

ICHMT2017-XXXX

تحلیل عددی پایداری کردن شعله‌های پیش آمیخته با ظرفیت‌های حرارتی مختلف با روش شمک

حمید کاوری^۱، محمد مقیمان^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، فردوسی مشهد، kavari@mail.um.ac.ir
^۲استاد، فردوسی مشهد، moghiman@um.ac.ir

چکیده

با وجود تلاش‌های فراوان به منظور توسعه و رشد انرژی‌های تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، بادی و هسته‌ای همچنان ۸۵٪ انرژی تولیدی جهان توسط سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز تولید می‌شود. همواره یکی از اهداف پژوهشگران افزایش ظرفیت سیستم‌های احتراقی می‌باشد. به علاوه با افزایش روزافزون آلاینده‌های هوا، سلامت انسان و طبیعت به خطر افتاده است. به همین سبب استفاده از سیستم‌های با ظرفیت بالا و آلاینده‌گی کم یکی از اهداف اصلی پژوهشگران است. احتراق پیش آمیخته دارای ویژگی‌های مدنظر بوده و تنها پایداری آن‌ها دشوار بوده که در این پژوهش یک از روش‌های پایداری مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله مشعل سیدنی که احتراق پیش آمیخته‌ی همراه با شمک را پایداری می‌کند، مدل‌سازی شده است. این مشعل شامل سه جریان جت اصلی، شمک و جریان کمکی است که در این مقاله سرعت جت اصلی از ۵۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه با ۴ گام تغییر کرده و اثر افزایش سرعت بر پارامترهای احتراقی و آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در پایداری شمک احتراق پیش آمیخته میزان انتشار آلاینده‌های احتراق بسیار کمتر انواع دیگر احتراق است. همچنین در این پایداری با افزایش سرعت میزان تولید آلاینده‌های CO_2 و NO_x افزایش می‌یابد ولی میزان تولید CO کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت به بیش از ۲۰۰ متر بر ثانیه پایداری شمک موجب ناپایداری در احتراق می‌شود.

واژه‌های کلیدی

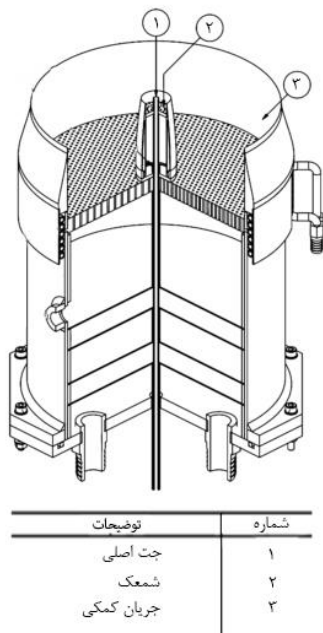
احتراق پیش آمیخته، پایداری شمک، تحلیل عددی، ظرفیت حرارتی مشعل

مقدمه

با وجود تلاش‌های فراوان به منظور توسعه و رشد انرژی‌های تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، بادی و هسته‌ای همچنان ۸۵٪ انرژی تولیدی جهان توسط سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز تولید می‌شود [۱]. سوخت‌های فسیلی یکی از منابع اصلی تأمین انرژی حمل‌ونقل، گرمایش و تولید انرژی هستند که بهترین حالت احتراق هیدروکربن‌ها و هوا منجر به تولید آب و CO_2 می‌شود که CO_2 از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای بوده که باعث گرمایش عمومی زمین شده است. در حالی که همواره احتراق به صورت کامل صورت نگرفته و همیشه محصولات میانی همچون CO ، NO_x و سوت، که آلاینده‌ی

