



تحلیل عددی اثر فاصله‌ی درنگ در پایدار کردن و آلاینده‌ی شعله‌های پیش آمیخته‌ی

کم پیچش

حمید کاوری^۱، محمد مقیمان^۲

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

^۲استاد، فردوسی مشهد، moghiman@um.ac.ir

چکیده

امروزه هزینه‌های و تحقیقات زیادی به منظور توسعه و رشد انرژی‌های تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، بادی و هسته‌ای صورت می‌گیرد ولی همچنان ۸۵٪ انرژی تولیدی جهان توسط سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز تأمین می‌شود. به منظور کاهش خطرات ناشی از آلاینده‌های احتراقی و تولید انرژی کافی، احتراق پیش آمیخته دارای بازدهی بالا و احتراقی تمیز با آلاینده‌ی کم است، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. احتراق پیش آمیخته به علت حساسیت به دینامیک احتراق دارای روش‌های مختلفی به منظور پایدارسازی است که در این مقاله به پایدارسازی و بررسی پارامترهای آلاینده‌ای در روش پایداری چرخشی در مشعل کم پیچش و اثر فاصله‌ی درنگ پرداخته شد. فاصله‌ی درنگ به فاصله‌ای که سیال از چرخنده خارج شده تا محفظه‌ی احتراق طی می‌کند، می‌گویند. تحلیل عددی صورت گرفته توسط نرم افزار فلونت شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی پیش‌بین و همکاران مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان دادند با افزایش فاصله‌ی درنگ تا ۳ برابر شعاع برخاستگی شعله به دلیل کاهش سرعت چرخشی، افزایش می‌یابد و همچنین موجب کاهش تولید NO_x می‌شود. در تولید آلاینده‌ی CO_2 اختلافی در اثر تغییر فاصله‌ی درنگ مشاهده نشد. افزایش فاصله‌ی درنگ بیش از ۳ برابر شعاع موجب ناپایداری شعله و پدیده‌ی بلوف و کاهش آن به کمتر از ۱ برابر شعاع موجب ناپایداری و فلاش‌بک شعله می‌شود.

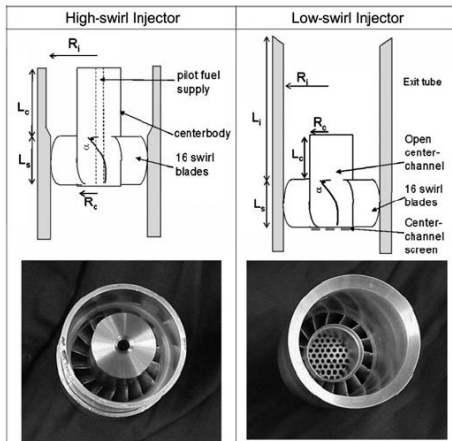
واژه‌های کلیدی

احتراق پیش آمیخته، تحلیل عددی، مشعل کم پیچش، فاصله‌ی درنگ

مقدمه

امروزه هزینه‌های و تحقیقات زیادی به منظور توسعه و رشد انرژی‌های تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، بادی و

هسته‌ای صورت می‌گیرد ولی همچنان ۸۵٪ انرژی تولیدی جهان توسط سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز تأمین می‌شود [۱]. سوخت‌های فسیلی یکی از منابع اصلی تأمین انرژی هستند و به دلیل اینکه همواره احتراق به صورت کامل صورت نگرفته و همیشه محصولات میانی همچون CO ، NO_x و سوت، که آلاینده‌های هوا هستند تولید می‌شود، موجب به خطر افتادن سلامت انسان و باعث گرمایش عمومی می‌شوند. به منظور کاهش این خطرات و تولید انرژی کافی، احتراق پیش آمیخته دارای بازدهی بالا و احتراقی تمیز با آلاینده‌ی کم است. احتراق پیش آمیخته به علت حساسیت به دینامیک احتراق دارای روش‌های مختلفی به منظور پایدارسازی است که در این مقاله به پایدارسازی و بررسی پارامترهای آلاینده‌ای در روش پایداری چرخشی در مشعل کم پیچش و اثر فاصله‌ی درنگ 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 واکنش دهنده می‌باشد. حوزه‌ی دوم محدودیت مربوط به ترکیب جریان و رابطه‌اش با شعله‌ی آرام است. این محدودیت شامل پدیده‌هایی همچون فلاش‌بک، بلوف، شروع آشفستگی 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 واکنش دهنده‌های بالاتری را نسبت به جریان شعله‌ی آرام استفاده کرد. در نتیجه نرخ بالاتر مصرف واکنش دهنده‌ها 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



