

بررسی عددی اثر سطوح مختلف ناهمگنی بر طول شعله آشفته در محفظه احتراق

سید محمد مهدی ثابت^۱ و سید عبدالمهدی هاشمی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، smms_sabet@yahoo.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، hashemi@kashanu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۱/۲۷، پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۹)

چکیده: احتراق مخلوط واکنش‌دهنده‌های ناهمگن نوعی از احتراق است که در آن اختلاط سوخت و هوا به‌طور کامل انجام نمی‌شود. از آنجا که مطالعات گذشته بر روی این نوع احتراق در فضای باز انجام شده، هدف این تحقیق بررسی عددی مشاهده اثر سطوح مختلف ناهمگنی بر طول شعله در دبی‌ها و نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در فضای بسته و بدون حضور هوای محیط و نفوذ آن بر شعله است. در این بررسی عددی از مدل‌سازی معادلات ناویراستوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز و مدل‌سازی آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد و مدل‌سازی جریان واکنشی روش اتلاف گردابه‌ای EDC استفاده شده است. همچنین، در این مطالعه از سینتیک GRI2.11 استفاده شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که میزان طول شعله در طول ناهمگنی مشخصی کمینه می‌شود، به‌طوری که در طول‌های ناهمگنی قبل و بعد از آن، طول شعله افزایش می‌یابد. این طول ناهمگنی با تغییر دبی و تغییر نسبت هم‌ارزی متفاوت است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که طول شعله در حالت غیرپیش‌مخلوط کمتر از طول شعله در حالتی است که مخلوط سوخت و هوا به‌صورت پیش‌مخلوط در محفظه مشتعل می‌شوند. ولی، هرچه نسبت هم‌ارزی کاهش پیدا می‌کند، اختلاف کمتر می‌شود، به‌طوری که در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر طول شعله در حالت غیرپیش‌مخلوط بیشتر از حالت پیش‌مخلوط می‌شود. همچنین، سطح مقطع شعله در داخل محفظه چه در جهت طولی و چه در جهت عرضی با تغییر طول ناهمگنی تغییر می‌کند.

کلیدواژگان: احتراق آشفته، ناهمگنی، طول شعله، محفظه احتراق

مقدمه

شعله‌ها (چه آرام و چه آشفته)، از نظر چگونگی احتراق، به دو نوع پیش‌مخلوط و غیرپیش‌مخلوط تقسیم‌بندی می‌شوند. در شعله‌های پیش‌مخلوط، سوخت و اکسیدکننده ابتدا با یک مکانیزم مشخص و در یک محفظه مشخص باهم مختلط و سپس محترق می‌شوند. در صورتی که در شعله‌های غیرپیش‌مخلوط، سوخت و اکسیدکننده از قسمت‌های مختلف وارد یک محفظه می‌شوند و بدون اختلاط اولیه مشتعل می‌شوند. هر دو حالت احتراق مزایا و معایب خاص خود را دارند. حالت سوم احتراق مخلوط واکنش‌دهنده‌های ناهمگن است. در این حالت، سوخت و هوا، به‌صورت مجزا و قبل از ورود به محلی که قرار است اشتعال و احتراق صورت پذیرد، به یک لوله مشترک وارد می‌شوند که در این لوله اختلاط آن‌ها صورت می‌گیرد. اگر طول این لوله خیلی زیاد باشد، اختلاط سوخت و هوا به‌صورت کامل صورت می‌گیرد و درواقع احتراق پیش‌مخلوط خواهد بود و اگر طول این لوله صفر باشد، اختلاطی بین سوخت و هوا نیست و احتراق غیرپیش‌مخلوط خواهد بود. به طول‌های مختلف این لوله مشترک (LT)، که میزان اختلاط سوخت و هوا در آن متفاوت است، سطوح مختلف ناهمگنی گفته می‌شود. این نوع احتراق از سال ۱۹۹۷ مورد توجه قرار گرفته است. برخی احتراق‌های صنعتی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در شرایط رقیق و با سوخت و هوای ناهمگن کار کنند [۱].

تحقیقاتی که تاکنون روی پدیده احتراق مخلوط واکنش دهنده‌های ناهمگن صورت گرفته است تماماً در فضای باز انجام شده است و از این تحقیقات تنها دو مورد در مطالعات خود به بررسی طول شعله پرداخته‌اند. نتایج بعضی از تحقیقات بالا به‌طور مختصر بیان می‌شود.