هوا هستند و موجب به خطر افتادن سلامت انسان و باعث گرمایش عمومی می‌شوند، تولید می‌کند. تغییرات اقلیم باعث افزایش تمرکز بر سامانه‌هایی با تولید کم CO_2 و دیگر آلاینده‌ها شده است. بازدهی بالا، انتشار آلاینده‌ی کم و عملکرد پایدار در شرایط مختلف از مشخصه‌های اصلی مشعل‌های احتراقی امروزی است. که به منظور دستیابی به این مهم احتراق پیش آمیخته دارای بازدهی بالا و احتراقی تمیز با آلاینده‌گی کم است. احتراق پیش آمیخته به علت حساسیت به دینامیک احتراق دارای روش‌های مختلفی به منظور پایداری است که در این مقاله به پایداری و بررسی پارامترهای آلاینده‌ای در روش پایداری شمک پرداخته می‌شود. دو حوزه‌ی پایداری برای شعله‌های آرام وجود دارد. حوزه‌ی اول مربوط به توانایی احتراقی مخلوط سوخت و اکسیدکننده در توسعه‌ی شعله است که به شدت وابسته به ترکیب شیمیایی واکنش‌دهنده می‌باشد. در این حالت می‌توان نقطه‌ای تعریف کرد که در آن نرخ واکنش‌ها، انتقال حرارت و تولید رادیکال‌ها باعث عدم توسعه‌ی شعله و خاموشی آن می‌شود. حوزه‌ی دوم محدودیت مربوط به ترکیب جریان و رابطه‌اش با شعله‌ی آرام است. این محدودیت شامل پدیده‌هایی همچون فلاش‌بک، بلوف، شروع آشفتنگی و محدودیت‌های پایداری شعله‌ی آرام در شرایط آزمایشگاهی را بیان می‌کند. تقریباً بیشتر دستگاه‌های احتراقی کاربردی شرایطی آشفته را برای جریان سوخت و اکسیدکننده و ترکیب سوخت و اکسیدکننده ایجاد می‌کنند زیرا در جریان آشفته می‌توان نرخ مصرف واکنش‌دهنده‌های بالاتری را نسبت به جریان شعله‌ی آرام استفاده کرد. در نتیجه نرخ بالاتر مصرف واکنش‌دهنده‌ها باعث بالاتر رفتن انرژی تولیدی مشعل احتراقی در ابعاد یکسان می‌شود. شعله‌های پیش آمیخته بسیار تحت تأثیر شیمی و شرایط جریان بوده و دچار نوسانات و ناپایداری‌هایی می‌شوند که استفاده‌ی آن‌ها را مشکل‌تر می‌کند. با توجه به کاربرد بیشتر جریان‌های آشفته در مسائل کاربردی و عملی در این مقاله به افزایش پایداری شعله‌های پیش آمیخته پرداخته شده است. سرعت شعله‌های آرام سوخت‌های هیدروکربن در هوا به ندرت بیش از ۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه تجاوز می‌کند و چنانچه این سرعت برای شعله‌ی آشفته هیدروکربن‌ها به دست آورده شود حداقل چند صد سانتی‌متر بر ثانیه خواهد بود [۲]. به منظور افزایش ظرفیت مشعل‌های احتراق پیش آمیخته، با افزایش سرعت جریان ورودی و استفاده از روش‌های مختلف، شعله پایدار می‌شود. در این مقاله به بررسی پایداری شمک احتراق پیش آمیخته پرداخته می‌شود. روش پایداری شمک یکی از روش‌های پایداری شعله‌های پیش آمیخته‌ی

مورد بررسی قرار دادند. اندازه گیری حاصل ضرب غلظت مولی می دهد. کاهش این مقدار نشان دهنده ی کاهش واکنش است و کاهش دمای میانگین برای مشعل های با سرعت بالاتر و رو به سرعت جت را نشان



شکل ۱: شماتیک مشعل سیدنی [۴]

داد منوکسید کربن و رادیکال های هیدروکسید کاهش تدریجی آن ها در طول مشعل و کاهش کلی آن ها با افزایش سرعت جت را نشان خاموشی رفتن شعله نشان داد. همچنین نتایج آزمایشگاهی با اندازه گیری دما روند افزایش ضخیم شدن ناحیه ی واکنش با افزایش که مبنی بر افزایش برهم کنش آشفته گی و ناحیه ی واکنشی در سطوح بالاتر آشفته گی است. روینسکی و پاپ [۶] به مدل سازی عددی مشعل جت پیش آمیخته ی شمعک با استفاده از روش تابع توزیع احتمال پرداختند. آن ها مشعل جت پیش آمیخته ی شمعک سیدنی که توسط دان و همکاران به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته بود را انتخاب کردند. آن ها در شعله با کمترین سرعت به تطابق خوبی در گونه ها و دما، با نتایج آزمایشگاهی دست پیدا کردند به جز ناحیه ای کوچک نزدیک به خط مرکزی، ولی در مدل با بیشترین سرعت این تفاوت ها بسیار شدید بوده و بررسی های مختلفی بر عوامل مؤثر از جمله شرایط مرزی ورودی، ثابت های مدل آشفته گی، اثر تشعشع و مکانیزم های شیمیایی انجام شد تا نشان دهند هر یک اثر جزئی بر بهبود تطابق دارد. در نهایت محاسبات بهبود یافته تنها با آهسته کردن مصنوعی واکنش های شیمیایی از مرتبه ۱۰ ممکن شد. چن و ایهم [۷] مشعل جت پیش آمیخته ی شمعک سیدنی را با مدل سازی گردابه های بزرگ برای هر چهار حالت آن مدل سازی کردند. مقایسه های آماری و ترموشیمیایی نتایج نشان داد مدل توانایی پیش بینی حوزه ی جریان، دما و پروفیل ذرات بزرگ را دارد. اما مدل سازی ها بیش پیش بینی مصرف سوخت برای مدل های

