

مطالعه کوره امحاء پسماندهای هیدروکربنی گازی، برای ارزیابی اثر مقاطع مختلف در میزان اختلاط و زمان ماندگاری گونه های شیمیایی

مسعود دربندی^{۱*}، محمدرضا مدرس^۲

تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

(* نویسنده مخاطب: Darbandi@sharif.edu)

چکیده

کاستن از طول مسیری که منجر به واکنش های شیمیایی احتراقی می شود، بهبود پایداری شعله با تشکیل نواحی مارپیچ در داخل محفظه احتراق که دارای چرخش دائمی^۳ می باشند و افزایش عمر واحدهای صنعتی، [9-1]، بخصوص مشعل ها، از جمله دلایلی می باشند که در کوره های صنعتی، استفاده از این جریان ها را ضروری می نماید. با توجه باینکه مقدار این پارامترها، خود بشدت تابع نحوه ورود گاز پسماند به داخل محفظه احتراق می باشند. مقاله حاضر به بهبود شاخص های اختلاط جریان داخل محفظه احتراق و افزایش مقدار زمان ماندگاری در حالت های مختلفی از ورود گاز پسماند به داخل کوره می پردازد. فلذا بعد از مطالعاتی که صورت گرفت، اثر تغییرات مسیر و مقطع گاز پسماند با در نظر گرفتن راهکارهایی برای افزایش اختلاط داخل کوره مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجاییکه انتشار گاز مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن، بشدت تابع نسبت هوا به سوخت می باشند، با افزایش مقدار نسبت هوا به سوخت، مقدار گاز مونوکسید کربن در گازهای خروجی، کاهش و در طرف مقابل اکسیدهای نیتروژن تولید شده افزایش پیدا می کنند. این درحالیست که با بکارگیری سیستم های افزایش اختلاط داخل محفظه احتراق می توان با اعمال دماهای بالاتر و همگن تر، از تشکیل جبهه های داغ مستعد تولید اکسیدهای نیتروژن کاسته و در طرف مقابل به هدف اصلی که پایین آمدن میزان مونوکسید کربن تولید شده است، در سایه دماهای بالاتر برای اکسیداسیون کامل هیدروکربن ها، دست یافت. در مقاله حاضر، با استفاده از مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی محفظه کوره و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ ، اثر مقطع ورود جریان گاز پسماند به داخل کوره، در مقدار زمان ماندگاری گونه های شیمیایی و همچنین یکنواختی جریان داخل کوره با تعریف انحراف معیار کسر مخلوط مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: کوره امحاء کننده، گاز پسماند، دینامیک سیالات محاسباتی، اختلاط، زمان ماندگاری.

۱- مقدمه

در مقاله حاضر، با استفاده از مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی محفظه احتراق، اثر مقطع ورود جریان گاز پسماند به داخل محفظه احتراق، در میزان زمان ماندگاری گونه های شیمیایی و همچنین یکنواختی جریان داخل کوره مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. میزان اختلاط داخل محفظه با استفاده از تعریف پارامتر انحراف معیار کسر مخلوط در ارتفاع های مختلفی از کوره مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در این زمینه، یک روش برای ارزیابی میزان اختلاط توسط مرجع [10] پیشنهاد شده و توسط مرجع [11] برای هندسه دویعدی از یک امحاء کننده جهت ارزیابی آن مورد استفاده قرار گرفته است. در این مرجع نشان داده شده است که با تغییر مسیر جت ورودی به داخل محفظه احتراق، از طریق کنترل نواحی با چرخش دائمی، میزان اختلاط داخل محفظه را می توان

- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

-۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

³.Recirculation

با تغییر شار مومنتوم ورودی به جریان اصلی تغییر داد. تغییر زاویه و فاصله جت های جریان ورودی به داخل محفظه احتراق و اثر آن ها بر میزان اختلاط داخل محفظه و کاهش میزان آلاینده ها توسط مرجع [12] مطالعه شده است.