در سال ۱۹۹۷، لی و همکارانش تحقیقی بر روی متغیرهای پیش‌مخلوط جزئی ساختار شعله جت آشفته انجام دادند [۲]. آن‌ها دریافتند که نسبت هم‌ارزی کلی با افزایش سرعت داخلی لوله افزایش می‌یابد. وقتی که هوای اضافی از اطراف به جریان اضافه می‌شود اثر آن به‌صورت کاهش طول شعله است و اثر آن همانند این است که نسبت سرعت جت داخلی به خارجی افزایش یابد. همچنین، تغییرات در طول ناهمگنی باعث تغییرات کمی در طول شعله می‌شود. طول بلندشدگی شعله ارتباط خطی با نسبت سرعت ورودی به سرعت خروجی دارد و شیب این نسبت خطی وقتی که طول ناهمگنی افزایش می‌یابد کمتر می‌شود. این مشاهدات روشی را برای کنترل طول شعله و پایداری شعله از طریق نسبت سرعت ورودی به سرعت خروجی و طول ناهمگنی نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۰، منصور طی تحقیق آزمایشگاهی روی پایداری سازی شعله‌های قسمتی پیش‌مخلوط [۳] به طراحی جدیدی رسید که شعله‌های قسمتی پیش‌مخلوط را به‌صورت وسیع پایدار می‌کرد. مشعل نازل مخروطی جریان متمرکز^۱ شعله‌های بسیار پایدار را تا رینولدز ۶۰۰۰۰ ایجاد می‌کند و دلیل اصلی پایداری این شعله‌ها داشتن سرمشعل مخروطی است. خصوصیات مشعل نازل مخروطی جریان متمرکز نشان می‌دهد که این مشعل برای کارهای صنعتی بسیار کاربردی است. جزئیات ساختار ناحیه واکنش از طریق بررسی توزیع رادیکال OH انجام شده است. در سال ۲۰۰۴، سامسون و همکارانش با مطالعه تجربی انتشار آزادانه شعله‌های هوا پروپان با اختلاط ناهمگن [۴] به این نتیجه رسیدند که نوسان کسر اختلاط تأثیری بر گسترش هسته شعله ندارد. همچنین، ارتفاع شعله برای مخلوط‌های ناهمگن با سرعت کمتری از حالت‌های همگن افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۹، سفرین و همکارانش، با تحقیق روی میدان جریان شعله‌های آشفته پیش‌مخلوط سطح‌بندی‌شده [۵]، یک سرمشعل برای شعله‌های پیش‌مخلوط طراحی کردند که برای طیف وسیعی از سوخت‌های رقیق پایدار است و برای سطح‌بندی‌های مختلف و سوخت‌های مختلف معرفی شده است. آن‌ها با سرمشعل طراحی‌شده اثرات سطح‌بندی، نسبت هم‌ارزی و احتراق پیش‌مخلوط رقیق را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۴، میرس و همکارانش تحقیقی روی تثبیت شعله‌های آشفته پیلوت‌دار با ورودی ناهمگن انجام دادند [۶]. در این تحقیق، دو شعله با نسبت هم‌ارزی، سرعت جت کلی و شرایط شعله برابر و با نسبت ناهمگنی متفاوت مقایسه شدند. شعله با شرایط ورودی ناهمگن نسبت به شرایط ورودی همگن پایدارتر است و دلیل اصلی بهبود تثبیت شعله با ورودی‌های ناهمگن نرخ آزاد شدن حرارت بالاتر و نرخ اضمحلال پایین‌تر در نزدیکی مشعل است. اختلاط ناقص بالادست جریان خروجی جت باعث ایجاد گرادیان‌های کم در کسر اختلاط می‌شود که در مرزهای جت در محدوده پیلوت حاضر می‌شود. در سال ۲۰۱۵، مسری تحقیقی روی ناهمگنی و دامنه ترکیبات محدوده اشتعال‌پذیری در شعله‌های آشفته انجام داد [۷]. این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در فهم ساختار شعله‌های ناهمگن آشفته و طبقه‌بندی‌شده را مرور کرده است. در شعله آرام با ورودی ناهمگن، فعل‌وانفعال بین مخلوط‌های رقیق و غنی عمدتاً منجر به بهبود مقاومت شعله در برابر خاموشی با استفاده از کشیدگی می‌شود. تحقیق بر روی محفظه توربین انجام شده است و نشان داد که افزایش ناهمگنی در شعله ناپایداری را افزایش می‌دهد. بیشینه تثبیت شعله برای حد مشخصی از ناهمگنی به‌دست آمد. در سال ۲۰۱۶، کلینهنز و همکارانش مطالعه‌ای روی مشخصه‌های شعله آشفته مشعل پیلوت‌دار با سه سطح ناهمگنی ورودی با شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ انجام دادند [۸]. در نتایج آزمایشگاهی میزان ناهمگنی بهینه‌ای به‌دست آمد که منجر به تثبیت شعله بالاتری می‌شد. همچنین، به این نتیجه رسیدند که آزادسازی حرارت متمرکزتر و زودتر برای افزایش تثبیت شعله مفید است. در سال ۲۰۱۶، گویرت و همکارانش تحقیقی روی اثرات سه سوخت دی متیل اتر، گاز مایع و گاز طبیعی فشرده روی تثبیت شعله‌های آشفته با ورودی‌های ترکیب‌شده ناهمگن انجام دادند [۱۰]. مشخص شد که بهبود تثبیت شعله بهترین اثر را

1. CFCN

2. Large-Eddy Simulation

در گاز طبیعی فشرده و کمترین اثر را در دی متیل اتر دارد که سه دلیل ممکن برای این تفاوت در تثبیت پایداری الگوهای اختلاط، اثرات پیلوت و خواص سوخت بیان شد. در سال ۲۰۱۶، منصور و همکارانش تحقیقی روی اثر میدان اختلاط بر پایداری و ساختار شعله‌های ناهمگن قسمتی پیش‌مخلوط آشفته در جریان محوری با نازل مخروطی انجام دادند [۱۲]. میدان اختلاط به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی اثرگذار در پایداری ساختار شعله‌های قسمتی پیش‌مخلوط شناخته شد. ساختار میدان جریان، در یک رینولدز ثابت و یک نسبت هم‌ارزی، کاملاً از سطح ناهمگنی تأثیرپذیر است. نتایج عددی نشان می‌دهد که در دو سطح ناهمگنی مختلف، حالتی که بیشتر پایدار است، نوسانات سرعت محوری بیشتری دارد. از طرف دیگر زمانی که به محدوده بلندشدگی شعله نزدیک می‌شود با افزایش عدد رینولدز یا کاهش نسبت هم‌ارزی لایه OH وسیع‌تر می‌شود و هرچه این لایه نازک‌تر باشد نشان‌دهنده پایداری شعله بیشتر یا فاصله‌داشتن از ناحیه خاموشی است. در سال ۲۰۱۸، منصور و همکاران مطالعه آزمایشگاهی روی مشعل مقطع مستطیل‌شکل با جریان مرکزی برای تثبیت شعله‌های ناهمگن اندکی پیش‌مخلوط سوخت‌های گازی انجام داده‌اند [۱۴]. در این کار طراحی اصلاحی روی شعله‌های آشفته مقطع مستطیلی انجام شده است. اثرات نسبت هم‌ارزی، سطح ناهمگنی و عدد رینولدز در این مطالعه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط ناهمگن بسیار پایدارتر از مخلوط کاملاً پیش‌مخلوط است. تثبیت شعله با استفاده از نازل هرمی مقطع مستطیلی^۱ بسیار بهبود پیدا کرده است. این سرمشعل توانایی ایجاد ناحیه وسیعی از شعله‌های صفحه‌ای آشفته از مخلوط غیر پیش‌مخلوط تا کاملاً پیش‌مخلوط را دارد. سرمشعل نازل هرمی مقطع مستطیل توانسته است تا نسبت هم‌ارزی ۰/۶ را پایدار بسوزاند. در صورتی که مقطع دایره‌ای می‌تواند برای شعله‌های غنی استفاده شود. در این مشعل، اثر تثبیت جریان ناهمگنی بسیار بیشتر از شعله پیش‌مخلوط ساده است. با اضافه کردن جریان اضافی محوری تثبیت شعله بیشتری به‌دست آمد. در سال ۲۰۱۹، جین و همکارانش تحقیقی روی اثرات ناهمگنی بر ساختار شعله‌های پیش‌مخلوط آشفته انجام دادند [۱۶]. با افزایش طول ناهمگنی شعله‌های شبیه مشعل بنسن^۲ با نوک شعله کوتاه‌تر در پایین‌دست جریان پیلوت تشکیل می‌شود. برای تمام شعله‌های بررسی‌شده، سطح بیشینه شعله با افزایش نرخ ناهمگنی افزایش می‌یابد.