پرسرعت است که در این روش همراه مخلوط سوخت و اکسیدکننده، جریان داغ شعله ای به موازات واکنش دهنده ها وارد محفظه شده و نقش شمعک را برای توسعه ی همیشگی شعله ایفا می کند. به علت تماس شعله و واکنش دهنده ها، شعله در واکنش دهنده ها توسعه یافته و مشتعل می شود. موری [۳] به بررسی جریان پرسرعت پیش آمیخته ی متان و هوا که به موازات جریانی گازهای داغ وارد محفظه ی احتراق می شد، پرداخت. موری به بررسی اثر نسبت هم آرزوی در توسعه ی شعله پرداخت که بر اساس پروفیل فشار دیواره و همچنین جبهه ی شعله نشان داد در نسبت های هم آرزوی نزدیک به نسبت استوکیومتری توسعه ی شعله بهتر صورت گرفته و با افزایش سرعت ورودی طول شعله بیشتر می شود. همچنین با اندازه گیری های لیزری نشان دادند، احتراق باعث ایجاد گرادیان های سرعت عرضی شده و همچنین باعث ایجاد نوسانات سرعت محوری می شود. در این مقاله شعله ی پیش آمیخته ی شمعک سیدنی که توسط دان و همکاران [۴] شبیه سازی و بررسی گردیده است. دان و همکاران [۴] به منظور بررسی نرخ محدود شیمیایی در جریان های بسیار آشفته ی پیش آمیخته ی کم سوخت، مشعل پیش آمیخته ی شمعک دار را طراحی کردند که این مشعل شامل یک جریان پرسرعت پیش آمیخته ی کم سوخت در جت مرکز است که توسط شمعکی با جریان کم سرعت پیش آمیخته با نسبت استوکیومتری پایدار شده و در شعاع بزرگ تر جریان کمکی محصولات احتراق کم سوخت هیدروژن و هوا احاطه شده است که باعث رقیق شدن و خاموش شدن شعله ی اصلی نشود. آن ها به بررسی چهار سرعت جت مختلف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر بر ثانیه با عنوان کلی PM1 پرداختند. آن ها دریافتند با افزایش سرعت جت اصلی ضخامت شعله افزایش پیدا می کند و علت آن افزایش شدت آشفته گی می باشد که سبب افزایش ضخامت شعله شده است. همچنین غلظت مولی OH در PM1-50 در دماهای بالا ($1400 <$) همراه با شعله یکنواخت بوده و در سرعت های بالا به علت واکنش ها از یکنواختی آن کم شده و در بیشترین سرعت مقدار آن به کمترین حد ممکن رسیده است. دان و همکاران اندازه گیری های سرعت لیزر داپلر برای پروفیل سرعت محوری، متوسط و مجذور میانگین سرعت میدان جریان در حالت احتراقی و غیر احتراقی ارائه کردند. نتایج نشان داد، اثر شمعک بالا بردن مکان بیشترین شدت آشفته گی در پایین دست جریان در حالت احتراقی نسبت به غیر احتراقی است. و در نتیجه ضرورت وجود شمعک در جریان های دما بالا و پر رادیکال برای جلوگیری از پریدن شعله یا بلوف را مطرح می کند.

دان و همکاران [۵] به بررسی مشعل جت پیش آمیخته ی شمعک پرداختند که توانایی پایدار سازی شعله های پیش آمیخته ی بسیار آشفته را دارد. در این مشعل، شمعک جریان استوکیومتری بوده و جریان کمکی بزرگی از محصولات احتراق با دمای بالا وجود دارد. آن ها چهار مشعل با نسبت هم آرزوی یکسان و سرعت جت متفاوت را

^۲ D.H. Rowinski & S.B. Pope

^۴ Y. Chen & M. Ihme

^۱ P. Moreau

^۲ M. Dunn et. al

است که در محفظه‌ی احتراقی جریانی باقی نمانده و تمامی جریان ورودی خارج می‌شود. در رابطه‌ی (۱) در معادله‌ی بقای جرم به صورت برداری بیان شده است [۸].

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

که در آن u بردار سرعت و x بردار جهت است. معادله‌ی بقای اندازه حرکت به محاسبه‌ی پایداری اندازه حرکت جریان در محفظه‌ی احتراقی می‌پردازد و در سه جهت مختلف برای جریان‌های سه بعدی و دو جهت در جریان‌های دوبعدی حل می‌شود. که در رابطه‌ی (۲) معادله‌ی بقای اندازه حرکت به صورت برداری بیان شده است [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

که در آن ρ چگالی، t زمان، p فشار است. معادله‌ی بقای انرژی را می‌توان به برحسب آنتالپی و دما بیان کرد که در این مقاله بیان دمایی آن در رابطه‌ی (۳) آورده شده است [۸].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p T u_j) = \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + u'_j \frac{\partial p'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho c_p T \overline{u'_j} \right) + \Phi$$

که در آن c_p ظرفیت گرمایی، T دما، k ضریب انتقال حرارت هدایتی و Φ جمله‌ی چشمه است.