شکل ۱: شماتیک و تصویر مشعل پرپیچش (چپ) و کم پیچش (راست) [۴]

ظرفیت مشعل بوده و تنها تابع نسبت هم‌ارزی می‌باشد. ولی میزان CO و هیدروکربن‌های نسوخته به شدت تابع اندازه‌ی محفظه‌ی احتراق بوده و می‌تواند در شرایط گرمایی پایین بسیار زیاد شود. میزان انتشار آلاینده‌ها در مشعل کم پیچش (قسمت در میلیون) و انتشار CO کمتر از 10 ppm است. می‌توان نتیجه گرفت مشعل کم پیچش ساده، ارزان و مناسب محیط‌زیست است. فریتز و همکاران^۳ [۵] به بررسی پدیده‌ی پس‌زنی^۴ شعله در مشعل‌های پیش‌آمیخته پرداختند. در کل پس‌زنی توسط یکی از این چهار مورد آغاز می‌شود: پس‌زنی در اثر شرایط لایه‌مرزی، پس‌زنی در اثر توسعه‌ی شعله آشفته در جریان اصلی، پس‌زنی ایجادشده توسط ناپایداری‌های احتراق و پس‌زنی ایجادشده به سبب احتراق الفاشده توسط شکستن گردابه‌ها. آن‌ها با بررسی آزمایشگاهی پس‌زنی در جریان چرخشی به این نتیجه رسیدند که وجود جریان هسته‌ی مرکزی موجب کاهش پس‌زنی و همچنین در صورت اصلاح تکانه‌ی محوری و چرخشی می‌توان مقاومت جریان را نسبت به پس‌زنی افزایش داد. تاجیبانا و زیمر^۵ [۶] به بررسی اثر پیچش و فاصله‌ی درنگ بر روی یک مشعل کم پیچش پرداختند. با افزایش عدد چرخش میزان بر خاستگی کاهش پیدا می‌کند زیرا در خروجی جریان از نازل سبب افزایش سرعت مماسی و کاهش سرعت محوری می‌شود. همچنین با افزایش فاصله‌ی درنگ سرعت مماسی کاهش و سبب افزایش

شعله‌های پیش‌آمیخته‌ی آشفته پرداخته‌شده است. سرعت شعله‌های آرام سوخت‌های هیدروکربن در هوا به‌ندرت 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 پیش‌آمیخته، با افزایش سرعت جریان ورودی و استفاده از روش‌های مختلف، شعله پایدار می‌شود.

احتراق پیش‌آمیخته‌ی پیچشی با توجه به کاربردهای گسترده خصوصاً در توربین‌های گازی و در شرایط کم سوخت همواره مورد توجه پژوهشگران بوده و این پدیده را از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی قرار داده‌اند. احتراق پیش‌آمیخته‌ی پیچشی به علت کم سوخت بودن دارای ناپایداری‌هایی است که پژوهشگران با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی بر روی پایداری‌سازی این نوع احتراق مطالعات مختلفی را انجام داده‌اند. مشعل‌های پرپیچش از گذشته در توربین‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. استفاده از مشعل‌های جایگزین کم پیچش توسط چنگ^۱ پیشنهاد شد [۳]. به علت تفاوت ساختاری مشعل‌های کم پیچش و پرپیچش باید تفاوت‌های این دو در مطالعات مدنظر قرار گیرد. جانسون و همکاران^۲ [۴] با تغییر یک مشعل پرپیچش و تبدیل آن به یک مشعل کم پیچش به مقایسه‌ی این دو مشعل پرداختند. در شکل ۱ دو مشعل پرپیچش (چپ) و کم پیچش (راست) نشان داده شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داد مشعل کم پیچش دارای ناحیه بازچرخشی کوچک‌تری نسبت به مشعل پرپیچش است و با ناحیه‌ی شدید و بزرگ چرخشی مشعل پرپیچش متفاوت است. در شرایط کاری مشعل‌ها، مشعل کم پیچش دارای همان شرایط مشعل پرپیچش بوده و میزان NO_x تولیدی آن حدود ۶۰٪ کمتر بود و CO انتشاری آن قابل مقایسه است. نبود میدان بزرگ بازچرخشی و زمان ماند کوتاه‌تر مشعل کم پیچش توضیحی برای کاهش NO_x تولیدی است. چنگ و همکاران [۳] به بررسی توانایی و پایداری مشعل‌های کم پیچش برای کاربردهای صنعتی و اقتصادی محفظه‌های احتراق پرداختند. آن‌ها مشعل‌هایی با سه ظرفیت ۷۳، ۲۸۰ و ۵۸۶ کیلووات را در دو اندازه‌ی قطر دهانه‌ی مشعل مقایسه کردند و نشان دادند میزان NO_x تولیدی مستقل از