حضور هوای محیط و نفوذ آن ساختار شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه اکثر احتراق‌های صنعتی در داخل محفظه یا کوره انجام می‌شود. بنابراین، در تحقیق حاضر برخلاف مطالعات گذشته اثر ناهمگنی در یک محفظه احتراق بدون حضور هوای محیط بررسی می‌شود. هدف این مقاله بررسی اثر سطوح مختلف ناهمگنی ورودی بر طول شعله در دی‌ها و نسبت هم‌ارزی مختلف است.

معادلات حاکم و روش عددی

برای شبیه‌سازی جریان واکنشی، معادله پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، انتقال گونه‌ها و آشفته‌گی حل می‌شوند. این معادلات به‌صورت روابط (۱) تا (۵) بیان می‌شوند.

معادله پیوستگی

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا، $\vec{V}$ بردار سرعت مخلوط گاز و ρ_g چگالی مخلوط گاز است.

معادله اندازه حرکت

$$\rho_g \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \bar{\tau} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = (\mu + \mu_t) (\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla} \vec{V}^T) \quad (3)$$

1. CFSB

2. Bunsen burner

در رابطه بالا، p بیانگر فشار استاتیک، $\bar{t}$ بیانگر تانسور تنش برشی، μ گرانیوز مولکولی و μ_t گرانیوز مربوط به آشفستگی است. به منظور محاسبه گرانیوز آشفستگی، از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$\mu_t = \frac{\rho_g C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (۴)$$

معادله انرژی

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V} c_p T_g) = \vec{\nabla} \cdot ((\lambda_g + \lambda_{g,t}) \vec{\nabla} T_g) - \sum_{i=1}^{N_s} \vec{\omega}_i h_i W_i \quad (۵)$$

در رابطه بالا، λ_g ضریب هدایت حرارتی گاز، $\lambda_{g,t}$ ضریب هدایت حرارتی آشفستگی، ω_i بیانگر نرخ مولی تولید، h_i بیانگر آنالپی و W_i بیانگر وزن مولکولی گونه i ام است.

معادله انتقال گونه‌ها

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V} Y_i) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_i + \vec{\omega}_i W_i \quad (۶)$$

$$\vec{J}_i = -(\rho_g (D_{i,m} + D_t)) \vec{\nabla} Y_i \quad (۷)$$

در رابطه ۷، $D_{i,m}$ نفوذ جرمی برای گونه i و D_t نفوذ ناشی از آشفستگی است.

برای مدل کردن تنش‌های رینولدزی در معادله بقای تکانه از مدل توربولانسی K- ε استاندارد استفاده می‌شود. شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق به صورت متقارن محوری و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام می‌شود. تصحیح فشار با الگوریتم سیمپل انجام می‌شود [۱۷]. همچنین، در این مدل‌سازی، از روش گسسته‌سازی با تقریب بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود. سینتیک‌های یک یا دومرحله‌ای متداول، که گونه‌های شیمیایی محدودی دارند، برای مخلوط‌های غنی قابل استفاده نیستند. در این تحقیق، به منظور بررسی غلظت رادیکال OH در ردیابی ناحیه احتراق و همچنین ضرورت بررسی آلاینده‌های NOx در کارهای آینده، استفاده از سینتیک‌های کوچک امکان‌پذیر نبود. لذا، با توجه به اینکه سینتیک GRI2.11 نسبت به GRI3 نتایج بهتری برای تخمین آلاینده‌ها دارد [۱۸، ۱۹]. در این شبیه‌سازی، سینتیک GRI2.11 با ۴۹ گونه شیمیایی و ۲۷۷ واکنش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰].

مسئله شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی محفظه با استفاده از فلوئنت، کار تجربی گرتون و همکاران مبنای مطالعه و مدل‌سازی قرار می‌گیرد. ایشان، در سال ۱۹۹۴، به مطالعه احتراق غیر پیش‌مخلوط گاز طبیعی درون یک محفظه استوانه‌ای پرداختند [۲۱]. مدل‌سازی هندسه به صورت دوبعدی و بر مبنای تقارن محوری است. برای مدل‌سازی آشفستگی از مدل K- ε استاندارد و برای مدل‌سازی اثرات متقابل آشفستگی و واکنش از روش اتلاف گردابه‌ای^۱ استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفستگی، از معادلات ناویراستوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز (RANS) استفاده شده است. طرحواره هندسه محفظه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

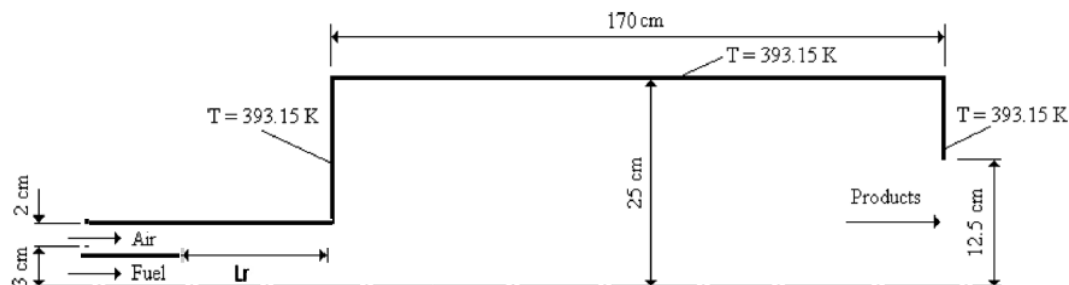


Figure 1- Schematic of the combustion chamber studied [20]

