

بررسی عددی پدیده هامینگ در شعله غیر پیش آمیخته سوخت گازی

احسان ارشدی

کارشناس مکانیک-دانشگاه بیرجند
ehsan_arshadi_k@yahoo.com

قدرت قصابی

استادیار مکانیک- دانشگاه بزرگمهر قائنات
Ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

چکیده

در صنعت نیروگاه‌های گازی، محفظه احتراق در لحظات استارت، معمولاً دچار نوسانات فشار شدید می‌گردد که به عنوان پدیده هامینگ شناخته می‌شود. در این مقاله، احتراق ناپایا در یک محفظه احتراق استوانه‌ای با شعله غیر پیش‌آمیخته سوخت متان با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ مورد بررسی عددی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی احتراق از مدل pdf استفاده شده است. دبی سوخت ۰/۰۰۵۲ کیلوگرم بر ثانیه و دبی هوا ۰/۰۹۶ کیلوگرم بر ثانیه در حالت پایه در نظر گرفته شد. توزیع دما و کسر جرمی گونه‌ها، تاثیر پارامترهای هندسی چون قطر و طول محفظه احتراق و نسبت هم‌ارزی بر نوسانات فشار مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد وجود هوای اضافه و افزایش طول محفظه احتراق سبب کاهش نوسانات فشار و کاهش احتمال رخ دادن پدیده هامینگ می‌شود. همچنین مشاهده گردید که برای جلوگیری از ایجاد پدیده هامینگ یک قطر بهینه برای محفظه احتراق وجود دارد که در این بررسی، قطر بهینه ۰/۲ متر می‌باشد.

کلمات کلیدی: هامینگ، احتراق ناپایا، نوسانات فشار، مدل pdf

مقدمه

احتراق پدیده ایست که به دلیل تولید توان در صنعت‌های زیادی کاربرد دارد. یکی از مهمترین صنعت‌هایی که از احتراق بهره می‌برد صنعت نیروگاهی است. محفظه احتراق نیروگاه گازی بدلیل ماهیت پیچیده احتراق همواره با مسائل و مشکلات زیادی مواجه می‌باشد که بر کیفیت احتراق و راندمان نیروگاه بسیار تاثیر گذار است. بررسی‌ها نشان داده است که در لحظات استارت محفظه احتراق نیروگاه‌های گازی و در شرایط یک احتراق ناپایا، نوسانات فشار شدیدی معمولاً مشاهده می‌شود که همراه با تولید صدا می‌باشد و به عنوان پدیده هامینگ شناخته می‌شود. این نوسانات فشار در اثر عوامل هندسی محفظه احتراق چون طول و قطر محفظه، فاصله مشعل‌ها و عواملی چون نسبت هم‌ارزی، دمای سوخت و هوا و میزان اختلاط سوخت و هوا ایجاد می‌شود [۱]. از آنجائیکه ایجاد پدیده هامینگ علاوه بر ایجاد لرزش و سروصدای زیاد بر کیفیت احتراق نیز تاثیر گذار است بررسی آن مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است.

قدیمی و رمضانی [۲] با استفاده از نرم افزار CEA تاثیر پارامترهای عملکردی و هندسی محفظه احتراق بر ناپایداری احتراق فرکانس پایین را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله ناپایداری احتراق فرکانس پایین در موتورهای سوخت مایع بر حسب پارامترهای طراحی مانند فشار، نسبت اختلاط سوخت (اکسیژن مایع و هیدروژن گازی) و هندسی محفظه مدل سازی شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش نسبت اختلاط محفظه در فشار ثابت در محدوده مورد مطالعه ابتدا باعث افزایش پایداری شده و

پس از نسبت معینی ناحیه ناپایداری رشد می‌کند. همچنین افزایش طول محفظه در فشار و نسبت اختلاط ثابت باعث افزایش ناحیه پایداری می‌گردد. بالو و ملای [۳] در مقاله‌ای به بررسی افزودن گاز طبیعی بر سرعت آرام شعله بنزین پرداختند. در این تحقیق با روش آزمایشگاهی و به روش‌های نوری، سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی گاز طبیعی و بنزین در نسبت‌های مختلف جرمی گاز و بنزین و در غناهای مختلف ۰/۸ تا ۱/۲ در محفظه استوانه‌ای حجم ثابت اندازه گیری شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که در غناهای بالاتر سوخت، فشاری که به محفظه وارد می‌شود بیشتر است.