^۳ J. Fritz et. al

^۴ Flash-Back

^۵ S. Tachibana & L. Zimmer

^۱ RK. Cheng

^۲ M.R. Johnson

می‌شود. که در رابطه‌ی (۲) معادله‌ی بقای اندازه حرکت به صورت برداری بیان شده است [۹].

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

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

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 [۹].

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

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

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 واکنش‌دهنده، محصولات احتراق و محصولات میانی در این مقاله از روش BML استفاده شده است [۱۰]. 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 [۱۱].

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

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

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.

در کاربردهای صنعتی فرایندهای احتراقی جریان‌ها آشفته بوده و برای پیش‌بینی جریان نیاز به مدل‌سازی این آشفستگی‌ها وجود دارد. آشفستگی اثر مستقیم بر نرخ انتقال

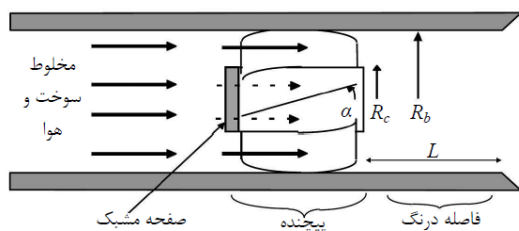
سرعت محوری می‌شود که در نهایت منجر به افزایش بر خاستگی شعله می‌شود. پیش‌بین و همکاران [۷ و ۸] به بررسی اثر عدد پیچش به عنوان اثرگذارترین عامل بر احتراق پیش‌آمیخته‌ی پایدارسازی شده‌ی پیچشی در شرایط مختلف فشار، سرعت و نسبت هم‌ارزی پرداختند. همچنین به بررسی فاصله‌ی پیچنده از سر مشعل (فاصله‌ی درنگ) به عنوان پارامتری هندسی در طراحی مشعل‌های کم‌پیچش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش نسبت هم‌ارزی توزیع دمایی یکنواخت‌تر شده و محصولات احتراق به بدنه‌ی کوره نزدیک‌تر می‌شوند. و علت تغییر دما در نسبت ۰/۸۷ بر خاستگی شعله می‌باشد. همچنین آن‌ها نشان دادند با افزایش فاصله‌ی درنگ موجب افزایش بر خاستگی شعله و افزایش ۱۴ درصد انتقال حرارت نسبت به حالت چسبیده می‌شود.

مدل‌سازی

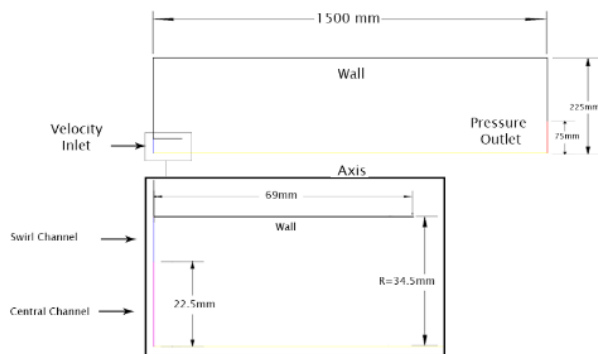
به منظور افزایش سرعت و کاهش هزینه‌های آزمایش‌های تجربی، پژوهشگران بیشتر به مدل‌سازی پدیده‌ها می‌پردازند. به منظور مدل‌سازی یک پدیده باید معادلات حاکم بر فیزیک آن باید به طور هم‌زمان حل شود. در مسائل احتراقی به دلیل غیرخطی بودن معادلات و وجود جملاتی با مشتق مرتبه‌ی دوم حل تحلیلی آن‌ها بسیار مشکل و حتی غیرممکن بوده و از روش‌های عددی استفاده می‌شود. 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. 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 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 [۹].