شکل ۱- طرحواره محفظه احتراق مورد مطالعه [۲۰]

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود، سوخت و هوا به صورت مجزا به محفظه احتراق وارد می شوند. اگر طول ناهمگنی صفر باشد، یعنی سوخت و هوا بدون هیچ اختلاط اولیه ای وارد محفظه احتراق می شوند و سپس در محفظه احتراق محترق می شوند (احتراق غیرپیش مخلوط). هرچه طول ناهمگنی زیادتر شود، سوخت و هوا با میزان اختلاط بیشتری وارد محفظه احتراق می شوند که در حالت حدی و زمانی که طول ناهمگنی خیلی زیاد شود، سوخت و هوا به صورت کاملاً پیش مخلوط وارد محفظه احتراق شده و محترق می شوند. در این تحقیق، اثر طول ناهمگنی بر طول شعله ایجاد شده در محفظه احتراق بررسی می شود.

بر مبنای کار تجربی گرتون و همکاران، سوخت ورودی به محفظه احتراق گاز با ترکیب ۹۰ درصد جرمی متان و ۱۰ درصد جرمی نیتروژن است. همچنین، ترکیب هوای ورودی به صورت ۲۳ درصد جرمی اکسیژن و ۷۶ درصد جرمی نیتروژن و ۱ درصد جرمی بخار آب است. سرعت ورودی سوخت به محفظه ۷/۷۶ متر بر ثانیه و سرعت ورود هوا به محفظه ۳۶/۲۹ متر بر ثانیه است که با این شرایط، صحت سنجی شبیه سازی عددی انجام شده است. در ادامه، نسبت هم آری، دبی جرمی کل ورودی به محفظه و دمای هوا و سوخت که مورد بررسی قرار گرفته است، در جدول ۱ آورده شده است. برای یکسان سازی شرایط و مقایسه صحیح بین نسبت هم آری های مختلف، دبی ورودی به محفظه در نسبت هم آری های مختلف یکسان در نظر گرفته شده است که با توجه به فرضیات بالا، در دبی ورودی مخلوط یکسان، هرچه نسبت هم آری بیشتر می شود، سرعت هوا کمتر و سرعت سوخت بیشتر می شود.

جدول ۱- شرایط مختلف هوا و سوخت ورودی
Table 1- Different conditions of air and fuel inlet

$\dot{m}$ (kg/s)	Equivalence ratio	T_{air} (K)	T_{fuel} (K)	$\dot{m}$ (kg/s)	Equivalence ratio	T_{air} (K)	T_{fuel} (K)
0.082	0.8	323.15	313.15	0.328	0.9	323.15	313.15
0.164	0.8	323.15	313.15	0.082	1.1	323.15	313.15
0.328	0.8	323.15	313.15	0.164	1.1	323.15	313.15
0.082	0.9	323.15	313.15	0.328	1.1	323.15	313.15
0.164	0.9	323.15	313.15				

در مرز ورودی، که محل ورود سوخت و هواست، شرط مرزی سرعت ورودی سوخت و هواست. در محل خروج گازهای احتراقی روی مرز خروجی از شرط فشار نسبی صفر استفاده می شود. در مرز مشترک سیال با دیواره کوره، از شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره ها برای سرعت استفاده می شود. همچنین، دیواره محفظه در دمای ثابت قرار دارد. خط مرکزی محفظه به عنوان محور تقارن در نظر گرفته شده و تغییرات حول محور تقارن صفر است.

استقلال حل از تعداد سلول شبکه محاسباتی

انتخاب بهترین شبکه محاسباتی بسیار حائز اهمیت است؛ هم شبکه ای که نتایج با دقت بالا داشته باشد و هم شبکه ای که خیلی ریز نباشد که مدت زمان حل عددی را بالا ببرد. با توجه به اینکه در این شبیه سازی از مدل توربولانسی K- ϵ استاندارد و همچنین برای رفتار اطراف دیوار از تابع دیواره استاندارد استفاده شده است، میزان y^+ باید در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار بگیرد. سلول های شبکه محاسباتی به صورت مربعی و یکنواخت در نظر گرفته شده است. با توجه به موارد بالا، برای بررسی استقلال نتایج حل از شبکه محاسباتی، چهار شبکه با تعداد سلول های ۱۸۰۰۰، ۴۰۰۰۰، ۷۱۰۰۰ و ۸۰۰۰۰ انتخاب و نتایج حل روی هر کدام مقایسه شده است. شکل ۲ نتایج مربوط به کسر جرمی OH در مقطعی با طول ۱/۲ متر داخل محفظه را برای این چهار شبکه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نتایج دو شبکه، با ۷۱۰۰۰ و ۸۰۰۰۰ تعداد سلول، تفاوت چندانی باهم ندارد. بنابراین، برای ادامه کار شبکه با ۷۱۰۰۰ سلول مورد استفاده قرار می گیرد. میزان y^+ برای مش با ابعاد ۲/۵ میلی متر برابر ۱۵۲ است که داخل محدوده مورد نظر است.