ورس و داوسون [۴] فاصله بین مشعل‌ها و آرایش چرخش مشعل‌ها را بر ساختار و ناپایداری‌های شعله و توزیع فشار محفظه احتراق بصورت آزمایشگاهی با استفاده از روش نورتالی OH مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد ماکزیمم حرارت آزاد شده تحت تاثیر آرایش چرخش مشعل‌ها می‌باشد. آنها در یک بررسی دیگر [۵] و با شرایط مشابه بررسی قبلی، نشان دادند کاهش فاصله بین مشعل‌ها سبب افزایش آزادسازی انرژی و افزایش نوسانات فشار می‌گردد.

داوود دودانگه و محمد مهدی حیدری [۶] تاثیر هندسی و هیدرودینامیکی پارامترهای صفحه انژکتور را روی پایداری احتراق مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که هرچه قطر اریفیس سوخت کوچکتر باشد احتمال ناپایداری کاهش می‌یابد.

آنها در یک بررسی دیگر [۷] قطر متوسط قطره سوخت را برای ایجاد احتراق پایدار موتور با سوخت مایع با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی و با استفاده از مدل تاخیر زمانی ساچ ونزل محاسبه کردند. آنها در این بررسی نتیجه گرفتند که قطر بهینه قطره برای ایجاد احتراق پایدار سوخت هپتان نرمال ۱۳۶ میکرون می‌باشد که در مقایسه با عدم وجود انتقال حرارت تشعشی حدود ۱۰٪ افزایش یافته است.

چن و همکاران [۸] اثر نسبت هم‌ارزی و پارامترهای هندسی محفظه احتراق را بر ناپایداری احتراق با استفاده از روش آزمایشگاهی آشکارساز جریان PIV و مدل‌سازی ریاضی بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد ناپایداری احتراق در اثر افزایش نسبت هم‌ارزی و قطر خروجی محفظه افزایش می‌یابد و در اثر افزایش طول محفظه احتراق و طول آگزوز، کاهش می‌یابد.

یوان و شن [۹] با استفاده از روش عددی LES، ناپایداری احتراق را در یک گرمکن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد نوسانات فشار سبب شکسته شدن مولکولهای اکسیژن و اتانول می‌شود که نتیجه آن تشکیل ساختار گردابی حلقوی است.

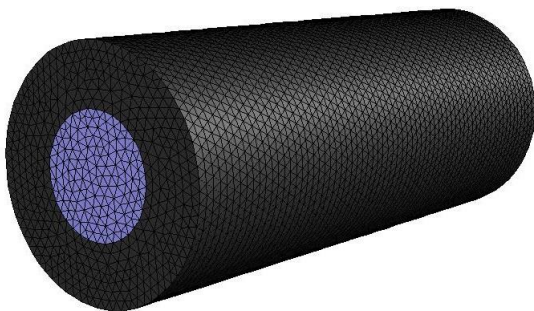
همانطور که در تحقیقات فوق بیان شد، بررسی‌های صورت گرفته در زمینه احتراق ناپایدار، اکثراً بصورت تحلیل آزمایشگاهی یا مدل‌سازی ریاضی بوده است. شبیه‌سازی عددی می‌تواند اطلاعات کاملی از عوامل موثر بر ناپایداری احتراق را مشخص نماید و با جزئیات، تغییرات فشار و دما را در احتراق.

و ۱ بیانگر جریان سوخت است. مقدار محلی f اگر مخلوط در یک نقطه فقط شامل اکسید کننده باشد مساوی صفر و اگر فقط شامل سوخت باشد برابر ۱ است. در روش PDF که اساس آن مدل سازی های آشفته است. مقدار میانگین متغیرهای اسکالر را با وزن کردن همزمان با تابع احتمالی چگالی برای کسر مخلوط f ، بدست می آورند. مقدار متوسط $\bar{\phi}$ مربوط به خاصیت ϕ به صورت زیر نوشته می شود [۱۱]:

$$\bar{\phi} = \int_0^1 p(f)\phi(f)df \quad (4)$$

ϕ متغیبری است که مبین تابع f می باشد و $p(f)$ تابع احتمالی چگالی است. چندین تابع توزیع احتمالی مختلف استفاده شده است، ولی ترکیب توابع بتا و گوس بهترین نتیجه را می دهند [۱۱].