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

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 سه‌بعدی و دو جهت در جریان‌های دوبعدی حل



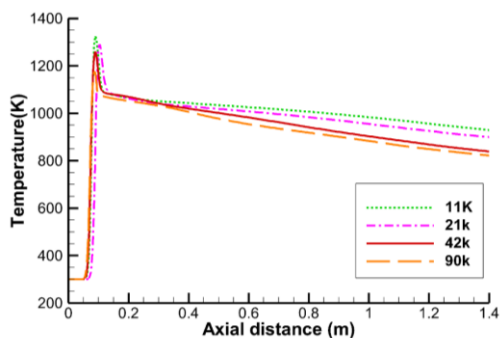
شکل ۲: شماتیک پیچنده‌ی مشعل کم پیچش [۷]



شکل ۳ شرایط مرزی مدل سازی

استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال از شبکه‌ی شبیه‌سازی از چهار شبکه با تعداد ۱۱، ۲۱، ۴۲ و ۹۰ هزار سلول استفاده شده و دما در خط مرکزی محفظه‌ی احتراق ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود شبکه‌هایی با ۴۲ و ۹۱ هزار سلول دمای آن‌ها اختلاف چندانی ندارد. به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی از شبکه‌ای با ۴۲ هزار سلول برای انجام محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبکه‌ی انتخابی ۴۲ هزار سلولی انتخابی همراه با بزرگنمایی ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است



شکل ۱ نمودار بررسی استقلال از شبکه: تغییرات دما در خط مرکزی محفظه‌ی احتراق

حرارت، اندازه حرکت، سرعت واکنش‌های شیمیایی و تولید آلاینده‌ها می‌شود. در این مقاله از مدل آشفتگی $K - \epsilon RNG$ استفاده شده که در آن از معادلات لحظه‌ای ناویر-استوکس با روش 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. در این مقاله به منظور تحلیل عددی شبیه‌سازی از نرم افزار تجاری انسیس فلونت^۷ استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی احتراق از مدل احتراق پیش آمیخته‌ی جزئی^۸ استفاده شده است.

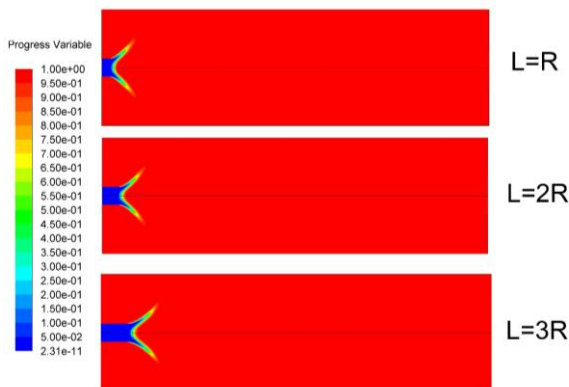
شرایط مرزی

در این مقاله به مدل‌سازی پایداری پیچشی مشعل پیش آمیخته کم پیچش پرداخته می‌شود. همان‌طور که مطرح شد مشعل‌های کم پیچش از شرایط پایداری گسترده‌تر و بازه‌ی عملکردی وسیع‌تری برخوردار هستند و از طرفی میزان آلاینده‌ی NO_x کمتر از $\frac{1}{3}$ آلاینده‌ی مشعل‌های پرپیچش است [۱۲]. در این مقاله از مشعل کم پیچش پیش‌بین و همکاران [۷] به منظور مدل‌سازی استفاده شده است. شماتیک مشعل کم پیچش در شکل ۲ نشان داده شده است که جریان را به دو قسمت، تقسیم می‌کند. جریان مرکزی که در اثر عبور جریان ابتدایی از صفحه‌ی مشبک و جریان چرخشی که در اثر عبور از پره‌های پیچنده ایجاد می‌شود. به منظور شبیه‌سازی این مشعل از حل دوبعدی تقارن محوری چرخشی که در شکل ۳ نشان داده شده، استفاده شده است. در شکل ۳ شرایط مرزی این مسئله نیز نمایش داده شده است. در ناحیه‌ی ورودی دو ورودی مجزا برای قسمت‌های جریان چرخشی و محوری با شرط مرزی سرعت ورودی مشخص شده است که جریان با نسبت هم‌ارزی ۰/۶ وارد می‌شود. قسمت خروجی محفظه‌ی احتراق توسط شرط فشار خروجی مشخص شده است. دیواره‌ی محفظه با شرط دیوار و خط تقارن مرکزی محفظه توسط شرط محور مشخص شده است. همچنین ابعاد هر قسمت در این شکل مشخص است.