متغیرهای طراحی که درباره جت های جریان در ورود به محفظه احتراق در پیش روی محقق قرار دارند، [5] عبارتند از :

۱- نحوه تأثیر الگوی ورود جریان به داخل کوره، بر رفتار توزیع گاز پسماند در داخل محفظه احتراق.

۲- تعداد، موقیت و دبی جرمی جریان هر یک از جت های گاز پسماند.

۳- زاویه ورود جت ها نسبت به محور کوره و همچنین دیواره کوره مورد بررسی.

۴- شکل مقطع جت های ورودی که در یک آرایش مقابل هم واقع شده اند.

هدف اصلی این مقاله، مطالعه اثرات شکل مقطع جریان و آرایش قرارگیری جت ها در زمان ماندگاری ذرات گاز و میزان اختلاط در داخل کوره امحاء گازهای پسماند سنگین هیدروکربنی است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- کسر مخلوط^۱

در احتراق غیر-پیش آمیخته^۲، سوخت و اکسیدکننده از طریق جریان هایی مجزا وارد محفظه احتراق می شوند. مکانیزم تشکیل شعله های غیر-پیش آمیخته در نقطه مقابل شعله های پیش-آمیخته است که در آن ها جریان سوخت و اکسیدکننده قبل از ورود به منطقه واکنش در مقیاس مولکولی، با یکدیگر مخلوط می شوند. در یک حالت خاص، ترموشیمی می تواند تنها توسط یک پارامتر، کسر مخلوط، بیان شود. کسر مخلوط که توسط متغیر f نشان داده می شود، برابر کسر جرمی است که از جریان سوخت نشأت می گیرد. عبارتی، مقدار این پارامتر، همان کسر جرمی محلی گونه های شیمیایی است که از کربن، هیدروژن و ... تشکیل شده اند و ممکن است واکنش آن ها کامل شده و یا هنوز شروع نشده باشد. مزیت این روش، استفاده از این مفهوم است که در طول واکنش های شیمیایی، تعداد اتم های عناصر ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. بنابراین در طول یک واکنش شیمیایی، کسر مخلوط، یک پارامتر اسکالر دارای بقاء^۳ خواهد بود. در این صورت، معادله حاکم بر این پارامتر، دیگر، دارای بخش تولید نخواهد بود. با استفاده از این مفهوم، مسئله احتراق به یک مسئله اختلاط تبدیل می شود و مسئله بسته شدن معادلات غیرخطی مربوط به پارامترهای نرخ متوسط مرتفع خواهد گردید. این پارامتر توسط معادله (۱) تعریف می شود.

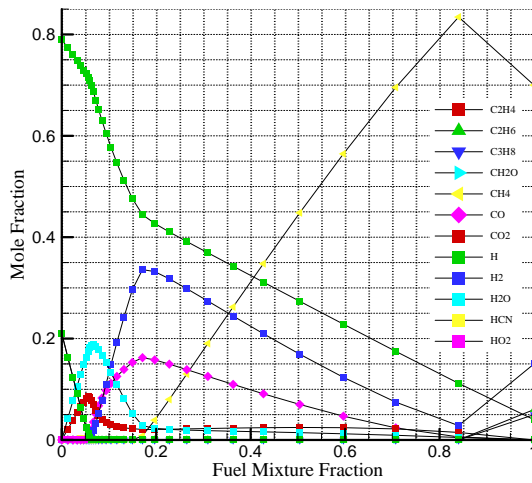
$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

مدلسازی شعله های غیر-پیش آمیخته شامل حل معادلات انتقال برای یک و یا دو عدد از اسکالرهایی دارای بقاء می باشد که پارامتر کسر مخلوط را شامل می شوند. معادلات برای هر گونه شیمیایی به صورت جداگانه حل نمی شود، بلکه غلظت گونه های شیمیایی از طریق محاسبه میدان کسر جرمی حاصل می گردد. با استفاده از مفاهیم بیان شده، رابطه بین دما، چگالی و کسر مولی گونه های شیمیایی با استفاده از منحنی های زیر بدست می آید.