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی، پس از سعی و تکرار و بررسی نتایج، تعداد ۱۵۰۲۵۶ شبکه به عنوان حداقل تعداد شبکه جهت استقلال نتایج مورد تایید قرار گرفت و بررسی حل گذرا نشان داد که گام زمانی ۲/۵ ثانیه سبب می شود نتایج به گام زمانی نیز وابسته نباشد. در شکل ۲، نمایی از شبکه بندی محفظه احتراق نشان داده شده است. مدل DO نیز برای مدل سازی تشعشع در نظر گرفته شده است. شرط مرزی ورودی هوا و سوخت، دبی معلوم و شرط مرزی خروجی محصولات احتراق فشار معلوم می باشد. همچنین شرط مرزی دیواره، عایق در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ نمایی از شبکه بندی محفظه احتراق

نتایج

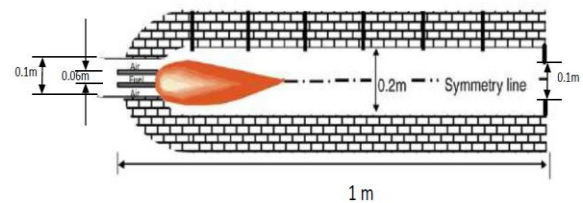
بررسی توزیع دما و کسر جرمی گونه ها پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه در شکل ۳ توزیع کسر جرمی سوخت در مقطع میانی محفظه احتراق نشان داده شده است. مشاهده می شود پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه، سوخت تزریق شده به داخل محفظه احتراق در اثر اختلاط با اکسیژن، مصرف شده و کسر جرمی سوخت به شدت کاهش می یابد و با فاصله کمی از ابتدای شعله کسر جرمی سوخت بسیار ناچیز می شود.

شکل ۴ توزیع کسر جرمی اکسیژن نشان داده شده است. همانطور که بیان شد در محدوده اختلاط سوخت و هوا، واکنش سوخت و هوا سبب مصرف شدن سوخت و اکسیژن و ایجاد احتراق می شود. مطابق شکل در محدوده میانی و ورودی محفظه احتراق اکسیژن مصرف شده است با این وجود و با گذشت ۱۰۰ ثانیه، بخش زیادی از اکسیژن باقیمانده و از محفظه احتراق خارج می شود.

ناپایدار بیان نماید. هدف این مطالعه اینست که با استفاده از شبیه سازی عددی احتراق ناپایا، اثر پارامترهای هندسی و احتراقی بر نوسانات فشار و دما در یک محفظه احتراق مورد بررسی قرار گیرد.

معرفی هندسه مسئله، شبیه سازی عددی و معادلات حاکم

محفظه احتراق مطابق شکل ۱، به طول ۱ متر با قطر اصلی ۲۰ سانتی متر و قطر ورودی و خروجی ۱۰ سانتی متر است. سوخت مورد استفاده متان است. احتراق از نوع غیر پیش آمیخته می باشد. دبی سوخت ۰/۰۰۰۵۲ کیلوگرم بر ثانیه و دبی هوا ۰/۰۹۶ کیلوگرم بر ثانیه است. شرط مرزی ورودی سرعت معلوم و شرط خروجی فشار معلوم می باشد. دیواره ها عایق فرض شده است.



شکل ۱ هندسه مسئله

مسئله بصورت گذرا تحلیل شده است. احتراق از نوع غیر پیش آمیخته برای سوخت متان می باشد. برای حل معادلات ممنتوم الگوریتم سیمپل به کار برده شده است. جریان احتراقی آشفته می باشد و برای مدل سازی جریان آشفته از مدل k-e استاندارد استفاده شده است. برای این مدل دو معادله انتقال برای محاسبه انرژی جنبشی (k) و اتلاف آشفته (e) به صورت زیر حل می شوند [۱۰]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \quad (1)$$

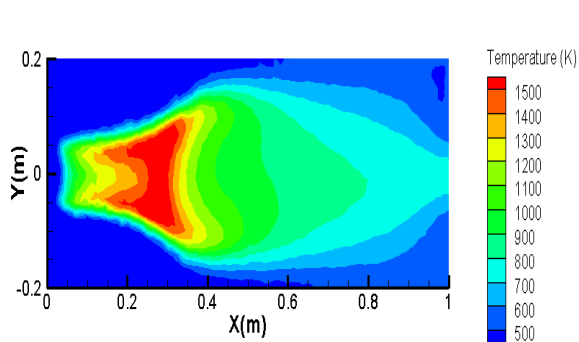
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} \quad (2)$$

