مطالعه اثر هندسه سر مشعل با ديواره مخروطي بر جريان احتراقي غير پيش آميخته آشفته

سیدعبدالمهدی هاشمی دانشیار – دانشکده مکانیک دانشگاه کاشان hashemi@kashanu.ac.ir

چکیدہ

در تحقیق حاضر با استفاده از شبیه سازی عددی به مطالعه اثر هندسه سرمشعل مخروطی بر شعله غیرپیش آمیخته آشفته پرداخته شدهاست. هندسه محفظه احتراق استوانهای شکل و با تقارن محوری درنظرگرفته شدهاست. حضور سرمشعل مخروطي در ابتداي محفظه احتراق باعث تغيير جهت جريان برگشتی به سمت واکنشدهندهها شده و تغییرات قابل توجهی را در یارامترهای شعله ایجاد کرده و مجموعا باعث افزایش پایداری شعله می گردد. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پيوستگي، اندازه حرکت، انرژي و جزءها با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شدهاند. برای مدلسازی اثر آشفتگی بر احتراق از مدل ترکیبی اضمحلال ادی/نرخ محدود استفاده شده و براي محاسبه سينتيك واكنش از مكانيزم پنج مرحلهاي معروف نيكول استفاده شدهاست. برای مدلسازی آشفتگی از مدل k- ε استاندارد استفاده شدهاست. با بررسی نتایج مشاهده میشود که با کاهش زاویه سرمشعل مخروطی و همچنین افزایش طول این سرمشعلها، طول شعله کاهش یافته و دمای شعله افزایش می یابد که این موجب افزایش پایداری شعله می گردد.

كليدواژگان: شعله غيرييش آميخته آشفته، پايداري شعله، سرمشعل مخروطي، دمای شعله، طول شعله

مقدمه

برای مدل کردن احتراق لازم است که نرخ انجام واکنش های شیمیایی مشخص شود. علاوه بر این بایستی که نوع واکنشها و تعداد آنها نیز مشخص باشد. همچنین در نتیجه تداخل توربولانس و سینتیک شیمیایی، بایستی اثرات واکنش شیمیایی بر شعله نیز روشن شود. هر چند محققان زیادی بر روی احتراق جريان آرام مطالعه كرده و نتايج خود را انتشار دادهاند اما در عين حال در غالب کاربردهای صنعتی احتراق در محیطی آشفته اتفاق میافتد. در زمینه احتراق جریان آشفته مطالعات کمتری صورت گرفته و همچنین نکات ابهام آميز فراوانی وجود دارد. پيترز [1]، پاپ [7]، پوينسوت و وينانته [۳]، وارناتز [۴] و همچنین لیبی و ویلیامز [۵] بسیاری از نتایج استخراج شده در این حوزه را گردآوردی کردند.

یکی از مسائل مهم در پدیده احتراق، پایدارسازی شعله میباشد. در طی سالهای اخیر تحقیقات و تلاشهای گستردهای، چه به صورت تجربی و چه به صورت شبیه سازی عددی، در زمینه ایجاد احتراق پایدار صورت پذیرفته است. محققان تا کنون روشهای متفاوتی را برای رسیدن به این مهم به کار بردهاند. یکی از روشهای پایدارسازی شعله غیر پیشآمیخته، استفاده از جسم مانع ٔ

مرتضی درودی دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مکانیک دانشگاه کاشان m.doroodi@kashanu.ac.ir

است. جسم مانع، جسم صلبي است كه با قرار گرفتن بين سوخت و اکسیدکننده و ایجاد ناحیه به گردش در آمده، باعث اختلاط بهتر بین سوخت و اکسیدکننده می شود. تلاش های اولیه به منظور بهبود نقش هندسه جسم مانع بر روی منطقه چرخشی بر روی شعلههای پیش آمیخته بوسیله کوندو و همکارانش [۶] صورت گرفت. او سه هندسه صفحه، گوه و استوانه را در آزمایش های خود به کاربرد. نتایج نشان داد که کشش منطقه چرخشی که به صورت ماکزیمم مقدار دبی جریان معکوس تعریف شد، بیشترین مقدار را در نمونه صفحه تخت و كمترين مقدار را در نمونه استوانه داشت.

ایجاد جریان چرخشی⁷ با استفاده از چرخاننده جریان و همچنین استفاده از جریان های متقاطع و برخوردی جهت ایجاد جریان برگشتی روش دیگر پایدارسازی شعله میباشد. شاید قدیمیترین بررسی حرکتهای چرخشی توسط لیندن انجام شده که اثر پارامترهای هندسی را در جداکنندههای صنعتی مطالعه کرده است [۷]. روشهای متعددی برای ایجاد جریانهای چرخشی به کار برده می شوند که از آن جمله می توان به پرههای چرخشی ورودی، تیغههای چرخاننده مسطح و یا با شکل آیرودینامیکی، پروانههای گردش مستقیم بدنه حاوی سیال و نوار پیچیده شده آشاره نمود [۸–۸]. مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی به منظور درک صحیح اثرات چرخش بر جریان های همدما و احتراقی انجام شده است. متور و همکاران [۱۰] نشان دادند که چرخش قوی هوا یک منطقه چرخشی در مرکز محفظه تولید میکند که موجب افزایش پایداری شعله می گردد.