به منظور پیش‌بینی مکان گونه‌ها و رفتار جریان بر آن‌ها از حل هم‌زمان تابع توزیع احتمال و متغیر پیشرفت استفاده می‌شود. تابع توزیع احتمال می‌تواند کمیت‌های لحظه‌ای همانند گونه‌ها، متوسط زمانی آن‌ها را نیز محاسبه کند. به منظور تعیین نوع گونه‌ها اعم از واکنش دهنده، محصولات احتراق و محصولات میانی در این مقاله از روش ^۱BML استفاده شده است [۹]. تابع توزیع احتمال روشی جایگزین روش میانگین‌گیری رینولدز برای گونه‌ها و معادله‌ی انرژی است که در آن معادله‌ی انتقال برای تک-نقطه‌های آن نوشته شده که به تابع توزیع احتمال متصل است. رابطه‌ی (۴) معادله‌ی انتقال تابع توزیع احتمال P را نشان می‌دهد که نسبت زمانی که یک گونه در سیال طی می‌کند نشان می‌دهد [۱۰].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho P) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i P) + \frac{\partial}{\partial \psi_k}(\rho S_k P) = \quad (4)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \langle u_i'' | \psi \rangle P) + \frac{\partial}{\partial \psi_k} \left(\rho \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial J_{i,k}}{\partial x_i} | \psi \right\rangle P \right)$$

که در آن P تابع توزیع احتمال مخلوط، ρ چگالی متوسط سیال، u_i بردار سرعت متوسط سیال، S_k نرخ واکنش گونه‌ی k ، ψ ترکیب بردار فضایی، u_i'' نوسانات بردار سرعت سیال و $J_{i,k}$ بردار شار نفوذ مولکولی است. و $\langle A | B \rangle$ احتمال شرطی رخداد A در حالی که رخداد B اتفاق رخ داده، است.

PM1-150 و PM1-200 که در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده بود نشان دادند. همچنین مدل مقادیر مونوکسیدکربن را کمتر از مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند در حالی که مقادیر تولید هیدروکسید را دقیق پیش‌بینی می‌کند.

به دلیل روند رو به افزایش میزان آلاینده‌های زیستی استفاده از سیستم‌هایی با کمترین میزان آلاینده‌ی کمک شایانی به سلامت محیط زیست می‌کند. به همین منظور استفاده از روش احتراق پیش آمیخته در کاهش میزان آلاینده‌های مشعل‌های احتراقی بسیار مناسب است. به همین منظور بررسی میزان آلاینده‌ی این مشعل‌ها بسیار حائز اهمیت بوده و در این مقاله، میزان آلاینده‌ی احتراق پیش آمیخته‌ی پایدار شده توسط شمعک مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله ابتدا به ارائه‌ی معادلات حاکم بر مساله و سپس به ارائه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود تا بتوان کمترین میزان آلاینده‌ی را در میان این مشعل‌ها بررسی نمود.