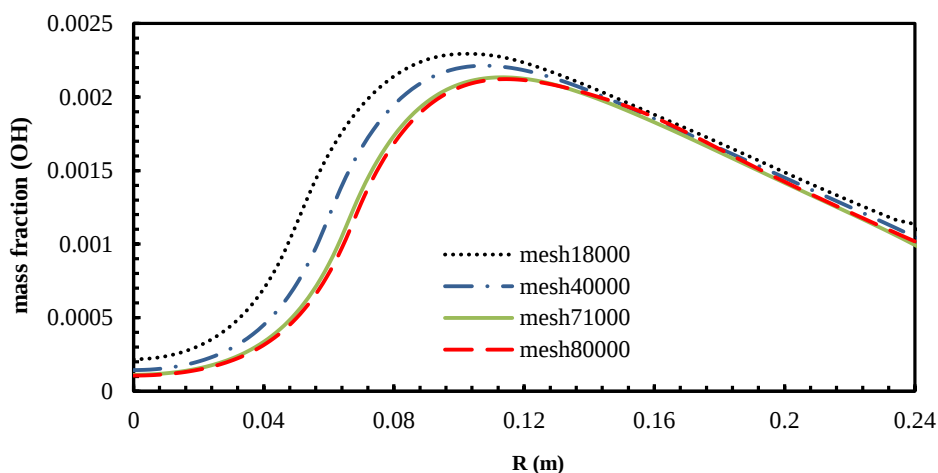


Figure 2- OH mass fraction at some point in the middle of the chamber for the independency of the mesh

شکل ۲- کسر جرمی OH در مقطعی در وسط محفظه برای بررسی استقلال حل از شبکه

راستی آزمایی حل عددی

برای راستی آزمایی حل، هندسه محفظه احتراق با ابعاد واقعی شبیه سازی شد که در آن دما در نقاط متعددی از محفظه با داده های تجربی گرتون و حل عددی داسیلوا [۲۲] مقایسه می شود. همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود، نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده های تجربی هماهنگی خوبی دارند. داسیلوا توسط مدل احتراقی Eddy Breakup-Arrhenius و همچنین الگوریتم تصحیح فشار SIMPLEC حل عددی را انجام داده است که مشاهده می شود که نتایج تحقیق فعلی نسبت به نتایج حل عددی داسیلوا و همکاران تطابق بهتری با داده های تجربی دارد.

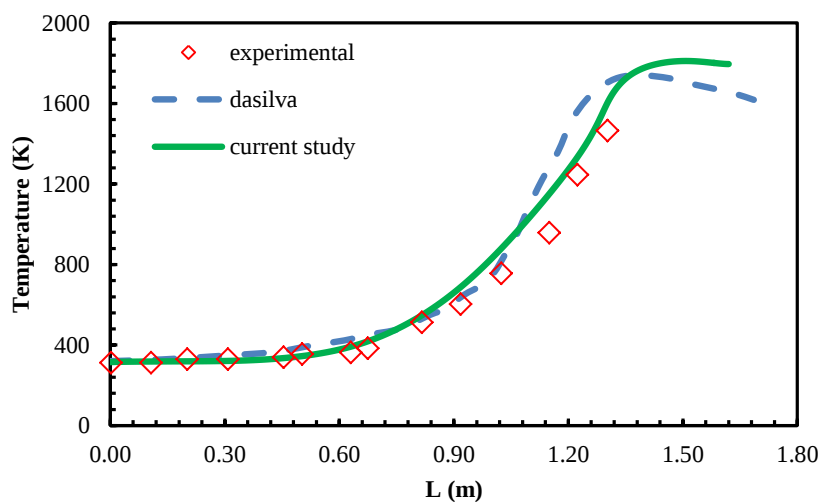


Figure 3- Comparison of chamber axis temperature with the experimental [21] and other numerical results [22]

شکل ۳- مقایسه دما در محور محفظه با نتایج تجربی [۲۱] و نتایج عددی دیگر [۲۲]

نتایج و بحث

تغییر طول ناهمگنی میزان اختلاط اولیه سوخت و هوا و پروفیل سرعت مخلوط را تغییر می دهد. به منظور بررسی اثر طول ناهمگنی بر اختلاط سوخت و هوا، شکل ۴ کسر جرمی متان را در ورودی به محفظه نشان می دهد. در طول ناهمگنی صفر

کسر جرمی متان در قسمت ورودی سوخت برابر با یک و در قسمت هوا برابر با صفر است. با افزایش طول ناهمگنی و در طول ناهمگنی ۱۰۰ میلی متر بیشینه کسر جرمی متان در ورودی به محفظه با تغییر بسیار زیاد به حدود ۰/۲۳ می رسد و پس از آن در طول ناهمگنی ۲۰۰ میلی متر به ۰/۱۴ و سپس در طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی متر به ۰/۰۶ می رسد. همان طور که دیده می شود، افزایش میزان اختلاط سوخت و هوا در طول ناهمگنی های کم، بسیار زیاد است و هرچه طول ناهمگنی افزایش می یابد این میزان کمتر می شود و از یک طول ناهمگنی به بعد تقریباً اثر ناچیزی دارد.

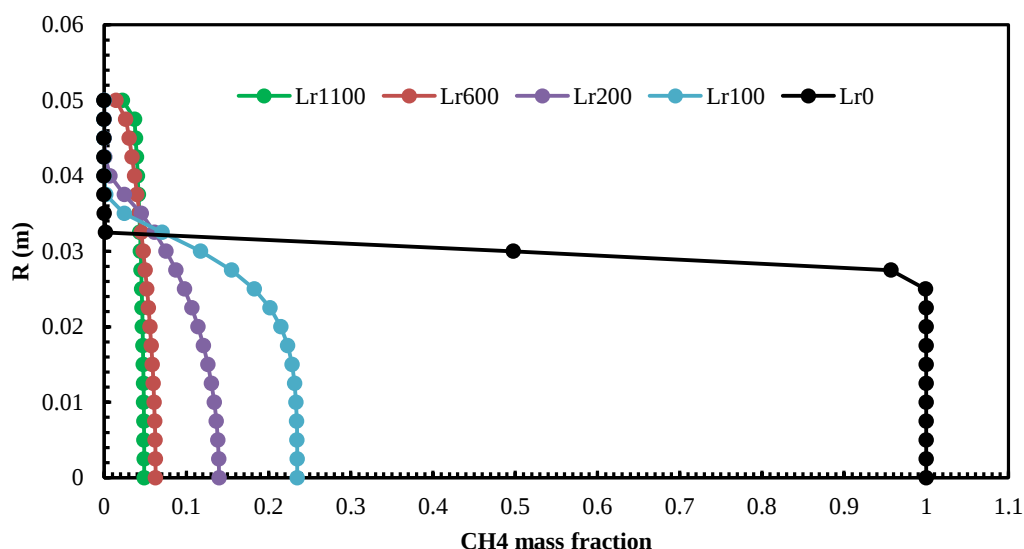


Figure 4- CH4 mass fraction entering the chamber at different inhomogeneous lengths
شکل ۴- کسر جرمی متان هنگام ورود به محفظه در طول های ناهمگنی مختلف

تأثیر دیگر طول ناهمگنی بر روی پروفیل سرعت است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، زمانی که طول ناهمگنی زیاد می شود، اختلاف سرعت بیشینه و کمینه کم می شود و در طول های ناهمگنی بالاتر سرعت ورودی به محفظه به صورت یک سرعت یکنواخت تبدیل می شود.