اخیراً استفاده از سوختهای جدیدی نظیر هیدروژن که دمای بالاتری نسبت به سوختهای فسیلی ایجاد میکنند مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مهمترین مزایای به کارگیری سوخت هیدروژن، افزایش پایداری شعله وکاهش توليد برخي آلايندهها مخصوصاً اكسيدهاي كربن و گوگرد ميباشد. وانگ و همکاران [۱۱] به طور تجربی اثر شدت جریان آشفته هوا را در شعلهای با سوخت هيدروژن- نيتروژن مطالعه كردند. آنها نشان دادند با افزايش شدت آشفتگي هوا، طول ناحيه واكنش كاهش مييابد.

از دیگر روشهایی که میتوان برای پایدارسازی احتراق از آن استفاده کرد، بكارگیری سرمشعل است. انتقال حرارت از محصولات داغ احتراق موجب گرم شدن سر مشعل میشود و سطح داغ سر مشعل با افزایش دمای مخلوط نسوخته موجب احتراق آن می شود. سر مشعل می تواند با ناحیه های چرخشی که در گوشههای آن به وجود میآید به پایداری شعله کمک نماید. جریانهای چرخشی تأثیری قابل توجه بر پارامترهای متعددی از میدان جریان دارند که از

² Swirl

³Twisted tape ⁴ Turbulent Intensity

¹ Bluff body

آن جمله مى توان به تغيير شكل و اندازه شعله به شكل كاهش طول و افزايش ضخامت آن، کاهش ضخامت لایه مرزی و افزایش نوسانات مماسی و شعاعی آشفتگی در داخل محفظه اشاره نمود. از طرفی این نواحی چرخشی، باعث انتقال حرارت از ناحیه های دما بالا به قسمتهای دما پایین که عموما شامل واکنش دهندهها هستند، می شوند. این عمل در واقع نوعی پیش گرم کردن مواد اولیه است که به پایداری شعله کمک می کند. پرسر و همکارانش [۱۲] به مطالعه عددی تأثیر ابعاد تونل مخروطی شکل بر پایداری شعله در کوره پرداختند. آنها در کار خود نشان دادند که با تغییر در هندسه و ایجاد ناحیههای چرخشی در نقاط مختلف محفظه احتراق، میتوان به شعلهای پایدارتر دست یافت. حاجیعلی گل و همکاران[۱۳] در تحقیقی دیگر با بررسی ابعاد سرمشعل بر روی یک شعله پیش مخلوط آشفته ثابت کردند که با افزایش طول سرمشعل اندازه شعله كاهش يافته و شعله پايدارتر مىشود. با وجود سرمشعل گردابه هایی در اطراف ورودی واکنش دهنده ها ایجاد میشود که باعث برگشت جریان گاز داغ و اختلاط آنها با واکنش دهنده ها می شود. آنها نشان دادند که رفتار شعله به مقدار قابل توجهی به این جریانهای برگشتی وابسته است. حاجی علی گل و همکاران[۱۴] در تحقیقات بعدی خود با تغییر دادن مقدار شدت آشفتگی هوا در ابعاد مختلف سرمشعل پایداری شعله را بررسی کردند. آنها نشان دادند با افزایش شدت آشفتگی هوای ورودی طول شعله و دمای شعله کاهش قابل توجهی داشته و همچنین گرادیان دما و میزان NO بشدت تغییر می کنند. فروزنده و همکاران[۱۵] در یک مطالعه تجربی به بررسی اثر ابعاد سرمشعل بر روی طول شعله و آلاینده های مونواکسید کربن و اکسید نیتروژن در یک شعله غیر پیش آمیخته پرداختند. نتایج بهدست آمده نشان داد که در یک توان ثابت با افزایش سرعت هوای ورودی، مقدار طول شعله کاهش و در یک سرعت هوای ثابت با افزایش توان مشعل، طول شعله افزایش می یابد. همچنین با بررسی اثر تغییر طول و قطر داخلی سرمشعلها بر طول شعله مشاهده گردید که در یک توان ثابت مشعل، تغییر طول و قطر داخلی سرمشعل، تأثیر چندانی روی طول شعله ندارد، درحالی که افزایش قطر موجب کاهش حداکثر ۴۲ درصدی ناکس و افزایش ۴۰ درصدی آلاینده کربن مونواکسید می شود. فروزنده و همکاران [۱۶] در تحقیقی دیگر به مطالعه تجربی اثر یک سرمشعل ساده بر روی پایداری شعله غیرپیش آمیخته یرداختند. در تحقیق آنها پایداری شعله و توزیع دمایی در یک مشعل غیر پیش آمیخته تحت تأثیر تغییر هندسه سرمشعل مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام آزمایشها یک نمونه مشعل غیر پیشآمیخته و سرمشعلهای استوانهای شکل با ابعاد مختلف طراحی و ساخته شده است. بهمنظور بررسی اثر تغییر هندسه سرمشعل، در یک سری از آزمونها از سرمشعلهای با قطر داخلی ۴، ۶ و ۸ سانتیمتر و طول یکسان ۱۰ سانتیمتر و در سری دیگر از سرمشعلهای با طولهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و قطر داخلی یکسان ۶ سانتیمتر استفاده شده است. با بررسی کانتورهای دما، مشاهده میشود که با افزایش طول سرمشعل، منطقه بیشینه دما به سمت داخل سرمشعل حرکت می کند و درنتیجه پایداری افزایش می یابد .همچنین با افزایش قطر سرمشعل منطقه بیشینه دما به سمت خارج سرمشعل حرکت کرده و پایداری کاهش مىيابد.