که انرژی آشفته تولیدی در اثر تغییرات سرعت متوسط، G_b انرژی آشفته تولید شده در اثر نیروی بویانسی، Y_m سهم نوسانات انبساط در آشفتهگی تراکم پذیر به نرخ کلی اتلاف آشفتهگی را نمایش می دهند. در این معادلات، ضرایب ثابت $C_{1\epsilon} = 1.42$ ، $C_{2\epsilon} = 1.68$ ، $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 0.72$ می باشند.

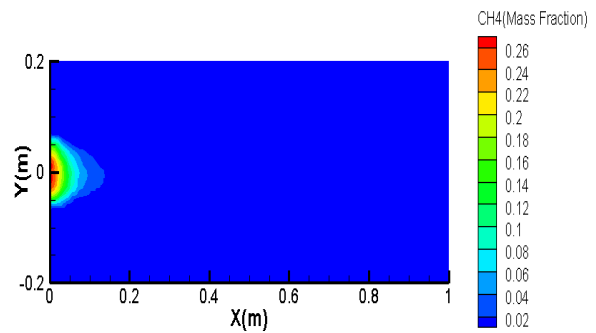
برای مدل سازی احتراق از مدل PDF استفاده شده است. در این مدل، یک متغیر بدون بعد f که کسر مخلوط نامیده می شود به صورت زیر تعریف می شود [۱۱]:

$$f = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_1 - \phi_0} \quad (3)$$

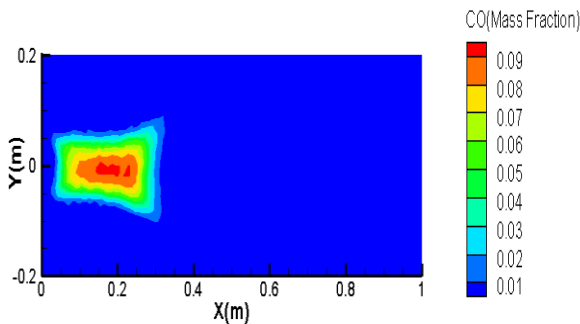
در اینجا ϕ یک اسکالر وابسته به زمان است که از معادلات انتقال اسکالر بدون عبارت چشمه تبعیت می کند و پانویس ۰ بیانگر جریان اکسید کننده



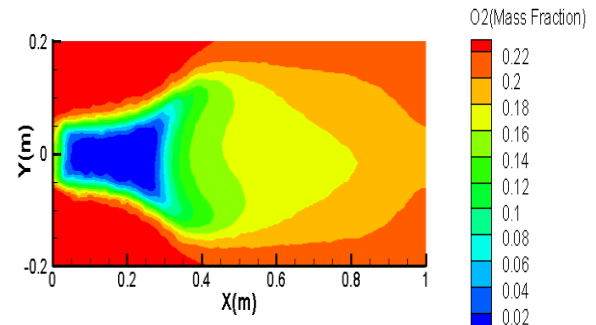
شکل ۵ توزیع دما در مقطع میانی محفظه احتراق



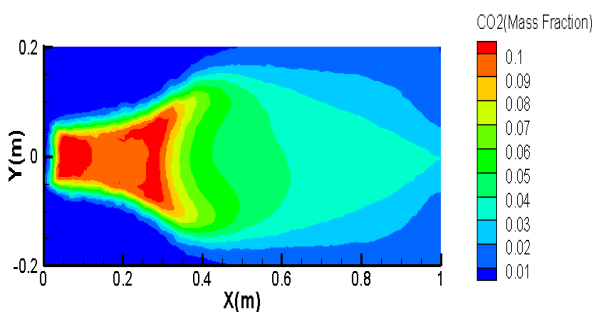
شکل ۳ توزیع کسر جرمی سوخت متان در مقطع میانی محفظه احتراق