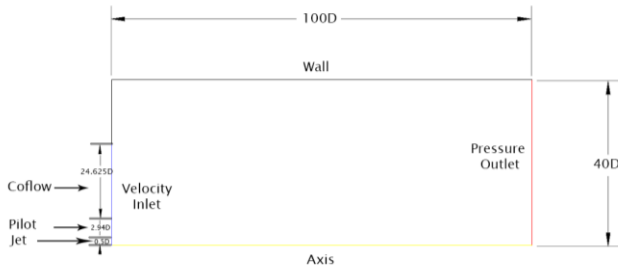
مدل‌سازی

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری و افزایش توانایی مدل‌سازی مسائل فیزیکی به منظور بررسی پدیده‌ها و بهینه‌سازی سامانه‌های موجود به جهت افزایش سرعت و کاهش هزینه‌های آزمایش‌های تجربی، پژوهشگران بیشتر به مدل‌سازی پدیده‌ها می‌پردازند. به منظور مدل‌سازی یک پدیده باید معادلات حاکم بر فیزیک آن حل شود و چنانچه این معادلات بیش از یکی باشند و به‌طور هم‌زمان اتفاق بیفتند باید به‌طور هم‌زمان حل شود. در مسائل احتراقی به دلیل غیرخطی بودن معادلات و وجود جملاتی با مشتق مرتبه‌ی دوم حل تحلیلی آن‌ها بسیار مشکل و حتی غیرممکن می‌شود. بنابراین باید به حل عددی پدیده‌های موجود پرداخته شود. معادلات حاکم در مدل‌سازی جریان‌های احتراقی را می‌توان به دودسته‌ی معادلات فاز پیوسته و فاز گسسته تقسیم‌بندی کرد که فاز پیوسته شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی است. که فرضیه‌ی اصلی این معادلات پایدار بودن جریان است. این معادلات وابسته به زمان هستند و با حل تحلیلی و یا حل عددی در شبکه‌های بسیار ریز و گام‌های زمانی بسیار کم می‌توان آن‌ها را به‌طور دقیق حل نمود. ولی با توجه به اینکه در کاربردهای مهندسی نیاز به وجود تمامی جزئیات در تمامی لحظات وجود ندارد بنابراین با استفاده از میانگین‌گیری رینولدز می‌توان هر متغیر را به دو بخش میانگین و نوسانات تقسیم کرد و با حل معادلات مقادیر میانگین در جریان پایا و همچنین تنش‌های رینولدز در آشفته‌گی‌ها محاسبه می‌شود. معادلات فاز گسسته نیز مسیر حرکت و تغییرات وارده بر جریان را برای ذرات سوخت حل می‌کند. با این روش می‌توان به بررسی ذرات مختلف در مناطق مختلف محفظه‌ی احتراق و محل تولید یا مصرف آن‌ها پرداخت و تغییرات لازم جهت بهینه‌سازی را اعمال کرد. معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی است. معادله‌ی بقای جرم بیان می‌کند اختلاف جرم ورودی و خروجی حجم کنترل برابر مقدار جرم به دام افتاده در حجم کنترل

^۱ Bray Moss Libby(BML)

جدول ۱: مشخصات جریان‌های ورودی

جریان	سرعت (m/s)	دما (K)	نسبت هم‌ارزی	سوخت/ اکسیدکننده	قطر (mm)
جت اصلی	۲۰۰-۵۰	۳۰۰	۰/۵	متان/ هوا	۴/۰
شمعک	۵/۳	۲۲۸۰	۱/۰	متان/ هوا	۲۳/۵
جریان کمکی	۳/۷	۱۵۰۰	۰/۴۳	هیدروژن/ هوا	۱۹۷

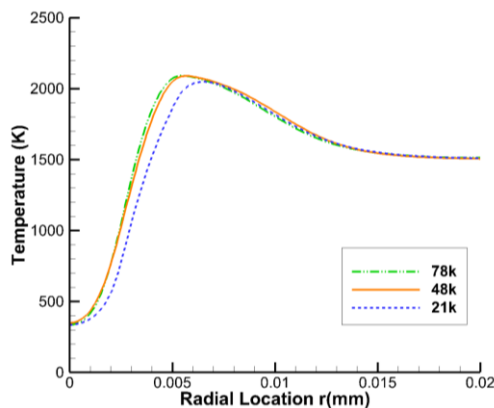


شکل ۲۰: شرایط مرزی و ابعاد مدل‌سازی

در این مدل‌سازی به منظور استقلال شبکه، از سه شبکه‌ی مثلثی با تعداد ۲۱، ۴۸ و ۷۸ هزار سلول^۴ استفاده شده و دما در $x/D = 2.5$ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه‌های ۴۸ و ۷۸ هزار سلول اختلاف چندانی نداشته و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی از شبکه‌ی با تعداد ۴۸ هزار سلول استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

استقلال از شبکه

در این مدل‌سازی به منظور استقلال شبکه، از سه شبکه‌ی مثلثی با تعداد ۲۱، ۴۸ و ۷۸ هزار سلول^۴ استفاده شده و دما در $x/D = 2.5$ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه‌های ۴۸ و ۷۸ هزار سلول اختلاف چندانی نداشته و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی از شبکه‌ی با تعداد ۴۸ هزار سلول استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار استقلال از شبکه

در کاربردهای صنعتی فرایندهای احتراقی جریان‌ها آشفته بوده و برای پیش‌بینی جریان نیاز به مدل‌سازی این آشفتگی‌ها وجود دارد. آشفتگی در اثر ایجاد گردابه‌هایی با اندازه‌های متفاوت در جریان رخ می‌دهد که این آشفتگی‌ها تابع زمان بوده و باعث ایجاد اثر مستقیم بر نرخ انتقال حرارت، اندازه حرکت، سرعت واکنش‌های شیمیایی و تولید آلاینده‌ها می‌شود. این گردابه‌ها باعث اتلاف در انرژی و حرکت هستند و وابستگی و تغییرات سریع آن‌ها که در مقیاس‌های کوچک زمانی و مکانی رخ می‌دهند حل آن‌ها را پیچیده‌تر می‌کند. در این مقاله از مدل آشفتگی $K - \epsilon RNG$ استفاده شده که در آن از معادلات لحظه‌ای ناور-استوکس با روش^۱ RNG استفاده شده است. مدل $K - \epsilon RNG$ یک مدل دو معادله‌ای نیمه تجربی است که بر پایه‌ی معادلات مدل شده برای انرژی جنبشی آشفتگی K و اتلاف آن ϵ بیان شده است.