در مقاله حاضر به بررسی و مطالعه بر روی تاثیر هندسه و تغییر ابعاد سرمشعل مخروطی شکل بر روی پارامترهای شعله غیرپیش مخلوط که مهمترین آنها پایداری است، پرداخته شده است. در این تحقیق تلاش شده تا بهترین الگوی هندسی برای سرمشعل جهت پایدارسازی و پارامترهای مطلوب شعله جستجو شود.

معادلات حاكم

شبیه ازی جریان واکنشی داخل محفظه احتراق، نیاز به حل معادلات بقا با توجه به فرآیندهای موجود در آن دارد. معادلات حاکم بر جریان آشفته واکنشی در حالت دائم و با فرض جریان تراکم پذیر توسط معادلات زیر بیان می شوند [۴۰–۳۹].

پيوستگى

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

اندازه حرکت

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}\right]$$
(7)

انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho U_{i}h) = \frac{\partial}{\partial x_{i}}(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_{i}} - \sum_{i}h_{i}L_{i} + u_{i}(\tau_{i}) = 0) + S$$
(7)

$$\sum_{j} h J + u (\tau_{ij}) + S h$$

جزءها

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i Y_n) = -\frac{\partial J_{i,n}}{\partial x_i} + R_n \tag{f}$$

که در آن ρ جرم مخصوص میباشد و از قانون گاز ایده آل به دست می آید. همچنین X_i مختصات، μ لزجت دینامیک، U_j و U_j به ترتیب سرعت میانگین و نوسانی در جهت f و k_{eff} ضریب هدایت مؤثر میباشند. مقدار k_{eff} به صورت میباشد. k_t تعریف میشود که در آن k ضریب هدایتی و k_t هدایت آشفتگی جریان میباشد. L ضریب دیفیوژنی جزء f و f_{eff} تانسور تنش مؤثر است. میباشد از ضریب دیفیوژنی جزء از و f_{eff} تانسور تنش مؤثر است. میباشد میشوند که دارای دقت مرتبه دو است و از روشهای مرتبه اول و گسسته میشوند که دارای دقت مرتبه دو است و از روشهای مرتبه اول و نمایی دقیق تر میباشد [۱۷]. برای اصلاح ترم فشار از الگوریتم سیمپل^۳ [۱۸]

آشفتگی جریان

k- ε برای آشفتکی جریان از مدل k- ε استاندارد استفاده شدهاست. مدل معروفترین مدل دو معادلهای میباشد، چراکه فهم آن آسان و استفاده از آن در

²Second-order upwind scheme(SOU) ³SIMPLE

برنامهنویسی ساده میباشد. این مدل یک مدل نیمه تجربی میباشد. مدل استاندارد *٤- k* اولین بار توسط جونز^۲ و لاندر ارائه شد [۱۹] و در بسیاری از کاربردهای مهندسی و تحقیقاتی مورد کاربرد قرار گرفته است. در مدلهای*٤- k* میدان آشفته براساس دو متغیر بیان میشود: الف- انرژی جنبشی جریان آشفته *k* ب- نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی *٤*

مدل استاندارد *k-ɛ* دو معادله انتقال را برای بهدست آوردن دو متغیر بالا حل میکند [۲۰]:

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho k u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{i}}[(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}})\frac{\partial k}{\partial x_{i}}] + G_{k} + G_{b} - \rho \varepsilon - Y_{M}$$

$$(\Delta)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho \varepsilon u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{i}}[(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{i}}] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_{k} + C_{3\varepsilon}G_{b}) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(6)

که در آن G_k بیانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گرادیانهای سرعت متوسط و C_{1e} و C_{2e} ضرایب ثابتی هستند که بهصورت تجربی تعریف میشوند. σ_k و σ_s عدد پرانتل برای k و σ میباشند که آنها نیز بهصورت تجربی تعریف میشوند. لزجت آشفتگی از روی مقادیر k و σ و با رابطه زیر محاسبه میشوند:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{V}$$

که در آن C_{μ} یک ثابت تجربی میباشد. این مقادیر ثابت برای مدل استاندارد C_{μ} یک ثابت تجربی میباشد. این مقادیر جدول (۱) پیشنهاد شده است. حدول (۱) مقادی ثابت مدار استاندارد F [۱۹]

C_{μ}	$C_{l\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_{arepsilon}$	σ_k	
0.09	1.44	1.92	1	1.3	

مدلسازي احتراق

جهت شبیه سازی فرآیند احتراق از مدل ترکیبی اضمحلال ادی، نرخ محدود استفاده شده است. بطور کلی در یک واکنش شیمیایی، نرخ تولید برای هر جزء *آ*ام را می توان جمع نرخهای *N* واکنش میانی که در آنها جزء *آ*ام تولید می-شود، دانست[۲۱] :

$$R_i = M_i \sum_{k=1}^{N_R} R_{i,k} \tag{(A)}$$

حال باید نرخ N واکنش میانی را محاسبه کرد. در این مدل، برای نرخ هر واکنش میانی دو پارامتر مستقل محاسبه میگردد:

 . نرخ واکنش شیمیایی با استفاده از معادله تعمیم یافته آرنیوس که در رابطه (۹) به تفصیل بیان می شود.