شکل ۶ توزیع کسر جرمی مونوکسید کربن در مقطع میانی محفظه احتراق



شکل ۴ توزیع کسر جرمی اکسیژن در مقطع میانی محفظه احتراق



شکل ۷ توزیع کسر جرمی دی اکسید کربن در مقطع میانی محفظه احتراق

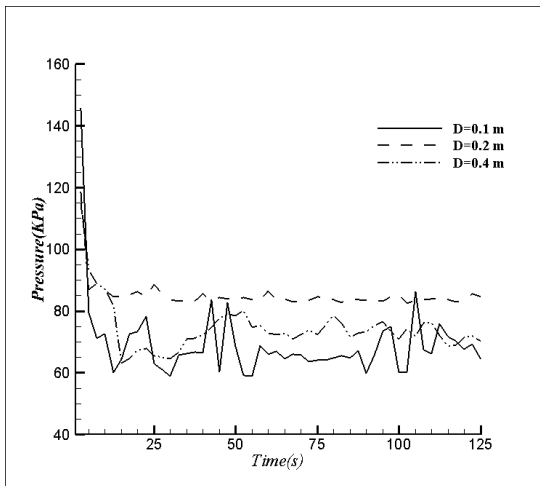
بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و نسبت هم ارزی بر نوسانات فشار محفظه

در شکل ۸، تغییرات فشار و دمای میانگین محفظه بر حسب زمان مقایسه شده است. مشاهده می شود فشار ابتدا به یکباره کاهش می یابد و سپس با گذشت زمان دچار نوسان می گردد. این نوسانات می تواند به دلیل آشفستگی جریان احتراقی باشد. با این وجود، در مورد دما، پس از افزایش ناگهانی در لحظات اولیه که ناشی از ایجاد احتراق می باشد تقریباً روند یکنواختی با زمان دارد. که می تواند به دلیل یکنواختی نرخ اختلاط سوخت و هوا باشد.

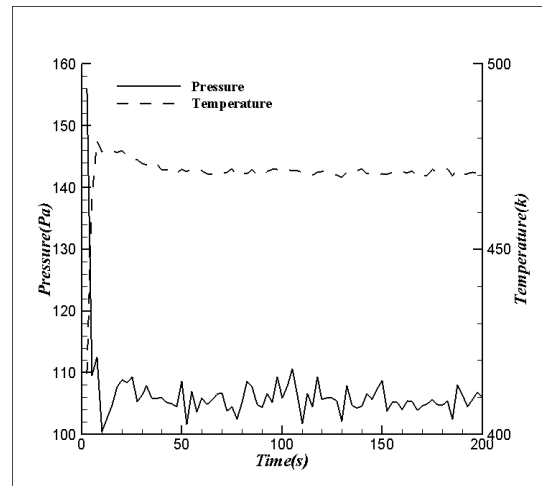
در شکل ۵، توزیع دمای مقطع میانی محفظه احتراق نشان داده شده است. مشاهده می شود پس از اختلاط سوخت و هوا و واکنش آنها احتراق تقریباً کامل شده و دما به تدریج از ورودی افزایش یافته و با فاصله گرفتن از ورودی (تقریباً در محدوده ۲۰ سانتی متری از ورودی) به ماکزیمم مقدار خود می رسد. سپس به تدریج به دلیل تشعشع شعله با دیواره محفظه و وجود هوای اضافه، دمای محصولات احتراق کاهش یافته و در خروجی به ۸۰۰ درجه کلوین می رسد.

در شکل ۶، توزیع کسر جرمی مونوکسید کربن نشان داده شده است. مشاهده می شود به تدریج و با افزایش دما به دلیل شکسته شدن مولکولهای سوخت و ترکیب اتمهای کربن با مولکولهای اکسیژن، کسر جرمی مونوکسید کربن افزایش می یابد. سپس با فاصله گرفتن از ورودی و به دلیل وجود هوای اضافه، مونوکسید کربن با اکسیژن ترکیب شده و کسر جرمی مونوکسید کربن کاهش می یابد. تا در نهایت تمام مونوکسید کربن تولید شده به دی اکسید کربن تبدیل می شود.

