‌شویم از شدت آلاینده‌گی کاسته شده است. یکی دیگر از عواملی که با این امر به موازات عمل می‌کند، گردشی بودن جریان است که آن نیز محصولات شرکت نکرده در عمل سوخت را به فرآیند واکنش و احتراق باز می‌گرداند.

تغییرات سرعت‌های مماسی و محوری به دیواره تحت تأثیر میدان الکتریکی در اعداد چرخش مختلف و تغییرات ولتاژ

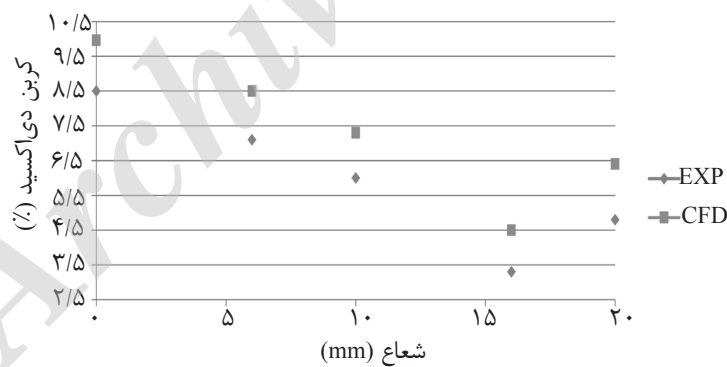
در شکل‌های ۶ و ۷ به بررسی تغییرات سرعت‌های مماسی و محوری تحت اثر ولتاژ ۲۰۰۰ V و برحسب اعداد چرخش مختلف (S از ۰ تا ۱) از ۱۰ mm و ۴۵ mm از نازل پرداخته شده است. در بررسی این نمودارها نکاتی را می‌توان اشاره نمود. در دو طرف برنر به دلیل سرعت بالای جت، گردابه تشکیل می‌شود. ذرات در خروجی محفظه احتراق دارای افت مومنتوم شده و سرعتی در جهت موازی با محور محفظه احتراق دارند. هنگامی که نیروی میدان الکتریکی (که به سمت مرکز محفظه احتراق است) روی ذرات یونی اثر می‌گذارد، آنها را به سمت الکتروود هدایت کرده و سرعت آنها را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است برای $S=0$ از این روش استفاده شد که تمامی ورودی‌های هوا بسته و هوا به طور عمودی در راستای موازی با ورودی سوخت وارد محفظه و نازل گردید. عدد رینولدز ۱۵۰۰ و نسبت هم‌ارزی ۱/۱ لحاظ شده است. چرخش جریان سبب ایجاد یک جریان معکوس در محدوده‌ای بین ۱۰ تا ۴۵ mm از مرکز محفظه می‌گردد. در مقاطع میانی با کاهش سرعت محوری نسبت به مقطع قبلی، نیروی جانب مرکز حاصل از چرخش اثر محسوس‌تری



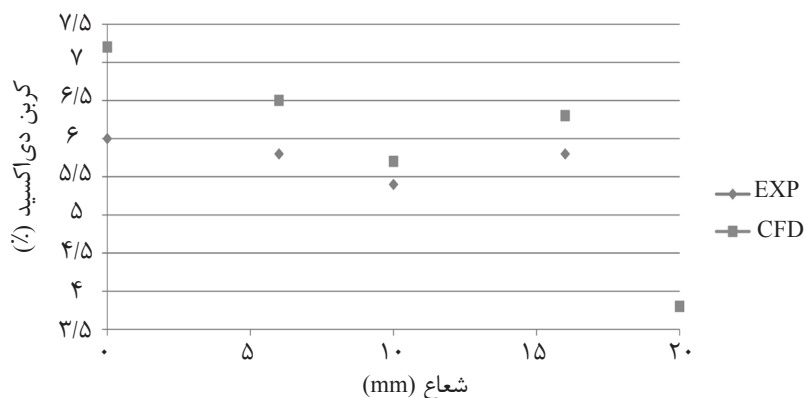
شکل ۶ تغییرات سرعت محوری نسبت به عدد چرخش‌های مختلف در ۱۰ mm بعد از نازل برای $\theta=1/1$ ، $Re=1500$ ، ولتاژ ۲۰۰۰ V و قطبیت مثبت.



شکل ۷ تغییرات سرعت مماسی نسبت به عدد چرخش‌های مختلف در ۴۵ mm بعد از نازل برای $\theta=1/1$ ، $Re=1500$ ، ولتاژ ۲۰۰۰ V و قطبیت مثبت.



شکل ۸ مقایسه CO_2 میان شبیه‌سازی با کار تجربی در ۴۵ mm از نازل، $\theta=1/1$ ، $Re=1500$ و $S=1$ و قطبیت منفی.