 $R = A \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right) T^{\beta} [C_f]^m [C_{ox}]^n \tag{9}$

که در این رابطه A فاکتور پیش توانی^۴ نامیده شده و E_a انرژی فعالسازی^۵ می-باشد. فاکتور پیش توانی و بقیه ثوابت، مانند بتا بصورت تجربی بدست میآیند. ۲. نرخ اضمحلال ادی که وابسته به اختلاط است. برای اندازه گیری این.

با المرابع المسافري مي وابسته به الماري المساد بواي المسري ميري پارامتر سه رابطه تعريف مي گردد:

$$\overline{\omega_F} = \overline{\rho} A \overline{Y_F} \frac{\varepsilon}{k} \tag{11}$$

$$\overline{\omega_{O_2}} = \overline{\rho} \frac{AY_{O_2}}{\upsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tag{11}$$

III. نرخ کسر جرمی متوسط محصول:

$$\overline{\omega_p} = \overline{\rho} \frac{A.B}{(1+\upsilon)} \overline{Y_p} \frac{\varepsilon}{k} \tag{17}$$

که در روابط (۱۰) تا (۱۲) \overline{Y}_i نشاندهنده میانگین کسر جرمی جزء می باشد. با محاسبه این سه رابطه، کمترین اینها به عنوان نرخ اضمحلال ادی تعیین می-گردد. حال از بین این دو پارامتر (نرخ واکنش شیمیایی و نرخ اضمحلال ادی)، آن مقداری که کوچکتر است به عنوان سرعت واکنش Xام درنظر گرفته می-شود. این رویه برای N واکنش میانی انجام شده، سپس بایکدیگر جمع شده و نهایتا نرخ تولید یا مصرف جزء آام مشخص می شود. بنابراین با استفاده از این مدل می توان در بسیاری از شبیه سازی ها از محاسبات سنگین سینتیکی خودداری کرده و بدون اینکه دقت حل کاهش یابد، بار قابل توجهی از محاسبات حل کم کرد.

اعتبارسنجى

برای این منظور از تحقیق سیلوا و همکاران[۲1] که هر دو اطلاعات عددی و تجربی را در تحقیقاتشان آوردهاند، استفاده شده است. آنها در این تحقیق یک شعله غیرپیش آمیخته مغشوش را در محفظه احتراق شبیهسازی کرده و اثرات تشعشع بر رفتار شعله و میدان دمایی را بررسی کردهاند. همچنین دادههای آزمایشگاهی مطابق با همان هندسه و شرایط مرزی را در تحقیقشان آورده و نتایچ عددی خود را با آن دادهها مقایسه کردهاند. در تحقیق حاضر نتایچ حاصل از شبیه سازی که مطابق با مسئله تحقیق[۲1] انجام شده، با هردو نتایچ عددی و داده های تجربی تحقیق مذکور مقایسه شده و مطابقت خوبی بین آزما، مخصوصا دادههای تجربی، مشاهده می شود.

هندسه و شرایط مرزی

همانطور که در شکل(۱) مشاهده می شود، هندسه متقارن محوری محفظه احتراق و شرایط مرزی مسئله مورد مطالعه در تحقیق[۲۱] ، یک محفظه احتراق استوانهای شکل با یک شعله غیرپیش آمیخته را نشان می دهد.

> ¹Semi Empirical ²Jones ³Launder کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و

⁴Pre exponential factor ⁵Activation energy

هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ٢۴و ٢۵ بهمن ماه ١٣٩۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف



ورودیهای سوخت و هوا دمای ثابتی داشته و بهترتیب برابر با ۳۱۳٬۱۵K و۳۲۳٬۱۵K میباشند[۲۱]. دبیهای جرمی ورودی سوخت و هوا به ترتیب و۰٫۰۱۲۵Kg/s میباشند. باتوجه به قطر ورودی و چگالی هرکدام، متوسط سرعت ورودی سوخت و هوا بهترتیب برابر با ۶/۳ ۷٫۷۶ ۳/۶ میباشند[۲۲]. مقدار شدت آشفتگی سوخت و هوای ورودی به -ترتیب ۱۰٪ و ۶٪ درنظر گرفته شدهاست[۲۱]. ضریب صدور دیوارهها مقدار ثابت ۶٫۰ فرض شده است[۲۱]. سوخت و اکسیدکننده برای این احتراق به ترتیب متان و هوا میباشند که ترکیب هرکدام بصورت کسر جرمی در جدول (۲) آورده شده است:

جدول ۲- کسر جرمی اجزای ورودی[۲۱]

Species	Fuel mass fraction	Oxidizer mass fraction
CH4	0.9	0
N2	0.1	0.76
02	0	0.23
H20	0	0.01

روش حل، معیار همگرایی و روند استقلال حل از شبکه

در تحقیق حاضر بهمنظور افزایش دقت حل و همچنین از آنجایی که توزیع دما و توزیع آلایندههای اکسیدنیتروژن و مونواکسیدکربن در محفظه احتراق از اهمیت بالایی برخوردار بوده، از مکانیزم مشهور پنجمرحلهای نیکول برای حل مسئله استفاده شده است.