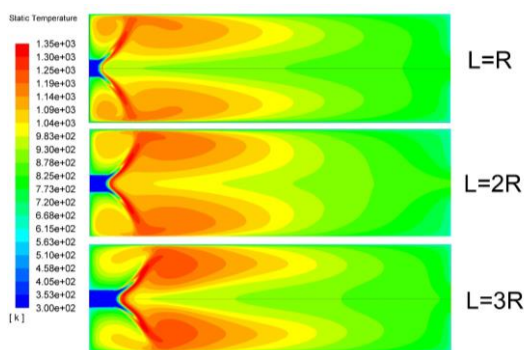
^۶ Renormalization group theory

^۷ Ansys Fluent

^۸ Partially premixed combustion

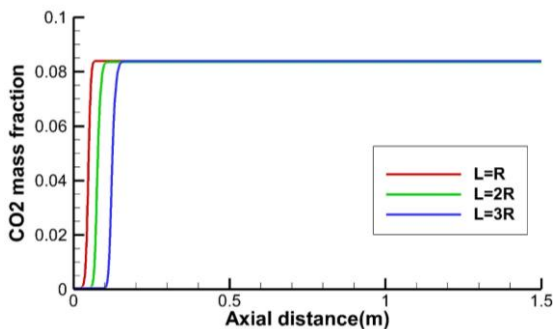


شکل ۷: متغیر پیشرفت برای سه فاصله درنگ متفاوت



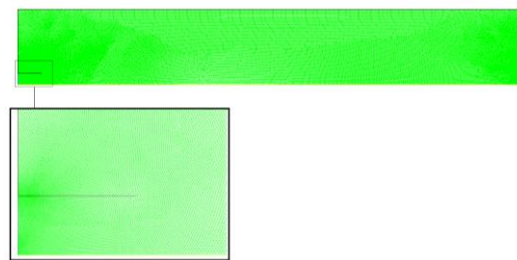
شکل ۸: کانتور دما برای سه فاصله درنگ متفاوت

به منظور بررسی آلاینده‌های این سه فاصله‌ی درنگ در شکل ۹ نمودار تغییرات CO_2 ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر فاصله‌ی درنگ میزان CO_2 خروجی تغییری نکرده است. همچنین به علت یکسان بودن شرایط ورودی با توجه به یکسان بودن CO_2 خروجی میزان CO نیز یکسان خواهد بود.



شکل ۹: نمودار تغییرات CO_2 در سه فاصله‌ی درنگ متفاوت

در شکل نمودار تغییرات میزان کسر جرمی آلاینده‌ی NO_x ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان آلاینده‌ی را مشعل با فاصله‌ی درنگ



شکل ۲ شبکه‌ی شبیه‌سازی

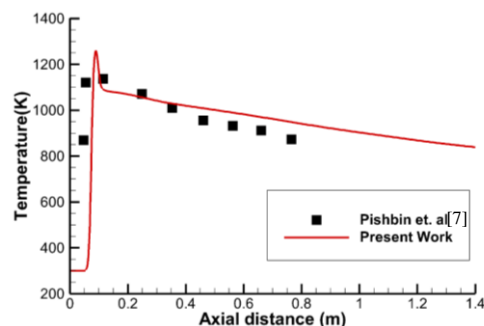
اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با نتایج آزمایشگاهی پیش‌بین و همکاران [۷] مقایسه گردید. نتایج این مقایسه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، انطباق مناسب مدل و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نتایج

به منظور بررسی پیشرفت احتراق و شکل شعله کانتور متغیر پیشرفت^۹ در شکل ۷ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌ی درنگ به علت افزایش مسیر حرکت از میزان چرخش جریان کاسته شده و بر سرعت محوری آن افزوده می‌شود. بنابراین در کمترین فاصله‌ی درنگ بیشترین چرخش و در بیشترین فاصله‌ی درنگ کمترین چرخش و بیشترین میزان جدایش شعله از خروجی نازل مشاهده می‌شود.