در شبیه‌سازی احتراق توجه به ساختار فرایند به منظور شبیه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا در صورت عدم تطابق فرایند شبیه‌سازی و آزمایش، نرخ آزاد شدن انرژی و گونه‌ها به درستی مدل‌سازی نخواهد شد. نرخ آزاد شدن انرژی و پیشرفت واکنش به نرخ ترکیب سوخت و اکسیدکننده وابسته است، و نرخ ترکیب سوخت و اکسیدکننده، به نحوه‌ی مخلوط شدن و غلظت واکنش‌دهنده‌ها وابسته است. در این مقاله به منظور تحلیل عددی شبیه‌سازی از نرم افزار تجاری انسیس فلونت^۲ استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی احتراق از مدل احتراق پیش آمیخته‌ی جزئی^۳ استفاده شده است.

شرایط مرزی

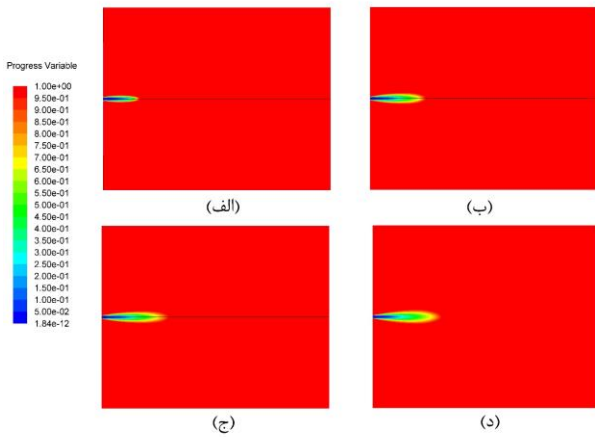
در این مقاله مشعل پیش آمیخته همراه با پایدارسازی شمعک که در شکل ۱ نشان داده شده و شامل سه جریان است، مدل‌سازی شده است. جریان اول جریان جت پرسرعت بوده که در مرکز مشعل تزریق می‌شود. جریان بعدی جریان شمعک بوده که محصولات احتراق استوکیومتری متان را با دمای بالا وارد مشعل می‌کند. جریان سوم جریان کمکی محصولات احتراق هیدروژن است. که باعث پایدارتر شدن این مشعل می‌شود. مشخصات این سه جریان در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول سرعت ورودی هر جریان، دما، سوخت و اکسیدکننده و قطر هر کدام از جریان‌ها مشخص شده است. به منظور شبیه‌سازی این مشعل از مدل دوبعدی تقارن مرکزی استفاده شده است زیرا اثرات جریان سه‌بعدی تفاوت چندانی با دوبعدی تقارن مرکزی نداشته و به منظور کاهش هزینه محاسباتی از این مدل استفاده شده است. شکل ۲ شرایط مرزی و ابعاد مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در $y/D = 0$ شرط محور ($axis$)، در

^۱ Renormalization group theory

^۲ Ansys Fluent

^۳ Partially premixed combustion

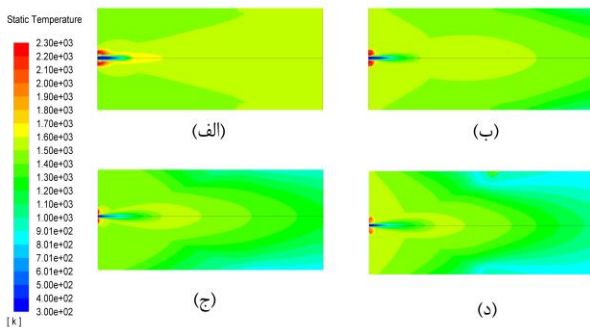
^۴ Cells



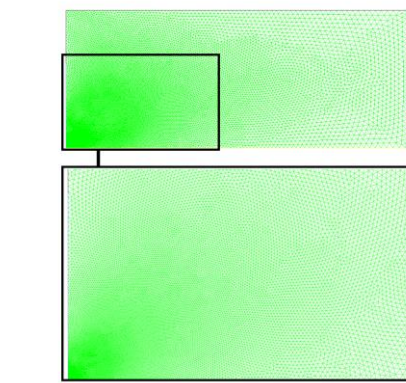
شکل ۶: کانتور متغیر پیشرفت: الف-۵۰-ب-۱۰۰-ج-PM1-۱۵۰-د-PM1-۲۰۰

در ۴ حالت مورد شبیه‌سازی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است طول شعله‌ی PM1-50 کوچک‌تر است. همچنین دمای قسمت شمعک در سرعت‌های بالاتر به علت ترکیب سریع‌تر و جریان شدیدتر مخلوط نسوخته‌ی سوخت و هوا به سرعت کاهش یافته به طوری که در سرعت‌های بالاتر دمای ناحیه‌ی خروجی شمعک کاهش پیدا کرده است.