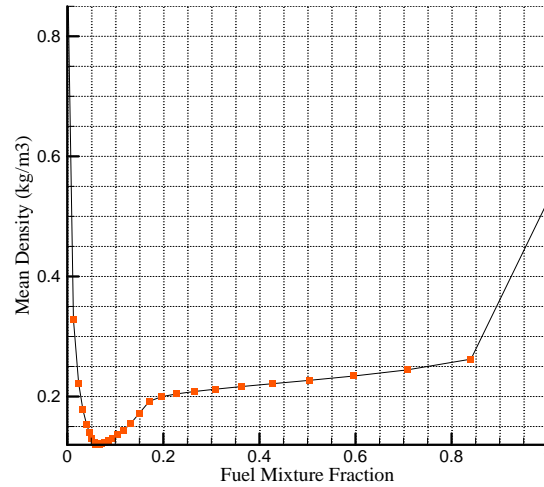
¹. Mixture Fraction

². Non-premixed Combustion

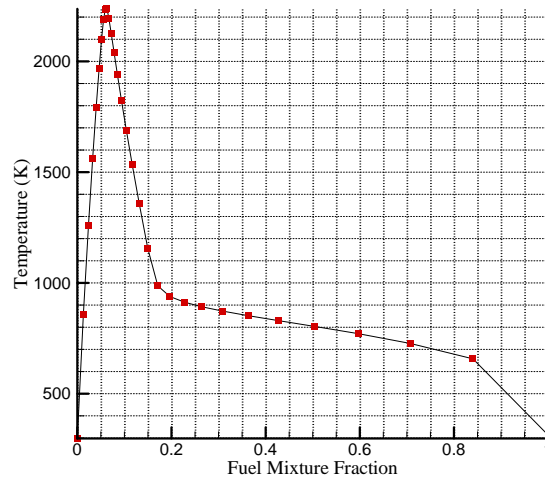
³. Conserved Scalar



شکل ۲- کسر مولی گونه های شیمیایی مختلف برحسب کسر مخلوط سوخت.



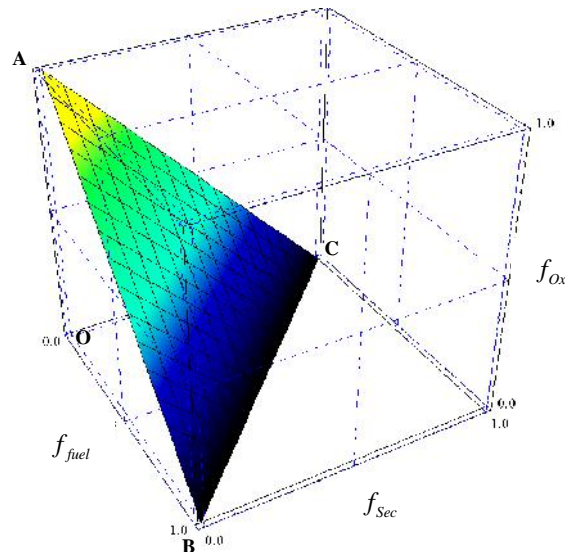
شکل ۱- چگالی متوسط برحسب کسر مخلوط سوخت.



شکل ۳- دما برحسب کسر مخلوط سوخت.

محاسبات مربوط به ترموشیمی و برهم کنش میان شیمی و توربولانس با استفاده از تابع چگالی احتمال بدست آمد. هرگاه ضرایب پخش برای تمامی گونه های شیمیایی یکسان باشد، آنگاه معادله (۱) برای همه عناصر یکسان بوده و کسر مخلوط دارای یک تعریف واحدی خواهد بود. در این حالت کسر مخلوط برابر کسر جرمی عنصری خواهد بود که متعلق به جریان سوخت است. هرگاه جریان ثانویه ای (که می تواند سوخت، اکسیدکننده و یا جریان بی اثر باشد) در میدان جریان حضور داشته باشد، رابطه کسر مخلوط جریان های مذکور از رابطه (۲) تبعیت می کند:

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \quad (2)$$



شکل ۴- رابطه بین کسرهای مخلوط مربوط به جریان های سوخت، اکسیدکننده و جریان ثانویه.