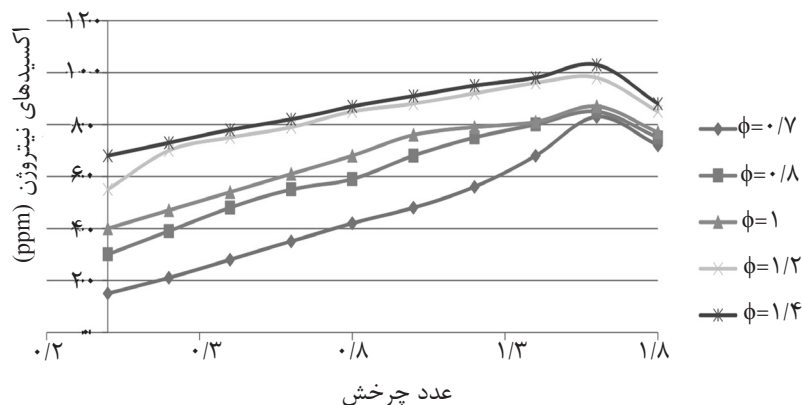
شکل ۹ مقایسه CO_2 میان شبیه‌سازی با کار تجربی در انتهای محفظه، $\theta=1/1$ ، $Re=1500$ و $S=1$ و قطبیت منفی.

تأثیرات عدد چرخش و ولتاژ بر آلاینده‌ها

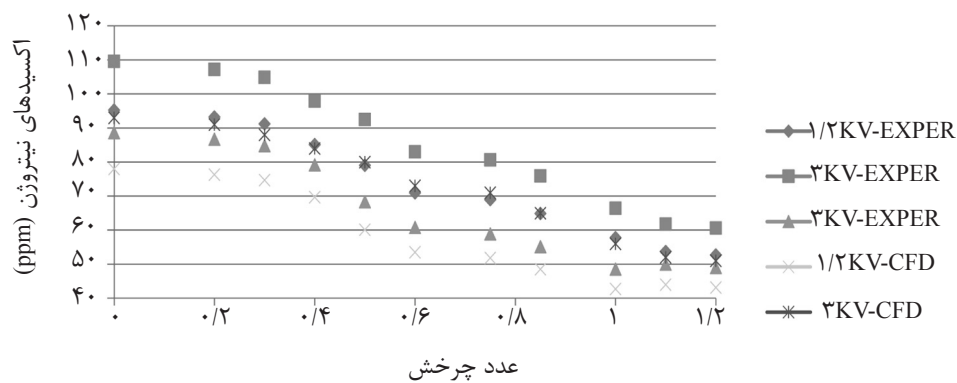
چرخش نه تنها می‌تواند بر مشخصات احتراق اثر بگذارد، بلکه بر تشکیل NO_x نیز تأثیرگذار است. چرخش، روشی برای پایدار کردن شعله، بالا بردن و کنترل انتقال حرارت است و بازده احتراق را افزایش می‌دهد که برای رسیدن به این نیازمندی‌ها، چند نوع مشعل چرخشی ساخته شدند. با استفاده از چرخش می‌توان ترکیبات نسوخته را به احتراق بازگرداند و احتراق کامل‌تر صورت گیرد. بعضی پژوهشگران افزایش در تشکیل NO_x را با افزایش در عدد چرخش گزارش می‌دهند، دیگر محققین کاهش در تشکیل NO_x را با افزایش در عدد چرخش گزارش می‌دهند. تأثیر عدد چرخش بر روی NO_x یک پدیده مرکب است. تغییر عدد چرخش بر ناحیه جریان، شامل محل، اندازه، ناحیه برگشت و دمای شعله، توزیع غلظت گونه‌ها و شدت آسفتگی اثر خواهد گذاشت. همه این پارامترها در تشکیل NO_x موثر است، اما مشخص نیست که کدام تأثیر بیشتری بر روی تشکیل NO_x دارد. همچنین نظر صحیح از تأثیر دگرگونی اغتشاش بر روی تشکیل NO_x با چرخش ثابت وجود ندارد. نقص سیستم عددی جواب دادن به این سوالات را مشکل می‌سازد. در شکل ۱۰ افزایش عدد چرخش نرخ اختلاط بین سوخت و هوا را افزایش می‌دهد، همچنین محل وقوع بیشینه دما با افزایش عدد چرخش به سمت ورودی برنر نزدیک‌تر می‌شود،