شکل ۸ نمودار تغییرات نسبت جرمی CO_2 را نشان می‌دهد. در ابتدا به علت بیشتر بودن مقادیر دیگر واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در سرعت‌های بالاتر میزان CO_2 خروجی از شمعک در پایین‌ترین سرعت PM1-50 بیشتر از بوده و به نسبت با افزایش سرعت این میزان کاهش یافته، ولی در انتهای مسیر شبیه‌سازی میزان آلاینده‌ی CO_2 برای PM1-200 حدود ۶ برابر PM1-50 و PM1-100 است. شکل ۹ نمودار تغییرات CO در محور مرکزی محفظه‌ی احتراق را در ۴ حالت مورد شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی سرعت‌ها در حدود شعله این میزان یکسان بوده ولی در سرعت‌های بالاتر به علت کامل شدن بیشتر احتراق این میزان کاهش می‌یابد. بنابراین PM1-200 با بیشترین سرعت کمترین میزان تولید آلاینده‌ی CO را داشته و PM1-50 با



شکل ۷: کانتور تغییرات دما: الف-۵۰-ب-PM1-۱۰۰-ج-PM1-۱۵۰-د-PM1-۲۰۰



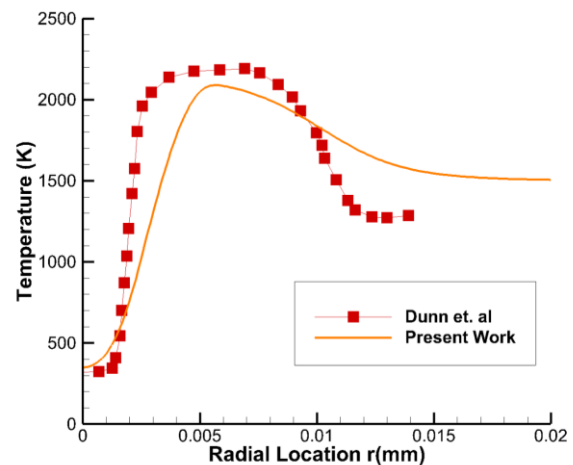
شکل ۴: شبکه‌ی مورد استفاده (۴۸ هزار سلول)

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده، شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی دان و همکاران [۴] مقایسه کرده و در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود شبیه‌سازی از تطابق مناسبی برخوردار است، همچنین علت بالاتر بودن دما در انتهای مسیر به خاطر فرض سه جریانی بودن مدل و صرف‌نظر از هوای آزاد می‌باشد.

نتایج

به منظور نشان دادن میزان پیشرفت واکنش در احتراق پیش آمیخته از متغیر پیشرفت استفاده می‌شود که ۰ به معنای مخلوط نسوخته و ۱ به معنای مخلوط محترق شده است. در شکل ۶ متغیر پیشرفت پایدارسازی شمعک احتراق پیش آمیخته برای چهار حالت PM1-50، PM1-100، PM1-150، PM1-200 ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود PM1-200 که با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه در جت بیشترین سرعت را داراست طول شعله‌ی بیشتری به نسبت ۳ حالت دیگر دارد. همچنین ۱ بودن مقدار متغیر پیشرفت در سایر نقاط محفظه‌ی احتراق نشان از احتراق کامل مخلوط سوخت و هوا دارد. در شکل ۷ کانتور تغییرات دما برای قسمت‌های ورودی‌ها



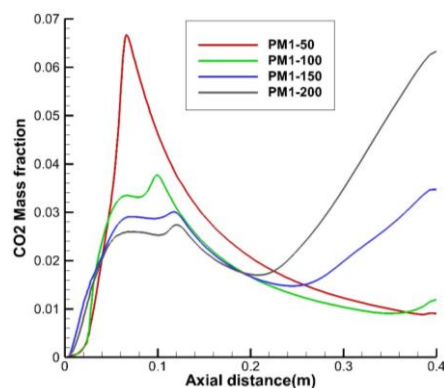
شکل ۵: نمودار اعتبارسنجی- دما در $x/D = 2.5$