معادله متوسط گیری شده کسر مخلوط بر پایه چگالی بشکل زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\dots \bar{f}) + \nabla \cdot (\dots \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\tilde{t}}{\dagger_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (3)$$

برای بستن معادلات برهم کنش شیمی-توربولانس، واریانس کسر مخلوط به صورت معادله (۴) تعریف می گردد

$$\frac{\partial}{\partial t}(\dots \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\dots \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\tilde{t}}{\dagger_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \tilde{t} (\nabla \bar{f})^2 - C_d \dots \frac{V}{k} \overline{f'^2} \quad (4)$$

جدول ۱- مقادیر ثابت های به کار رفته در معادله (۴).

ثابت	\dagger_t	C_g	C_d
مقدار	۰/۸۵	۲/۸۶	۲/۰

بطوریکه در معادله (۴)، f' از رابطه زیر بدست می آید:

$$f' = f - \bar{f} \quad (5)$$

۲-۲- مدل آشفتگی

مدل آشفتگی مورد استفاده، $k-\epsilon$ است که متشکل از دو معادله زیر می باشد، [13,14]:

$$\dots \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla k \right) - \nabla \cdot \left[\left(\tilde{t} + \frac{\tilde{t}}{\dagger_k} \right) \nabla k \right] - \tilde{t} P + \dots \epsilon = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\dots \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\dots \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\tilde{t}}{\dagger_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \tilde{t} (\nabla \bar{f})^2 - C_d \dots \frac{V}{k} \overline{f'^2} \quad (7)$$

معادله (۶)، بخش انرژی سینتیکی و معادله (۷)، بخش اضمحلال معادلات آشفته را شامل می شوند. تعاریف ضرایب ویسکوزیته جریان آشفته، انرژی سینتیکی آشفته، اضمحلال آشفته و تولید آشفته بترتیب توسط معادلات (۸) تا (۱۱) بیان می شود، [15].

$$\tilde{\tau} = \dots C_{\tau} \frac{k^2}{\nu} \quad (۸)$$

$$k = \frac{1}{2} \langle |u'|^2 \rangle \quad (۹)$$

$$\nu = \frac{\tilde{\tau}}{2} (\nabla u' + \nabla u'^T) \quad (۱۰)$$

$$P = \nabla \bar{u} : (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (۱۱)$$

همچنین ثابت های بکار رفته در معادلات (۶) و (۷) برابر مقادیر جدول ۲ می باشند.

جدول ۲- مقادیر ثابت های بکار رفته در معادلات k و ν ، [16, 17].

ثابت	C_{τ}	\dagger_k	\dagger_{ν}	$C_{\nu 1}$	$C_{\nu 2}$
مقدار	۰/۰۹	۱/۰	۱/۳	۱/۴۴	۱/۹۲

۲-۳- تابع دیواره

در مجاورت دیواره از تابع دیواره استاندارد با معادلات زیر استفاده گردید:

$$y^+ = \frac{\dots u}{\tilde{\tau}} \sqrt{\frac{\dagger_w}{\dots}} \quad (۱۲)$$

$$u^+ = \frac{u}{\sqrt{\frac{\dagger_w}{\dots}}} \quad (۱۳)$$

$$u_{\dagger} \equiv \sqrt{\frac{\dagger_w}{\dots}} \quad (۱۴)$$

$$u^+ = y^+; y^+ < 30 \quad (۱۵)$$

$$u^+ = \frac{1}{\dagger} \ln(Ey^+); 40 < y^+ \quad (۱۶)$$

معادله (۱۲)، عدد رینولدز محلی دیواره، معادله (۱۳)، سرعت بی بعد شده بر اساس سرعت اصطکاکی و معادله (۱۴)، تعریف سرعت اصطکاکی می باشند که مقدار سرعت بی بعد تعریف شده در معادله (۱۳)، بر اساس فاصله مورد بررسی از دیواره با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) تعریف می شود. ثابت \dagger ، ثابت ون کارمن بوده و مقدار آن تقریباً برابر ۰.۴۱ می باشد. E در معادله (۱۶) پارمتر زبری بوده و برای سطوح صاف ۹۰ می باشد.