این جابجایی به دلیل کاهش طول ناحیه احتراق شعله‌های پخشی با افزایش عدد چرخش می‌باشد. اما با افزایش عدد چرخش از ۰/۷ به ۱/۴، دما در خروجی کاهش می‌یابد که این موضوع بر میزان تشکیل NO_x اثر خواهد گذاشت. با افزایش اغتشاش در عدد چرخش ۱/۸، مقداری از محصولات احتراق تشکیل شده در ابتدای شعله بازگشت کرده و مجدداً وارد واکنش می‌شوند و از آن جهت که برخی از گونه‌های موجود دارای ظرفیت حرارتی بالایی هستند حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده که این دو عامل باعث کاهش NO_x در عدد چرخش بالا می‌شود. در کل در چرخش بالا بازگشت گازهای خروجی در ناحیه نزدیک شعله ایجاد می‌شود. البته این پدیده در محفظه‌های احتراق مختلف، متفاوت است. قطر محفظه احتراق برای این موضوع بسیار موثر است تا فضایی برای ایجاد برگشت وجود داشته باشد. نتایج کلی برای نمودارهای ۱۰ و ۱۱ به صورت زیر است:

- با افزایش عدد چرخش، دما در خروجی محفظه احتراق ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.
- با افزایش عدد چرخش، NO_x در خروجی محفظه احتراق ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.
- با افزایش عدد چرخش، بیشینه دما و در نتیجه NO_x به داخل ناحیه جریان متمایل می‌شود.
- بیشترین مقادیر NO_x در روی محور تقارن محفظه احتراق وجود دارد.



شکل ۱۰ میانگین غلظت NO_x در خروجی بر حسب عدد چرخش



شکل ۱۱ تغییرات NO_x نسبت به ولتاژهای مختلف و عدد چرخش در انتهای محفظه با پلاریته منفی، $\theta = 1$ ، $\text{Re} = 1500$.

از کل NO تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه در عددهای چرخش بالا باید راهکار کاهش NO در جهت مقابله با تولید NO فوری باشد. با اعمال ولتاژ، سرعت فراورده‌ها رفته رفته کم شده و به نقطه عطفی رسیده و پس از آن افزایش می‌یابد و در خروجی محفظه احتراق در حالتی که ولتاژ اعمال شده است، نسبت به حالتی که اختلاف پتانسیلی بین الکترود و دیواره وجود ندارد، افزایش چشمگیری در سرعت ذرات به چشم می‌خورد. میدان الکتریکی با پلاریته مثبت یا منفی باعث ایجاد گردابه‌هایی در اطراف نازل می‌شوند. همچنین میدان الکتریکی با پلاریته مثبت با اثر جریان چرخشی هم‌سو بوده و سرعت مماسی را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با بررسی کلی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی و عملی صورت گرفته می‌توان به آینده استفاده از میدان الکتریکی در صنایع مرتبط با احتراق امیدوار بود. در دهه‌های اخیر فعالیت‌های گسترده‌ای بر روی بهبود عملکرد فرآیند احتراق انجام شده است که قسمت بزرگی از این تحقیقات بر روی احتراق آشفته بوده است. یکی از راه‌های جدید در بهبود انتقال حرارت، کنترل فرآیند احتراق و کاهش میزان آلاینده NO_x تولید شده در آن استفاده از عملگر پلاسما می‌باشد. با توجه به روند افزایشی تولید گازهای گلخانه‌ای، اثر میدان الکتریکی بر تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق

چرخش باعث برگشت محصولات احتراق در نزدیکی ناحیه جریان ورودی می‌شود. یکی از مسائل مهم در یک محفظه احتراق پایدارسازی شعله می‌باشد. ایجاد جریان چرخشی با استفاده از چرخاننده جریان و همچنین استفاده از جریان‌های متقاطع و برخوردی جهت ایجاد جریان برگشتی دو روش متداول پایدارسازی شعله می‌باشد. از طرف دیگر افزایش آلودگی محیط‌زیست، تلاش برای رسیدن به شعله‌های صنعتی با آلاینده‌گی پایین‌تر را افزایش داده است. یکی از این آلاینده‌ها، اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. آلاینده اکسید نیتروژن NO_x که تشکیل شده از $(\text{NO}, \text{NO}_2, \text{N}_2\text{O})$ منجر به تشکیل باران‌های اسیدی، مه‌های فتوشیمیایی و سوراخ شدن لایه اوزون می‌شود. کاهش دمای احتراق، کاهش زمان ماندن گازها در شعله و جلوگیری از تشکیل نقاط موضعی با دمای بالا از اقدامات اولیه برای کاهش اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. در محفظه احتراق‌های متداول روش‌های مختلفی برای کاهش آلاینده استفاده می‌شود که مورد مطالعه محققان بسیاری بوده است.