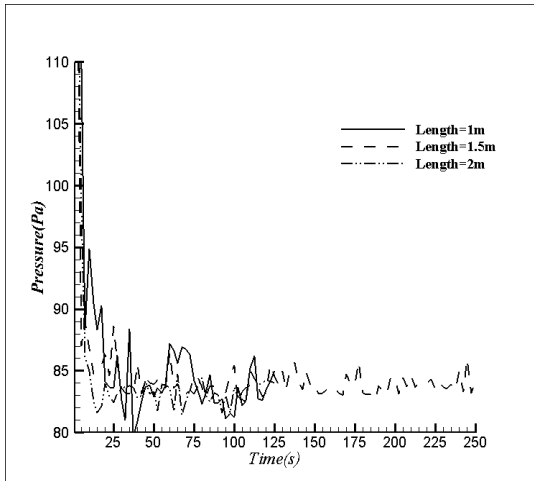
در شکل ۷، توزیع کسر جرمی دی اکسید کربن در مقطع میانی محفظه احتراق نشان داده شده است. رفتار کیفی محصولات احتراق مشابه دما می باشد که این مطلب از مقایسه شکل ۷ و ۵ قابل برداشت است. مشاهده می شود در ناحیه مرکزی و پس از اختلاط سوخت و هوا و ایجاد واکنش و احتراق، اکسیژن و سوخت مصرف شده و کسر جرمی دی اکسید کربن افزایش می یابد. سپس به تدریج اکسیژن اضافه نواحی اطراف محفظه احتراق به ناحیه مرکزی منتقل می شود و سبب رقیق شدن محصولات احتراق از جمله دی اکسید کربن می شود.



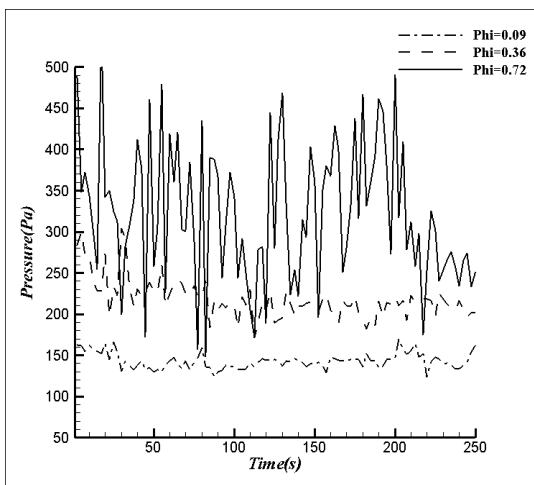
شکل ۹ تغییرات فشار میانگین دیواره محفظه بر حسب زمان برای قطرهای مختلف کوره



شکل ۸ مقایسه تغییرات فشار میانگین و دمای میانگین دیواره بر حسب زمان



شکل ۱۰ تغییرات فشار میانگین دیواره محفظه بر حسب زمان برای طولهای مختلف کوره



شکل ۱۱ تغییرات فشار میانگین دیواره محفظه بر حسب زمان برای دبی های مختلف

در شکل ۹، تغییرات فشار میانگین دیواره محفظه بر حسب زمان برای قطرهای مختلف کوره نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای تمام قطرهای محفظه، با گذشت زمان کمتر از ۵ ثانیه، فشار افت ناگهانی دارد که می‌تواند به دلیل آزاد سازی ناگهانی انرژی ناشی از احتراق در همان ابتدای ورود سوخت و هوا باشد. سپس فشار تقریباً حول مقدار ثابت با گذشت زمان نوسان می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود برای بیشترین و کمترین قطر، نوسانات فشار بیشتر می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که در واقع برای جلوگیری از پدیده هامینگ یک مقدار بهینه برای قطر محفظه وجود دارد. این نتیجه را اینگونه می‌توان توجیه کرد که برای قطرهای کوچک محفظه احتراق، فاصله شعله از دیواره ها کم می‌باشد و موج انتشار شعله فاصله بسیار کمی تا دیواره ها طی می‌نماید. بنابراین نوسانات جریان سبب نوسانات فشار وارد بر دیواره محفظه می‌شود. برای قطرهای بزرگ محفظه احتراق، افزایش اختلاف قطر ورودی سوخت و هوا و قطر محفظه احتراق، سبب انبساط ناگهانی جریان سوخت و هوای ورودی از مشعل و سبب ایجاد موج فشاری شدیدی می‌شود که نوسانات فشار شعله را با شدت بیشتری به دیواره محفظه احتراق منتقل می‌کند.

شکل ۱۰، توزیع فشار بر حسب زمان برای طولهای مختلف محفظه احتراق نشان داده است. مشاهده می‌شود با افزایش طول محفظه احتراق، نوسانات فشار کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش طول کوره، فشار محفظه احتراق که در ناحیه شعله به شدت افزایش می‌یابد فرصت بیشتری جهت کاهش فشار و رسیدن به فشار خروجی محفظه (فشار اتمسفر) دارد.