۲-۴- معادلات بقا

معادلات بقای جرم و مومنتوم بترتیب توسط معادلات (۱۶) و (۱۷) تعریف شده و آخرین جمله در معادله مومنتوم، بیانگر اثرات شناوری ناشی از تغییرات دما می باشد.

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \frac{\partial (\dots u_i)}{\partial x} = 0 \quad (۱۷)$$

$$\frac{\partial(\dots u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\dots u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\sim + \sim_i) \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right) + \dots g_i (T - T_0) \quad (18)$$

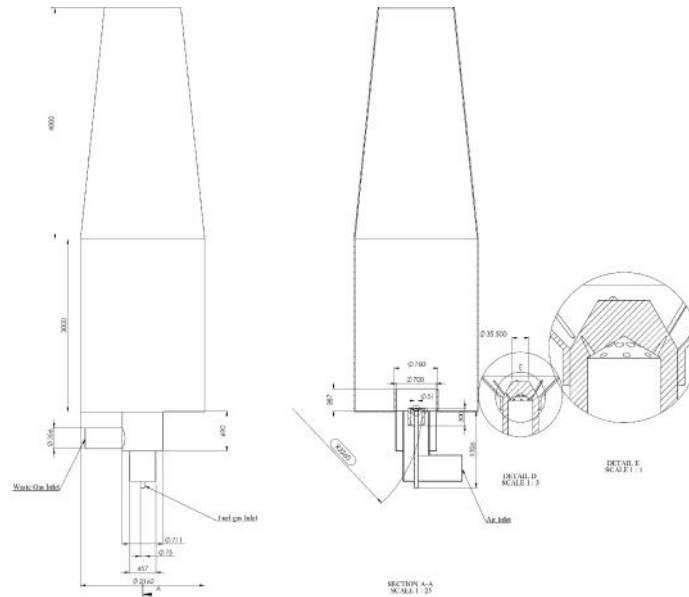
۲-۵- پارامتر اختلاط

برای ارزیابی میزان اختلاط داخل محفظه احتراق رابطه (۱۹) تعریف شد. در این رابطه، N ، تعداد کل سلول هایی است که روی یک صفحه عمود بر محور کوره قرار گرفته اند. f_i ، کسر مولی متعلق به المان i روی همان صفحه می باشد.

$$\dagger = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2} \quad (19)$$

۳- دامنه حل و شرایط مرزی

هندسه کوره مورد مطالعه، مطابق با شکل ۵ بوده و دارای شرایط مرزی مطابق با جدول ۳ می باشد. دما و فشار محیط بترتیب برابر ۱۵ درجه سانتیگراد و ۸۲۰۰۰ پاسکال می باشند.



شکل ۴- هندسه کوره امحاء گاز پسماند.

جدول ۳- شرایط مرزی حاکم بر مسئله.

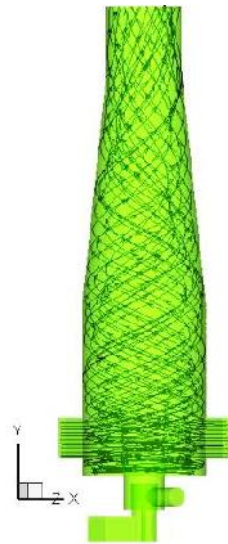
ورودی	دما (کلوین)	دبی جرمی جریان (گرم بر ثانیه)	قطر هیدرولیکی (میلی متر)	کسر مولی ^۱ اجزای تشکیل دهنده جریان				
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂	N ₂
گاز پسماند	۳۳۸.۱۵	۲۰۸۴	۳۵۰	۰.۷	۰.۰۶	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۰۴
				CH ₄	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
سوخت	۳۱۳.۱۵	۳۰	۵ (تعداد نازل های سوخت، ۱۶ عدد می باشند.)	۰.۰۲	۰.۰۶۵	۰.۱	۰.۰۷۵	۰.۷۴
هما	۲۹۸.۱۵	۹۱۷	۵۰۰	O ₂			N ₂	