در نمودار ۱۱ با افزایش عدد چرخش و در نتیجه کاهش دمای محفظه احتراق نسبت تولید NO فوری به NO حرارتی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر از اهمیت مکانیزم حرارتی تولید NO کاسته شده و بر اهمیت مکانیزم فوری افزوده می‌شود. در واقع با کاهش تولید NO حرارتی به دلیل کاهش دمای محفظه احتراق، مکانیزم NO فوری درصد بیشتری

میلیون دلار سرمایه‌گذاری انجام شود که به این رقم باید عدد ۴۰-۵۰ میلیون دلار هزینه راهبری سالانه را نیز اضافه کرد که رقم بالایی خواهد شد. باید توجه داشت که هزینه حذف NO_x در حد قابل قبول کمتر از مقدار فوق نبوده و احتمالاً از این ارقام نیز فراتر خواهد رفت چون کنترل NO_x اساساً کار پیچیده‌ای است و علت عمده ورود نیتروژن نیز از هوای ورودی برای احتراق است که امکان حذف آن از فرآیند احتراق وجود ندارد. اگر یک سیستم انعطاف پذیر و چند منظوره وجود داشته باشد که بتوانند در فصول گرم وظیفه حذف NO_x و در فصول سرد وظیفه حذف همزمان NO_x و SO_x را انجام دهند، می‌توان ادعا کرد که هدف نهایی از تصفیه آلاینده‌ها حاصل شده است. موضوع دیگر پایین بودن هزینه راهبری سیستم‌های پلاسماهای غیرحرارتی است.

می‌تواند یکی از تحقیقات پیشنهادی باشد. همچنین تولید محصولات جانبی کاربردی مثل ذرات دوده، در پدیده جدایش کربنی، می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. یکی از کاربردهای مهمی که برای این پدیده می‌توان در نظر گرفت، اثر میدان الکتریکی در کاهش مصرف سوخت در احتراق می‌باشد. این امر می‌تواند برای موتورهای خودرو و هواپیما مورد بررسی قرار گیرد. فراتر از این می‌توان با استفاده از میدان الکتریکی در موتور هواپیما، نیروی پیش رانش را افزایش داد، که این امر می‌تواند حتی از بروز برخی سوانح در شرایط جوی ناپایدار جلوگیری نماید. عمده‌ترین مزیت این فن‌آوری حذف همزمان NO_x و SO_x است. بر اساس تحقیقات انجام شده برای حذف SO_x با استفاده از سنگ‌آهک به ازای هر کیلووات ظرفیت نیروگاه باید بین ۱۴۰-۱۰۰ دلار سرمایه‌گذاری کرد. یعنی برای یک نیروگاه هزار مگاواتی باید برای این سیستم بین ۱۴۰-۱۰۰

منابع

- [1]. Zake M. and Barmina I., "Electrical processing of soot formation and carbon sequestration from the swirling flame flow," International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing Hannover, pp. 331-336, 2003.
- [2]. Noorani R. I. and Holmes R. E., "Effects of electric fields on the blow off limits of a methane-air flame," AIAA Journal, Vol. 23, pp. 1452-1454, No. 9, 1985.
- [3]. Zake M., Barmina I. and Turlajs D., "Electric field control of polluting emissions from a propane flame," Global Nest: the Int. J. No 2, pp. 95-108, Vol 3, 2001.
- [4]. Starikowskii A., "Influence of weak electric fields on the flame structure," 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, UK, Sept. 2008.
- [5]. Jaffre Y. N. and Aka-Ngnui Th., "Non thermal plasma for nox treatment," IMETI, Orlando, United States, Sep. 2009.
- [6]. Barnaveli A., "Place a flame (e.g. from a bunsen burner), between two charged parallel metal plates," Archive. iyppt. org/IYPT_Proc_2010-2011, 2010.
- [7]. Zake M. and Tulaji D., "Electric field control of polluting emissions from a propane flame," www.researchgate.net, 2014.

- [8]. Talebizadeh P., Rahimzadeh H. and Babaie M., "Evaluation of residence time on nitrogen oxides removal in non-thermal plasma reactor," Published online doi: 10.1371/journal.pone.0140897, PMID: PMC4619676, October 2015.
- [9]. www.cfdonline.com.
- [10]. K Chen D., "Field and wave electromagnetics," (Second Edition ed.), New York, Addison-Wesley ISBN0-201-12819-5, 1985.
- [11]. Codin R., "A discontinuity-capturing crosswind-dissipation for the finite element solution of the convection-diffusion equation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp. 325-342, 1993.
- [12]. Baukal Ch. E., "The john zink combustion handbook," CRC pres, ISBN-10:084932337, 2006.

Archive of SID