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

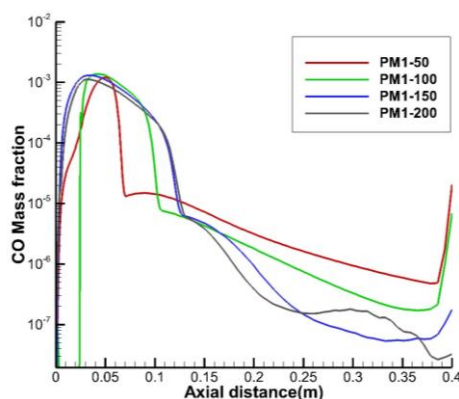
همواره یکی از اهداف پژوهشگران افزایش ظرفیت سیستم‌های احتراقی می‌باشد. به‌علاوه با افزایش روزافزون آلاینده‌های هوا، سلامت انسان و طبیعت به خطر افتاده است. به همین سبب استفاده از سیستم‌های با ظرفیت بالا و آلاینده‌گی کم یکی از اهداف اصلی پژوهشگران است. احتراق پیش آمیخته دارای ویژگی‌های مدنظر بوده و تنها پایدارسازی آن‌ها دشوار بوده که در این پژوهش موردبررسی قرار گرفت. در پایدارسازی شمعک احتراق پیش آمیخته میزان انتشار آلاینده‌های احتراقی پیش آمیخته بسیار کمتر انواع دیگر احتراق است. همچنین در این پایدارسازی با افزایش سرعت میزان تولید آلاینده‌های CO_2 و NO_x افزایش می‌یابد ولی میزان تولید CO کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت به بیش از ۲۰۰ متر بر ثانیه در پایدارسازی شمعک موجب ناپایداری احتراق می‌شود.

مراجع

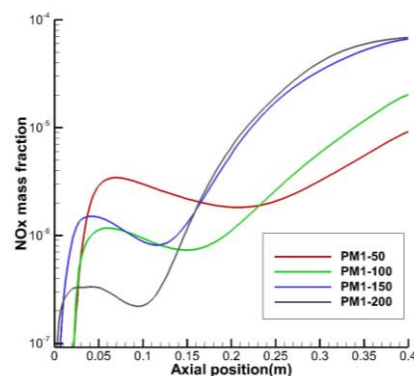
- [1] BP Statistical Review of World Energy Accessed; <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [2] I. Glassman, R. A. Yetter, N. G. Glumac, *Combustion*: Academic press, 2014.
- [3] P. Moreau, Turbulent flame development in a high velocity premixed flow, in *Proceeding of*, 49.
- [4] M. J. Dunn, A. R. Masri, R. W. Bilger, A new piloted premixed jet burner to study strong finite-rate chemistry effects, *Combustion and Flame*, Vol. 151, No. 1, pp. 46-60, 2007.
- [5] M. Dunn, A. Masri, R. Bilger, R. Barlow, G.-H. Wang, The compositional structure of highly turbulent piloted premixed flames issuing into a hot coflow, *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 32, No. 2, pp. 1779-1786, 2009.
- [6] D. H. Rowinski, S. B. Pope, PDF calculations of piloted premixed jet flames, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 15, No. 2, pp. 245-266, 2011.
- [7] Y. Chen, M. Ihme, Large-eddy simulation of a piloted premixed jet burner, *Combustion and Flame*, Vol. 160, No. 12, pp. 2896-2910, 2013.
- [8] R. H. Pletcher, J. C. Tannehill, D. Anderson, *Computational fluid mechanics and heat transfer*: CRC Press, 2012
- [9] K. Bray, J. B. Moss, A unified statistical model of the premixed turbulent flame, *Acta Astronautica*, Vol. 4, No. 3-4, pp. 291-319, 1977
- [10] S. B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 119-192, 1985.



شکل ۸: نمودار تغییرات CO_2 در ۴ حالت مختلف



شکل ۹: نمودار تغییرات CO در ۴ حالت مختلف



شکل ۱۰: میزان آلاینده‌ی NO_x ایجاد شده در ۴ حالت مختلف

بیشترین سرعت جت را دارند بیشترین میزان NO_x را تولید کردند. در ابتدای واکنش به علت کامل نبودن واکنش و کم بودن میزان کمترین میزان سرعت بیشترین میزان تولید CO را داراست. شکل ۱۰ میزان تولید آلاینده‌ی NO_x را در حالات مختلف نشان می‌دهد. در این حالات نشان داده شده $PM1-200$ و $PM1-150$ که دیگر ترکیبات $PM1-50$ بیشترین میزان NO_x تولیدی را دارا بوده که با تکمیل واکنش از میزان نسبت جرمی این آلاینده در سرعت‌های پایین کاسته شده و بیشترین سرعت‌ها بیشترین میزان آلاینده را دارا هستند.