^۱. Mole Fraction

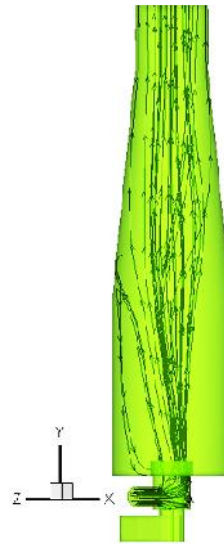
				۰.۲۱	۰.۷۹
--	--	--	--	------	------

۴- ارائه نتایج

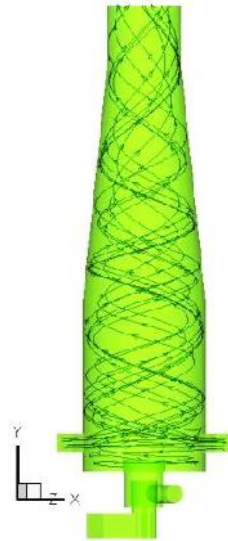
برای حل جریان، معادلات بصورت مرتبه ۲ گسسته سازی شدند. برای کوپلینگ سرعت و فشار از نوع SIMPLE، استفاده گردید و در نهایت به نتایج زیر انجامید.



شکل ۶- ورودی گاز پسماند، مستطیلی شکل، مستقیم و مماس بر دیواره کوره.



شکل ۵- طرح کوره اصلی، با ورود گاز پسماند از پایین.



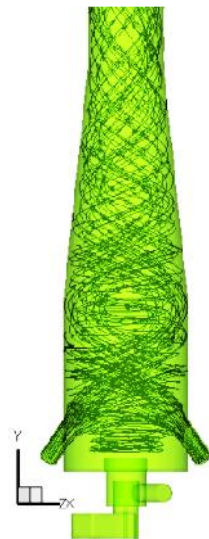
شکل ۸- ورودی گاز پسماند، مربع شکل، مستقیم و مماس بر دیواره کوره.



شکل ۷- ورودی گاز پسماند، دایروی، مستقیم و مماس بر دیواره کوره.

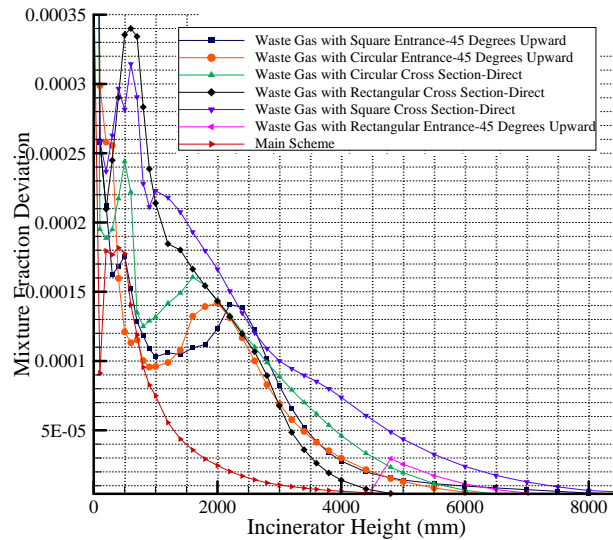


شکل ۹- ورودی گاز پسماند، مربعی شکل، ۴۵ درجه بسمت بالا و شکل ۱۰- ورودی گاز پسماند، مستطیلی شکل، ۴۵ درجه بسمت بالا و مماس بر دیواره کوره.