Reaction	Reaction rate
$1.CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	$R_1 = 10^{15.22} [CH_4]^{1.46} [O_2]^{0.5217} EXP\left(-\frac{20643}{T}\right)$
2. $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	$R_2 = 10^{14.902} \left[CO \right]^{1.6904} \left[O_2 \right]^{1.57} EXP \left(-\frac{11613}{T} \right)$
3. $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$	$R_3 = 10^{14.349} \left[CO_2 \right]^{1.0} EXP \left(-\frac{62281}{T} \right)$
4. $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$	$R_4 = 10^{23.946} \left[CO \right]^{0.7211} \left[O_2 \right]^{4.0111} EXP \left(-\frac{53369}{T} \right)$
5. $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$	$R_5 = 10^{14.967} T^{-0.5} [N_2] [O_2]^{0.5} EXP \left(-\frac{68899}{T}\right)$

جدول ۳- مکانیزم پنج مرحله ای نیکول برای احتراق متان [۲۳]

نیکول در پایاننامه خود[۲۲] در سال ۱۹۹۵ این مکانیزم را برای احتراق متان پیشنهاد کرده و در سال ۱۹۹۹ طی یک گزارش در قالب مقاله علمی پژوهشی[۲۳] کارایی و برتری این مکانیزم نسبت به مکانیزم سهمرحلهای را اثبات میکند. در جدول(۳) میتوان مراحل این مکانیزم پنج مرحلهای به همراه نرخ هر واکنش مشاهده کرد.

معیار همگرایی ^۲-۱۰ برای باقیمانده جملات معادله انرژی و ^{۹-}۱۰ برای سایر معادلات در نظر گرفته شده است.

برای بررسی استقلال نتایج حل از شبکه، هندسه با تعداد سلولهای ۲۰۰، ۸۰۰، ۲۴۵۰، ۵۰۰۰ و ۱۱۲۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از ۲۴۵۰ سلول به بالا تغییرات محسوسی در نتایج وجود ندارد. توزیع دما در محور مرکزی محفظه احتراق، برگرفته از نتایج حل با شبکههای مختلف در شکل (۲) به خوبی قابل مشاهده است.



شکل۲- آزمایش استقلال از شبکه: توزیع دما در راستای محوری

مقايسه نتايج

در این قسمت به مقایسه توزیع دما و کسر جرمی اجزای واکنش در محفظه احتراق پرداخته شده و مورد بررسی و مقایسه با دادههای تجربی و نتایج عددی قرار گرفته است.





در شکل (۳) مقایسه توزیع دما در محور مرکزی محفظه احتراق مشاهده می-شود.



شکل ۴- توزیع کسر جرمی اجزاء در راستای محور مرکزی. مقایسه بین نتایج حاضر، دادههای تجربی و نتایج عددی تحقیق سیلوا و همکاران[۲۱]. الف: اکسیژن . ب: متان

در شکلهای(۴) و (۵) توزیع کسر جرمی اجزاء واکنشدهنده و محصولات احتراق در راستای محوری محفظه احتراق، آورده شده است.





شکل ۵- توزیع کسر جرمی اجزاء در راستای محور مرکزی. مقایسه بین نتایج حاضر، دادههای تجربی و نتایج عددی تحقیق سیلوا و همکاران[۲۱]. الف: مونواکسیدکربن . ب: دی اکسیدکربن

در شکل(۶) میتوان توزیع غلظت اکسیدنیتروژن را در راستای محور مرکزی . مشعل مشاهده نمود.



شکل ۶- توزیع کسر اکسیدنیتروژن در راستای محور مرکزی. مقایسه بین نتایج حاضر، دادههای تجربی و نتایج عددی تحقیق ماگل و همکاران[۲۴]

همانطور که مشاهده می شود در اکثر این مقایسه ها، نتایج حاضر نسبت به نتایج عددی مرجع[۲۱] و همچنین [۲۴] به داده های تجربی نزدیکتر است. این موضوع بدین معنی است که روش حل، مدل های بکار گرفته شده و فرضیات مسئله، که تمامی آن ها به تفصیل بیان شده، کاملاً صحیح بوده و می-توان آن ها را به عنوان یک روش صحت سنجی شده و معتبر برای مسائل مشابه درنظر گرفت.

نتايج

در قسمت اعتبارسنجی تمام مدلهای استفاده شده، روش حل، معیار همگرایی، شرایط مرزی، هندسه مسئله و دیگر پارامترهای مشعل به تفصیل

بیان شده است. از آنجا که صحت و اعتبار تمامی آنها در قسمت اعتبار سنجی اثبات شده، در این فصل تمامی آنها، بدون هیچگونه تغییری، بکار گرفته شده و فقط هندسه محفظه احتراق تغییر کرده است. از این رو در این قسمت به شرح تمامی آن جزئیات پرداخته نشده و فقط هندسه جدید محفظه احتراق نشان داده شده است. تفاوت مسئله اصلی با مسئله ای که در قسمت اعتبار سنجی مورد بحث قرار گرفت، هندسه محفظه احتراق می باشد. شماتیک کلی محفظه احتراق در شکل (۷) قابل مشاهده است.



برای بررسی استقلال نتایج حل از شبکه، هندسه با تعداد سلولهای ۱۰۲۹، ۱۴۸۲، ۲۶۵۲، ۴۲۵۰، ۶۸۰۰ و ۹۷۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از حل هرکدام در پارامترهای مختلف و همچنین ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از ۶۸۰۰ سلول به بالا تغییرات محسوسی در نتایج وجود ندارد. توزیع دما در محور مرکزی محفظه احتراق، برگرفته از نتایج حل با شبکههای مختلف در شکل (۹) به خوبی قابل مشاهده است.