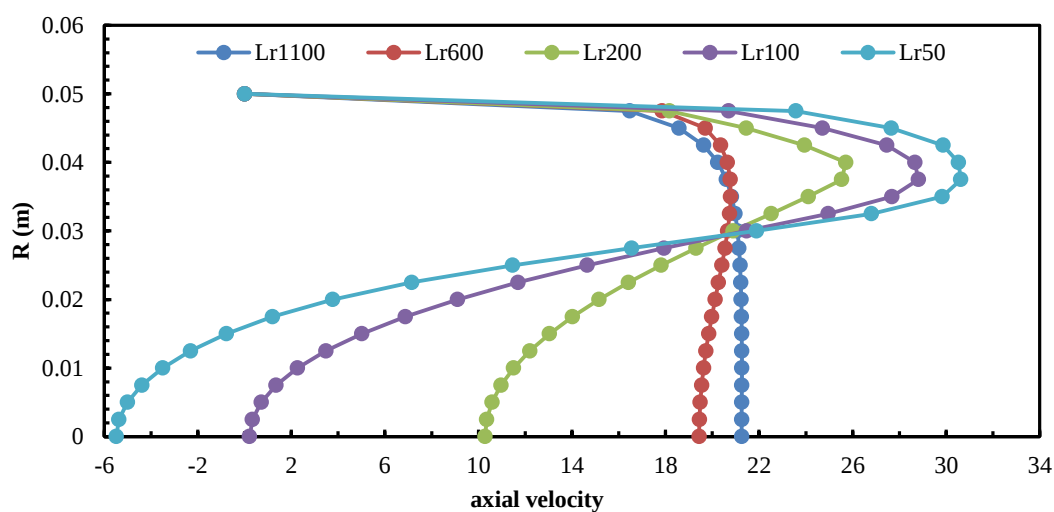


Figure 5- axial velocity of the mixture entering the chamber at different inhomogeneous lengths
شکل ۵- سرعت محوری مخلوط در ورود به محفظه در طول های ناهمگنی مختلف

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده شد، در اثر افزایش طول ناهمگنی، میزان اختلاط اولیه سوخت و هوا و همچنین پروفیل سرعت ورودی به محفظه احتراق دچار تغییرات می‌شود. در شکل ۶ سرعت محوری داخل محفظه در یک مقطع (به‌طور مثال در طول ۰/۷ متر) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول ناهمگنی، ابتدا، بیشینه سرعت کاهش پیدا می‌کند و این روند تا یک طول ناهمگنی مشخص ادامه پیدا می‌کند (طول ناهمگنی ۲۰۰ میلی‌متر) و پس از آن، با افزایش طول ناهمگنی، بیشینه سرعت افزایش پیدا می‌کند. به همین علت طول شعله از حالت غیر پیش‌مخلوط تا یک طول ناهمگنی مشخص کاهش پیدا می‌کند و پس از آن با افزایش طول ناهمگنی طول شعله افزایش می‌یابد.

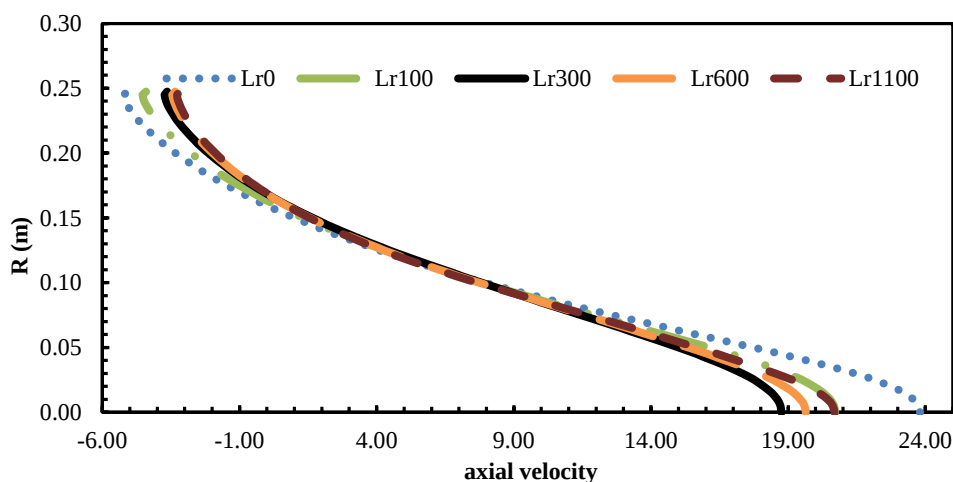


Figure 6- Axial velocity 0.7 m inside the combustion chamber at different inhomogeneous lengths

شکل ۶- سرعت محوری در طول ۰/۷ متر داخل محفظه احتراق در طول‌های ناهمگنی مختلف

برای تحلیل و بررسی طول شعله، مبنای طول شعله حداکثر میزان کسر جرمی OH روی محور تقارن محفظه احتراق در نظر گرفته شده است [۲۳-۲۶]. طول ناهمگنی از صفر (حالت کاملاً غیر پیش‌مخلوط) تا میزانی که طول شعله به بیشترین حالت ممکن برسد ادامه داده شده است. شکل ۷ نمودار تغییرات طول شعله را در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و در دبی مخلوط ۰/۰۸۲، ۰/۱۶۴ و ۰/۳۲۸ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد.