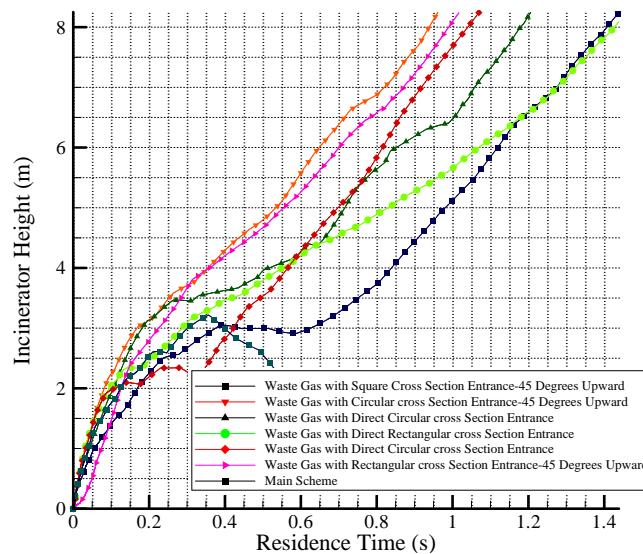


شکل ۱۱- ورودی گاز پسماند، دایروی، ۴۵ درجه بسمت بالا و مماس بر دیواره کوره.

برای بررسی میزان کارایی روش های ورود گاز پسماند به داخل کوره، پارامتر تعریف شده در معادله (۱۹)، مورد استفاده قرار گرفت. بنابه تعریف این پارامتر، با افزایش میزان اختلاط داخل محفظه احتراق، مقدار t به صفر میل می کند. این پارامتر در قطاع های عرضی کوره مورد بررسی قرار گرفت و نمودار شکل (۱۲)، از طریق برازش منحنی از مقدار پارامتر مذکور از این صفحات بدست آمد. میزان زمان ماندگاری محصولات احتراقی داخل محفظه احتراق با روش تعقیب ذرات لاگرانژی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایجی که در نمودار شکل (۱۳) نشان داده شده است، حاصل گردید.



شکل ۱۲- میزان کارایی طرح های مختلف در افزایش اختلاط داخل کوره.



شکل ۱۳- مقایسه زمان ماندگاری گونه های شیمیایی داخل کوره.

۵- نتیجه گیری

بر اساس حل دینامیک سیالات محاسباتی جریان داخل یک کوره امحاء گاز پسماند، رفتار جریان داخل این کوره مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده گردید که شکل مقطعی که یک جریان توسط آن وارد یک محفظه می شود، تأثیر بسزایی در رفتار میدان جریان و میزان زمان ماندگاری محصولات احتراقی داخل محفظه احتراق خواهد داشت. براساس نتایج بدست آمده، در حالیکه مقطع جریان گاز پسماند در ورود به کوره، مربعی شکل، مماس بر دیواره کوره و دارای زاویه ۴۵ درجه بسمت بالا باشد، محصولات احتراقی بیشترین مقدار زمان ماندگاری را در داخل کوره خواهند داشت. دومین انتخاب، ورودی های با مقاطع مستطیلی افقی و مماس بر دیواره خواهند بود. مقدار زمان ماندگاری بالا موجب کاهش غلظت آلاینده هایی خواهد بود که در اثر احتراق ناقص سوخت تولید می شوند. علاوه بر بررسی میزان زمان ماندگاری، سنجش میزان اختلاط جریان داخل کوره است که بعنوان یکی از پارامترهایی است که دارای نقش تعیین کننده ای در تولید آلاینده های یک سیستم احتراقی خواهد



داشت. با بررسی این پارامتر برای طرح های مختلف مطرح شده در ارتفاع های مختلفی از کوره، می توان به این نتیجه رسید که مقاطع مستطیلی چه در حالت مستقیم و چه در حالتی که دارای یک زاویه بسمت بالا می باشند، موجب افزایش اختلاط در کوره های صنعتی می شوند. بنابراین بعنوان یک نتیجه کلی در کوره های صنعتی می توان گفت: استفاده از مقاطع مستطیلی برای ورودی جریان های واکنشی و غیر واکنشی با نسبت طول به عرض نه چندان زیاد می تواند اثر بسزایی در افزایش اختلاط داخل محفظه احتراق و همچنین افزایش زمان ماندگاری گونه های شیمیایی برای جریان های واکنشی، برای قرار گرفتن هرچه بیشتر گونه ها در معرض دماهای بالاتر و اکسیداسیون کامل آن ها، داشته باشد.