در شکل ۱۱، توزیع فشار میانگین دیواره محفظه احتراق بر حسب زمان برای نسبت هم ارزی های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم ارزی مقادیر فشار و نوسانات فشار به شدت افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش نسبت هم ارزی احتراق کامل تر می‌شود. در نتیجه دما و به موجب آن فشار و نوسانات آن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای نسبت هم ارزی ۰/۷۲، دامنه نوسانات حتی به ۱۵۰ پاسکال هم می‌رسد که می‌تواند منجر به ایجاد پدیده هامینگ در محفظه احتراق شود. بنابراین وجود هوای اضافه خصوصاً در لحظات ابتدایی اختلاط سوخت و هوا می‌تواند مانع از ایجاد پدیده هامینگ شود.

نتیجه گیری:

در این مقاله، بررسی عددی احتراق ناپایا در یک محفظه احتراق استوانه‌ای با شعله غیر پیش‌آمیخته سوخت متان با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت ۱۶ صورت گرفت. توزیع دما و کسر جرمی گونه‌ها، تاثیر پارامترهای هندسی و نسبت هم‌ارزی بر نوسانات فشار مورد تحلیل قرار گرفت. از این بررسی موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

- ۱- با وجود نوسانات فشار با زمان، دما پس از یک افزایش ناگهانی اولیه، شرایط یکنواختی را با گذشت زمان دارا می‌باشد.
- ۲- افزایش و کاهش قطر محفظه هر دو سبب افزایش نوسانات فشار می‌شود و در واقع برای جلوگیری از پدیده هامینگ یک مقدار بهینه برای قطر محفظه وجود دارد.
- ۳- افزایش طول محفظه احتراق سبب کاهش نوسانات فشار می‌شود.
- ۴- با افزایش نسبت هم‌ارزی، مقادیر فشار و نوسانات فشار به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین وجود هوای اضافه می‌تواند سبب جلوگیری از ایجاد پدیده هامینگ شود.

مراجع:

- [۱] HATAMI و R., 1981, Calculation of Combustion Instabilities of Enclosed Diffusion Flames. *The Chemical Engineering Journal*, . 22: p. 1-14
- [۲] مسعود قدیمی ، علیرضا رضانی، ۱۳۸۸، "بررسی تاثیر پارامترهای عملکردی و هندسه‌ی محفظه احتراق بر ناپایداری احتراق فرکانس پایین"، هشتمین کنفرانس بین‌المللی هوا فضا دانشگاه صنعتی شریف.
- [۳] مهدی بالو، بیژن ملایی، ۱۳۹۲، "بررسی افزودن گاز طبیعی بر سرعت آرام شعله بنزین"، مجموعه چکیده مقالات هشتمین همایش بین‌المللی موتورهای درون‌سوز و نفت.
- [۴] Worth, N.A., Dawson, J.R., 2013, "Modal dynamics of self-excited azimuthal instabilities in an annular combustion chamber", *Combustion and Flame*. 160 p. 2476–2489.
- [۵] Worth, N.A. , Dawson, J.R., 2013, Self-excited circumferential instabilities in a model annular gas turbine combustor: Global flame dynamics. *Proceedings of the Combustion Institute*,. 34: p. 3127–3134.
- [۶] داوود دودانگه، محمد حیدری، ۱۳۹۳، "تاثیر هندسی و هیدرودینامیکی پارامترهای صفحه انژکتور روی پایداری احتراق"، اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک.
- [۷] داوود دودانگه، محمد حیدری. ۱۳۹۴، "محاسبه قطر متوسط قطره سوخت برای ایجاد پایداری احتراق موتور سوخت مایع با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی"، دومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران و مکانیک ایران.
- [۸] Chen, Y. , Driscoll, J.F. , 2016, "A multi-chamber model of combustion instabilities and its assessment using kilohertz laser diagnostics in a gas turbine model combustor", *Combustion and Flame*, 174: p. 120–137.

- [۹] L. Yuan, C.S., 2016, "Large eddy simulation of combustion instability in a tripropellant air heater", *Acta Astronautica*, 129: p. 59–73.
- [۱۰] Pope, S. B. . 2007, *Turbulence Flows*, ed. fifth, United states of America , New York: Cambridge University Press.
- [۱۱] *Ansys, Inc.*, 2013, *Ansys Fluent 16 User's Guide*.