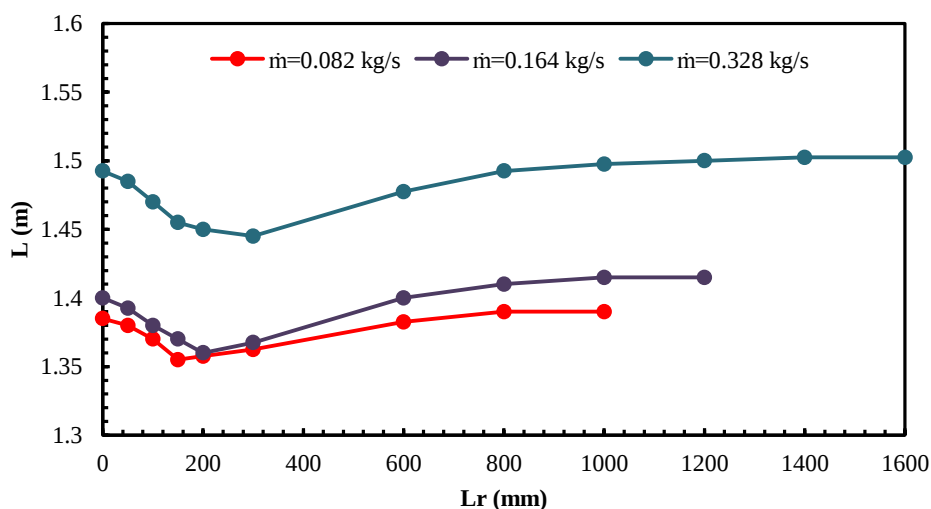


Figure 7- Flame length at equivalence ratio of 0.8 and mass flow rate of 0.082, 0.164 and 0.328 kg/s

شکل ۷- طول شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و دبی جرمی ۰/۰۸۲، ۰/۱۶۴ و ۰/۳۲۸ کیلوگرم بر ثانیه

همان طور که مشاهده می‌شود، میزان طول ناهمگنی، که در آن کمترین طول شعله وجود دارد، براساس دبی تغییر می‌کند. این طول در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 150 میلی‌متر و در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 200 میلی‌متر و در دبی $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 300 میلی‌متر است. با افزایش دبی ورودی، میزان کاهش طول شعله، از حالت غیرپیش‌مخلوط تا حالت با کمترین طول شعله، افزایش پیدا می‌کند. این میزان کاهش در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 30 میلی‌متر و در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 40 میلی‌متر و در دبی $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه برابر $47/5$ میلی‌متر است. هرچه دبی افزایش پیدا می‌کند، طول ناهمگنی، که در آن طول شعله بیشترین مقدار را دارد، افزایش پیدا می‌کند، به طوری که در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 800 میلی‌متر، در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 1000 میلی‌متر و در دبی $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 1400 میلی‌متر است. میزان اختلاف طول شعله در حالت بیشینه با حالت کمینه با افزایش دبی افزایش می‌یابد، به طوری که در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه برابر $32/5$ میلی‌متر، در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 55 میلی‌متر و در دبی $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه برابر $57/5$ میلی‌متر است. همچنین، اختلاف طول شعله در حالت کاملاً غیر پیش‌مخلوط و حالت بیشینه طول شعله در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 10 میلی‌متر، در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 15 میلی‌متر و در دبی $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه برابر 10 میلی‌متر است. با افزایش دبی ورودی به محفظه، میزان اختلاط اولیه سوخت و هوا در طول ناهمگنی ثابت کاهش می‌یابد. بنابراین، اختلاط اولیه تا طول ناهمگنی بیشتری بر کاهش طول شعله اثر می‌گذارد. به همین دلیل، با افزایش دبی، طول شعله در طول ناهمگنی بیشتری کمترین مقدار خود را پیدا می‌کند و همچنین در طول ناهمگنی بیشتری به بیشینه مقدار خود می‌رسد. اثر طول ناهمگنی در نسبت هم‌ارزی $0/9$ و $1/1$ هم بررسی شد و نتایج و نمودارها مشابه نسبت هم‌ارزی $0/8$ است.

در شکل ۸، طول ناهمگنی که در آن کمترین میزان طول شعله وجود دارد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان این طول در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف با افزایش دبی، افزایش پیدا می‌کند. با افزایش دبی، میزان اختلاط اولیه سوخت و هوا در طول ناهمگنی ثابت کاهش می‌یابد و درواقع طول ناهمگنی بیشتری نیاز است تا به میزان اختلاط در دبی پایین‌تر برسد. این عامل باعث می‌شود که کاهش طول شعله به سبب اختلاط اولیه تا طول ناهمگنی بیشتری اثر کاهشی داشته باشد و دیرتر به کمینه مقدار خود برسد. همچنین، مشاهده می‌شود که در دبی $0/164$ کیلوگرم بر ثانیه و $0/328$ کیلوگرم بر ثانیه با افزایش نسبت هم‌ارزی طول ناهمگنی با کمترین طول شعله کاهش می‌یابد و در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه تغییرات وجود ندارد. درواقع، نشان می‌دهد که در دبی‌های پایین، اثر نسبت هم‌ارزی‌های مختلف روی طول ناهمگنی با کمترین شعله ناچیز و حتی بدون اثر می‌شود. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که نسبت هم‌ارزی‌های پایین‌تر اثر بیشتری روی طول ناهمگنی با کمترین طول شعله می‌گذارد، به صورتی که در نسبت هم‌ارزی $1/1$ ، اثر تغییر دبی روی این طول کمتر است. با افزایش نسبت هم‌ارزی، هم میزان هوا نسبت به میزان سوخت موجود کاهش می‌یابد و هم سرعت هوا نسبت به سرعت سوخت کاهش پیدا می‌کند. کم شدن میزان هوا نسبت به سوخت سبب می‌شود که اختلاط اولیه در طول ناهمگنی کمتری محقق شود و به همین علت اختلاط اولیه تا طول ناهمگنی کمتری اثرگذار است. از طرف دیگر، کاهش سرعت هوا نسبت به سوخت سبب کاهش اختلاف سرعت بیشینه و کمینه در ورودی به محفظه احتراق و کاهش سرعت بیشینه داخل محفظه می‌شود که منجر به کاهش طول شعله می‌شود. هرچه دبی کمتر می‌شود، میزان تأثیرهای بالا هم کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر طول شعله با کاهش دبی کمتر می‌شود.