مراجع

- 1- Beer, J.M., and Chigier, N.A., *Combustion Aerodynamics*, 3rd Edition, Applied Science Publishers, London, 1970.
- 2- Drake, P. F., and Hubbard, E. F., “*Combustion System Aerodynamics and Their Effect on the Burning of Heavy Fuel Oil*”, Journal of the Institute of Fuel, pp. 39, 98, 1966.
- 3- Kerr, N.M., “*Swirl-Effect on Flame Performance and Modeling of the Swirling Flames*”, Journal of the Institute of Fuel, Vol. 38, pp. 527-538, 1965.
- 4- Elsayed, Khairy, and Lacor, Chris, “*The Effect of Cyclone Inlet Dimensions on the Flow Pattern and Performance*”, Applied Mathematical Modeling, Vol. 35, No. 4, pp. 1952-1968, 2011.
- 5- Syred, N., and Beer, J.M., “*Combustion in Swirling Flows: A Review*”, Combustion and Flame, vol. 23, pp.143-201, 1974.
- 6- Yang, W., and Zhang, J., “*Simulation of Methane Turbulent Swirling Flame in the TECFLAM Combustor*”, Journal of Applied Mathematical Modeling, Vol. 33, No. 6, pp. 2818-2830, 2009.
- 7- Surjosatyo, Adi, and Nasir Ani, Farid, “*Study of Enhancing the Swirl Burner Performance on a Small Scale Biomass Gasification*”, International Journal of Engineering & Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 21-38, 2011.
- 8- Lilley, D.G., “*Turbulent Swirling Flame Prediction*”, AIAA Journal Paper, Vol. 12, No. 2, pp. 219-223, 1974.
- 9- Launder, B. E., and Spalding, D. B., “*The numerical computation of turbulent flows*”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- 10- Choi, S., Lee, J. S., Kim, S. K., and Shin, D. H., “*Cold Flow Simulation on Municipal Waste Incinerators*”, 25th Symposium on Combustion, Vol. 25, No. 1, Irvine, CA, pp. 317-323, 1994.
- 11- Kim, S. K., Shin, D. H., and Choi, S., “*Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulator*”, Combustion and Flame, Vol. 106, pp. 241-251, 1995.
- 12- Ryu, C. K., and Choi, S., “*Design Consideration for the Cross Jet Air Mixing in the Municipal Solid Waste Incinerators*”, ASME IMECE Symposium on Fire and Combustion System, San Francisco, CA, 1995.
- 13- Launder, B.E., and Spalding, D.B., *Mathematical Models of Turbulence*, Vol. 53, Issue 6, Academic Press, London, 1972.
- 14- Yaxin, S., Zheng, A., and Zhao, B., “*Numerical Simulation of effect of Inlet Configuration on Square Cyclone Separator Performance*”, Powder Technology, Vol. 210, No. 3, pp. 293-303, 2011.
- 15- Mohammadi, B., and Pironneau, O., *Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model*, WILEY, 1994.



پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



16- Thangam, S., “*Analysis of Two-Equation Turbulence Models for Recirculating Flows*”, ICASE, report No. 91-61, 1991.

17- Wasserman, M., Mor-Yossef, Y., Yavneh, I., and Greenberg, J. B., “*A Robust Implicit Multigrid Method for RANS Equations with Two-equation Turbulence Models*”, Journal of Computational Physics, Vol. 229, No. 16, pp. 5820-5842, 2010.