شکل ۸ کانتور تغییرات دما در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که مناطق حضور شعله نیز مشخص است. همان‌طور که در شکل ۷ بیان شد با افزایش فاصله‌ی درنگ از چرخش شعله کاسته می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌ی درنگ دمای توسعه یافته و شعله به سمت جلو پیش‌رفته و کشیده‌تر شده است.

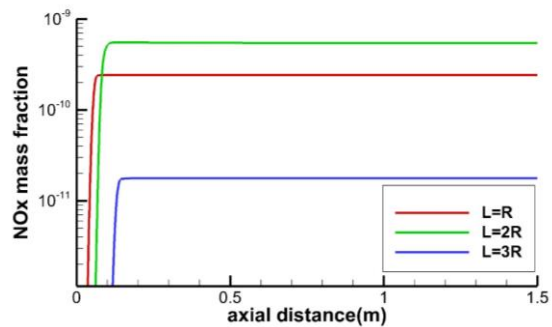


شکل ۳ اعتبارسنجی شبیه‌سازی

^۹ Progress variable

- [5] J. Fritz, M. Kröner, T. Sattelmayer, Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone, in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. V002T02A021-V002T02A021 .
- [۶] S. Tachibana, L. Zimmer, Effect of swirl on the stability of a lifted flame sustained by a low-swirl burner, in *Proceeding of* .
- [۷] س.ا. پیش‌بین، مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد و میزان NO_x در مشعل‌های پیش‌آمیخته‌ی پیچشی PH.D Thesis, دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۳.
- [۸] ق. خانی، پ. بین، س. ایمان، م. رضوی، بررسی اثر تغییر پارامترهای عملکردی بر رفتار شعله و توزیع دما و آنالیز اگزوزی مشعل‌های کم پیچشی پیش‌آمیخته، مهندسی مکانیک مدرس، Vol. 14, pp. 27, ۳۸-۲۰۱۴.
- [9] R. H. Pletcher, J. C. Tannehill, D. Anderson, *Computational fluid mechanics and heat transfer*: CRC Press, 2012 .
- [10] P. A. Libby, K. Bray, Variable density effects in premixed turbulent flames, *AIAA J*, Vol. 15, No. 8, pp. 1186-1193, 1977 .
- [11] S. B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 119-192, 1985 .
- [12] R. K. Cheng, Low swirl combustion, *The Gas Turbine Handbook*, pp. 241-255, 2006 .

$L = 2R$ داراست و کمترین میزان آلاینده‌گی را مشعل بافاصله‌ی درنگ $L = 3R$ تولید می‌کند.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات NO_x در سه فاصله‌ی درنگ

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور بررسی اثر فاصله‌ی درنگ بر پایداری و آلاینده‌های تولیدی تحلیل عددی صورت گرفت و نتایج به دست آمده نشان دادند با افزایش فاصله‌ی درنگ تا ۳ برابر شعاع برخاستگی شعله به دلیل کاهش سرعت چرخشی، افزایش می‌یابد و همچنین موجب کاهش تولید NO_x می‌شود. در تولید آلاینده‌ی CO_2 اختلافی در اثر تغییر فاصله‌ی درنگ مشاهده نشد. افزایش فاصله‌ی درنگ بیش از ۳ برابر شعاع موجب ناپایداری شعله و پدیده‌ی بلوف و کاهش آن به کمتر از ۱ برابر شعاع موجب ناپایداری و فلاش‌بک شعله 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] R. Cheng, D. Yegian, M. Miyasato, G. Samuelsen, C. Benson, R. Pellizzari, P. Loftus, Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 1, pp. 1305-1313, 2000 .
- [4] M. Johnson, D. Littlejohn, W. Nazeer, K. Smith, R. Cheng, A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2867-2874, 2005 .