شکل۸- آزمایش استقلال از شبکه: توزیع دما در راستای محوری

بررسی تاثیر سرمشعل مخروطی شکل بر پارامترهای شعله

در این قسمت به تفاوتهای اصلی شعله با حضور سرمشعل مخروطی و شعله بدون حضور سرمشعل پرداخته شدهاست. در یک محفظه احتراق مانند شکل(۷) واکنش دهندههای سوخت و هوا پس از ورود به داخل محفظه احتراق، دچار جریان برگشتی شده و مقداری از محصولات احتراق را به سمت واکنش دهندهها گسیل میکنند. این جریان داغ برگشتی باعث پیش گرم کردن

واکنش دهندهها و اختلاط بیشتر سوخت و هوا میشود. در شکل(۹) میتوان جریان برگشتی در یک محفظه احتراق بدون سرمشعل را مشاهده کرد. با حضور سرمشعل مخروطی، این جریانهای برگشتی به واکنشدهندهها نزدیک-تر شده و اثرات بیشتری بر واکنشدهندهها میگذارند. یعنی هر دو عامل پیش گرمایش و اختلاط که در محفظه احتراق ساده وجود داشت، در محفظه احتراق سرمشعل دار تشدید می گردد. در شکل(۹) میتوان جریانهای برگشتی در حضور سرمشعل مخروطی را مشاهده کرد.



شکل۹- خطوط جریان در محفظه احتراق. الف: بدون حضور سرمشعل. ب: باحضور سرمشعل مخروطی

شکل(۱۰) توزیع کسر جرمی متان در راستای خط مرکزی شعله را برای دو محفظه احتراق ساده و سرمشعلدار مقایسه میکند. در این شکل میتوان مشاهده کرد که کسر جرمی متان در راستای خط مرکزی برای شعله در محفظه احتراق سرمشعلدار، کمتر از محفظه احتراق ساده است و این اختلاط بیشتر متان با هوا، در محفظه احتراق سرمشعلدار را نسبت به نوع ساده نشان میدهد.



شکل ۱۰- توزیع کسر جرمی متان در راستای محور مرکزی

در شکل(۱۱) می توان مقایسه توزیع دما در راستای خط مرکزی شعله را مشاهده کرد. در این دو توزیع دما، افزایش دمای نسبی شعله در محفظه احتراق سرمشعل دار نسبت نوع دیگر بدون سرمشعل قابل مشاهدهاست. این

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

افزایش دما در طول خط مرکزی را حتی در ناحیهای که هنوز احتراق آغاز نشده هم میتوان مشاهده کرد و این مسئله نشانگر این است که سرمشعل باعث پیش گرمایش بیشتر محصولات احتراق گردیده است.



شکل ۱۱- توزیع دما در راستای محور مرکزی

بررسیها نشان میدهد که در محفظه احتراق سرمشعل دار، جریان برگشتی که توسط دیواره به جریان ورودی نزدیک میشود، فقط به افزایش اختلاط و پیش گرمایش سوخت و هوا، بسنده نمی کند. این جریان برگشتی که در فضای نسبتا کوچک بین دیواره سرمشعل و جریان ورودی محبوس میشود، باعث تغییر در مومنتم جریانهای ورودی شده و به مقدار قابل توجهی آنها را کاهش میدهد. در شکل(۱۲) توزیع سرعت محوری در مقطع ۲۰سانتی متر بعد از ورودی مشعل برای دو محفظه احتراق سرمشعل دار و بدون سرمشعل مقایسه شده است. در این شکل مشاهده میشود که سرعت محوری جریانهای ورودی در محفظه احتراق با حضور سرمشعل مخروطی به مقدار قابل توجهی کمتر از محفظه احتراق ساده است.



شکل۱۲- توزیع سرعت محوری در راستای شعاعی، در مقطع ۲.۰متر بعد از ورودی مشعل

حال باید علت این کاهش مومنتم را در چه عاملی بررسی کرد؟ باتوجه به هندسه سرمشعل و خطوط جریان در مجاورت ورودی مشعل، می توان دریافت که علت اصلی این کاهش مومنتم، در محفظه احتراق با حضور سرمشعل مخروطی نسبت به محفظه احتراق ساده، زاویه جریانهای برگشتی است. در شکل(۱۳) می توان خطوط همتراز سرعت محوری و خطوط جریان در مجاورت ورودی مشعل را بهطور همزمان و برای هر دو محفظه احتراق مشاهده کرد. در این شکل بطور واضح تاثیر جریان برگشتی بر جریان ورودی نشان داده شده-است. همانطور که مشاهده می شود در سرمشعل ساده، هنگام برخورد جریان برگشتی با جریان ورودی، این دو عمود بر یکدیگر هستند. یعنی مومنتم جریان ورودی تماما در جهت محوری بوده و مومنتم جریان برگشتی تماما در جهت عمود است و هیچ مولفهای در جهت محوری ندارد. این بدین معنی است که جریان برگشتی نمی تواند مومنتم جریان ورودی را در جهت محوری تغییر بدهد زیرا هیچ مولفهای در این راستا ندارد. اما در محفظه احتراق با حضور سرمشعل مخروطى اين مسئله كاملا متفاوت است. زيرا سرمشعل مخروطى باعث زاویهدار شدن جریان برگشتی می شود. یعنی جریان برگشتی به هنگام برخورد با جریان ورودی دیگر عمود بر آن نبوده و مولفهای در راستای محوری و دقیقا درجهت عکس جریان ورودی دارد. طبیعتاً این جریان برگشتی به دلیل داشتن مولفهای در راستای محوری و خلاف جهت جریان ورودی، از مقدار مومنتم جریان ورودی کاسته و میتوان کمی بعد از ورودی مشعل، شاهد کاهش سرعت محوری در جریان ورودی بود. که این مسئله در شکل(۱۲) بطور واضح مشاهده شد.



شکل۱۳- خطوط همتراز سرعت محوری(رنگ زمینه) و خطوط جریان(خطوط جهتدار) در مجاورت ورودی سوخت و هوا. الف: محفظه احتراق بدون حضور سرمشعل مخروطی. ب: محفظه احتراق با حضور سرمشعل مخروطی

با کاهش سرعت محوری سوخت و هوای ورودی، طول شعله کاهش مییابد و این امری بدیهی است. علاوه بر این با کاهش سرعت سوخت و هوای ورودی، آنها فرصت بیشتری برای انتقال حرارت با گازهای داغ برگشتی دارند. بنابراین یکی از دلایلی که باحضور سرمشعل مخروطی، پیش گرمایش واکنش دهندهها

بهتر انجام می شود، همین مورد است. در شکل(۱۱) می توان اثر این مورد را مشاهده کرد. قطعا در اثر این افزایش پیش گرمایش، می توان شاهد افزایش دمای شعله بود. شکل(۱۴) خطوط همتراز دما در محفظه احتراق ساده و سرمشعل دار را نشان می دهد. در این شکل می توان مشاهده کرد که شعله در محفظه احتراق سرمشعل دار نسبت به نوع ساده به مقدار قابل توجهی افزایش دما داشته است. و همچنین طول شعله کاهش یافته است. یعنی موقعیت بیشینه دمای شعله به ورودی مشعل نزدیک تر شده است.



شکل۱۴ - توزیع دما[K] در محفظه احتراق. الف: بدون سرمشعل. ب: باحضور سرمشعل مخروطی

تعریف طول شعله، بسته به نوع مطالعه متفاوت است. برای طول شعلههای غیرپیش آمیخته سه تعریف کلی وجود دارد [۲۵]. که معمولا در تحقیقات مختلف از یکی از این سه تعریف برای بررسی و مقایسه طول شعله غیرپیش-آمیخته استفاده می شود. تعریف اول طول قابل مشاهده شعله است. یعنی از شود. که معمولا برای مطالعات تجربی کاربرد دارد. تعریف دوم فاصله ابتدای شود. که معمولا برای مطالعات تجربی کاربرد دارد. تعریف دوم فاصله ابتدای مشعل در محور مرکزی شعله تا نقطهای روی این محور که مخلوط سوخت و هوا به نسبت استوکیومتری برسند. و نهایتا تعریف سوم، فاصله ابتدای مشعل روی محور مرکزی شعله تا نقطهای روی این محور که دما به بیشینه مقدار دوی محور مرکزی شعله تا نقطهای روی این محور که دما به بیشینه مقدار موی معله امکان پذیرتر از مشخصات دیگر شعله است، در تحقیق حاضر، برای در سی و مقایسه طول شعله از تعریف سوم استفاده شدهاست.

تحليل و بررسي اثر تغيير زاويه سرمشعل مخروطي بر شعله

همانطور که پیش تر گفته شد، با قرار گرفتن سرمشعل مخروطی در ابتدای مشعل، به دلیل زاویه دار شدن جریان برگشتی، جریان ورودی مشعل دچار

کاهش مومنتم می گردد. حال نتایج نشان میدهند که این کاهش مومنتم ورودی، با کاهش زاویه سرمشعل تشدید می گردد. در شکل(۱۵) مقایسه توزیع سرعت محوری، در راستای شعاعی، در انتهای سرمشعل برای زاویههای مختلف با یکدیگر مقایسه شدهاند. در این شکل مشاهده می شود که در یک طول خاص از سرمشعل، در زاویه ۱۵درجه، سرعت محوری جریان ورودی کمترین مقدار و در زاویه ۴۵درجه بیشترین مقدار را دارد.



شکل۱۵- توزیع سرعت محوری در راستای شعاعی در انتهای سرمشعل، برای سرمشعل مخروطی به طول ۴۰سانتیمتر

نتيجهگيرى

در تحقیق حاضر شبیه سازی جریان و احتراق یک شعله غیرپیش آمیخته آشفته در یک محفظه احتراق ساده انجام شده و سپس با نتایج تجربی معتبر صحت-سنجی گردیده است. بعد از صحت سنجی به شبیه سازی شعله در محفظه احتراق با حضور سرمشعل با دیواره مخروطی پرداخته شده است. نتایج حاصل از حل نشان می دهند که حضور سرمشعل مخروطی در محفظه احتراق باعث ایجاد پایداری بیشتر در شعله غیرپیش آمیخته آشفته می گردد. این سرمشعل ها باعث زاویه دار شدن جریان برگشتی می شوند. با زاویه دار شدن جریان برگشتی، مولفه ای محوری و خلاف جهت ورودی مشعل، در جریان برگشتی ایجاد شده، که باعث کاهش سرعت جریان ورودی و در پی آن، افزایش پیش-گرمایش و اختلاط واکنش دهنده ها و در نهایت پایداری شعله می شود. علاوه براین با کاهش زاویه سرمشعل مخروطی، به دلیل افزایش مولفه محوری در جریان برگشتی، سرعت جریان ورودی کمتر شده و در پی آن طول شعله کاهش یافته و دمای شعله افزایش می یابد.

فهرست علائم

$C_{1\varepsilon}, C_2, C_{3\varepsilon}$ $\sigma_k, \sigma_{\varepsilon}$	ثابتهای مدل آشفتگی
D	ضريب ديفيوژن
h	آنتالپی
G_k, G_b	تولید انرژی جنبشی آشفتگی
Ι	شدت آشفتگی
Ι	شدت تابش

هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ٢۴و ٢۵ بهمن ماه ١٣٩۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

ثابت نرخ توليد واكنش

- 9. N. Syred, J. M. Beer, Combustion and Flame, 23, 143 (1974).
- 10. M. L. Mathur and N. R. L. Maccallum, Journal of Institute of Fuel, 41, 238 (1976).
- 11. C. H. Hwang, S. Lee and C. E. Lee, Int. J. Hydrogen Energ., 33, 832 (2008).
- C. Presser, J. B. Greenberg, Y. Goldman, Y. M. Timnat, Symposium (International) on Combustion, 519 (1982).
- 13. Hashemi SA, Hajialigol N, Fattahi A, Mazaheri K, Heydari R. Investigation of a flame holder geometry effect on flame structure in non-premixed combustion. Journal of Mechanical Science and Technology. 2013 Nov 1;27(11):3505-12.
- Hashemi SA, Hajialigol N, Mazaheri K, Fattahi A. Investigation of Air Turbulence Intensity Effect on the Flame Structure in Different Flame Holder Geometry. IJE TRANSACTIONS C. 2013 Jan 1;26:1423-32.
- 15. A. Hashemi, H. Forouzande and M. Molamahdi, "Experimental investigation of flame holder geometry effect on flame length and NOx and CO pollutant in a non-premixed flame," The journal of mechanical engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, 2016.(in Persian)
- 16. A. Hashemi and H. Forouzande, "Experimental investigation of flame holder geometry effect on flame stability in a non_premixed flame," The journal of mechanical engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Februsry 2015.(in Persian)
- 17. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, John Wiley and Sons (1984).
- 18. B. E. Vandoormaal, G. D. Raithby, Num. Heat Trans., 7, 147 (1984).
- 19. W. P. Jones and B. E. Launder, Int. J. Heat Mass Trans., 15, 301 (1972).
- 20. H. L. Versteeg, and W. Malaskera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman (1996).
- Silva CV, França FH, Vielmo HA. Analysis of the turbulent, non-premixed combustion of natural gas in a cylindrical chamber with and without thermal radiation. Combustion Science and Technology. 2007 Jul 12;179(8):1605-30.
- 22. Nicol, D.G., "A Chemical and Numerical Study of NOx and Pollutant Formation in Low-Emissions Combustion," Ph.D. Dissertation, University of Washington (1995).
- 23. Nicol DG, Malte PC, Hamer AJ, Roby RJ, Steele RC. Development of a five-step global methane oxidation-NO formation mechanism for leanpremixed gas turbine combustion. InASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress

Κ	انرژی جنبشی آشفتگی
l	طول مشخصه
$M_{\scriptscriptstyle W\!,i}$	<i>ا</i> وزن مولکولی جزء
NO_x	اكسيدهاي نيتروژن
p(f)	تابع چگالی احتمال
R	ثابت جهانی گازها
r	بردار وضعيت
Т	دما
V_i	مؤلفههای سرعت
z	راستای محوری
Yi	نکسر جرمی جزء
	علائم يوناني
Г	ضرايب عمومي معادله انتقال
0	نرخ اضمحلال
5	انرژی جنبشی آشفتگی
ρ	جرم مخصوص
arphi	متغير عمومى معادلات انتقال
	زيرنويسها
f	سوخت
h	نگهدارنده
i	اجزاء
max	حداكثر
ox	اكسيدكننده

k

منابع

- 1. N.Peters, Turbulent Combustion, Cambridge University Press (2000).
- S. B. Pope, Prog. Energ. Combust. Sci., 11, 119(1985).
- 3. T. Poinsot and D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Edwards (2001).
- J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, Combustion Physical and Chemical Fundamentals: Modeling and Simulation, 2nd. Ed, Berling Heidelberg New York.
- 5. P. A. Libby, and F. A, Williams, Turbulent Reacting Flows, Spring-Verlag (1980).
- 6. K. M. Kundu, D. Banerjee and D. Bhaduri, Applied Mathematical Modelling, 1, 276 (1977).
- A. J. Linden, Proceeding of the Institution of Mechanicl Engineers, 160, 233 (1949).
- 8. Najafi, Amirfarhad, Investigation of swirly flow with one and two phase, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Sharif, Tehran, 2004. (In Persian)

and Exhibition 1998 Jun 2 (pp. V003T06A008-V003T06A008). American Society of Mechanical Engineers.

- Magel HC, Schnell U, Hein KR. Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustor flow. InSymposium (International) on Combustion 1996 Jan 1 (Vol. 26, No. 1, pp. 67-74). Elsevier.
- 25. S. R. Turns, An introduction to combustion: Concept and applications, Mc Graw Hill (2000).