در شکل ۱۱، تغییرات طول شعله در طول ناهمگنی‌های مختلف و براساس نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در دبی $0/082$ کیلوگرم بر ثانیه نشان داده شده است. برای مقایسه طول شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف باید به این نکته توجه داشت که علاوه بر تأثیری که تغییر طول ناهمگنی بر طول شعله دارد، تغییر نسبت هم‌ارزی باعث تغییر دما درون محفظه نیز می‌شود، به طوری که با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای داخل محفظه افزایش می‌یابد و با افزایش دما، نرخ واکنش بیشتر شده و طول شعله کوتاه می‌شود. میزان تأثیرگذاری پارامترهای بالا بر طول شعله، در دبی‌های مختلف، طول‌های ناهمگنی مختلف و نسبت

همارزی‌های مختلف، متفاوت است، به‌طوری که در هر حالت ممکن است که یک پارامتر تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد و در یک حالت دیگر پارامتر دیگر. با توجه به این نکته نتایج زیر به‌دست آمده است.

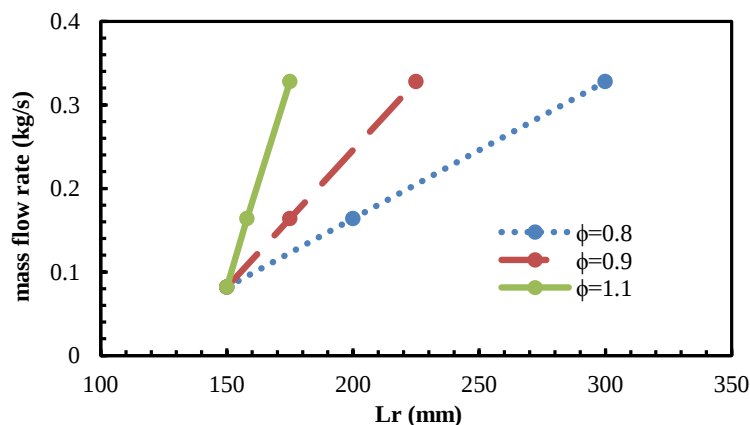


Figure 10- Comparison of inhomogeneity length with minimum flame length at different mass flow rate and equivalence ratios
 شکل ۸- مقایسه طول ناهمگنی با کمترین طول شعله در دبی و نسبت همارزی‌های مختلف

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در دبی ۰/۰۸۲ کیلوگرم بر ثانیه، در یک طول ناهمگنی یکسان، همواره کمترین طول شعله مربوط به نسبت همارزی ۰/۹ است. همچنین، طول شعله در نسبت همارزی ۰/۸ و ۱/۱ در تمامی حالت‌ها به هم نزدیک است، ولی همواره طول شعله در نسبت همارزی ۰/۸ از ۱/۱ بالاتر است.

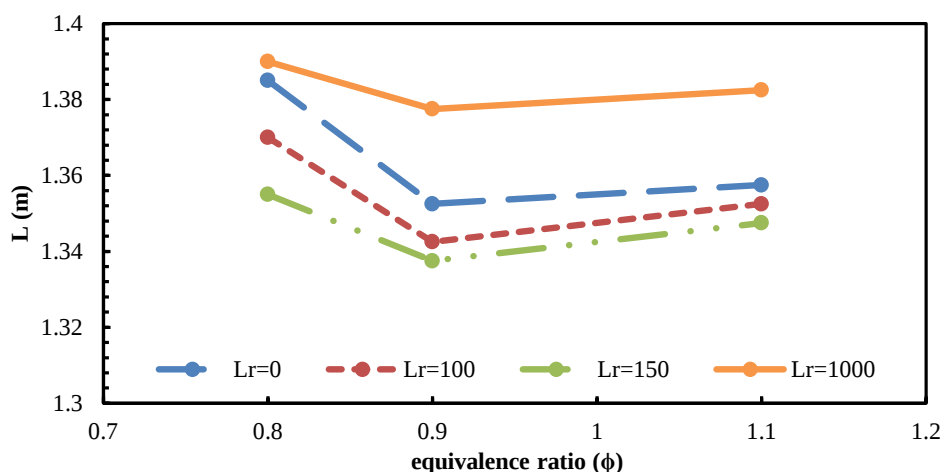


Figure 9- Comparison of flame length at constant mass flow rate of 0.082 kg/s and different inhomogeneity length and equivalence ratio

شکل ۹- مقایسه طول شعله در دبی ۰/۰۸۲ کیلوگرم بر ثانیه و طول ناهمگنی و نسبت همارزی مختلف

در شکل ۱۰، تغییرات طول شعله در دبی ۰/۱۶۴ کیلوگرم بر ثانیه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، در مواقعی که طول ناهمگنی کم است و درواقع مخلوط سوخت و هوا نزدیک به حالت غیرپیش‌مخلوط مشتعل می‌شوند، کمترین میزان طول شعله، در دبی ثابت و طول ناهمگنی یکسان، مربوط به نسبت همارزی ۰/۹ است و از حدود طول ناهمگنی ۵۰۰ میلی‌متر به بعد کمترین میزان طول شعله مربوط به نسبت همارزی ۰/۸ است. در حالت کاملاً غیرپیش‌مخلوط، طول شعله در نسبت همارزی ۰/۸ بالاترین میزان را دارد، ولی از طول ناهمگنی ۵۰ میلی‌متر به بعد طول شعله در نسبت همارزی ۱/۱ بیشترین مقدار را

دارد. همچنین، هرچه طول ناهمگنی زیاد می‌شود و به حالت بیشترین طول شعله می‌رسد، میزان طول شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد؛ یعنی کمترین طول شعله مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و بیشترین طول شعله مربوط به نسبت هم‌ارزی ۱/۱ است.

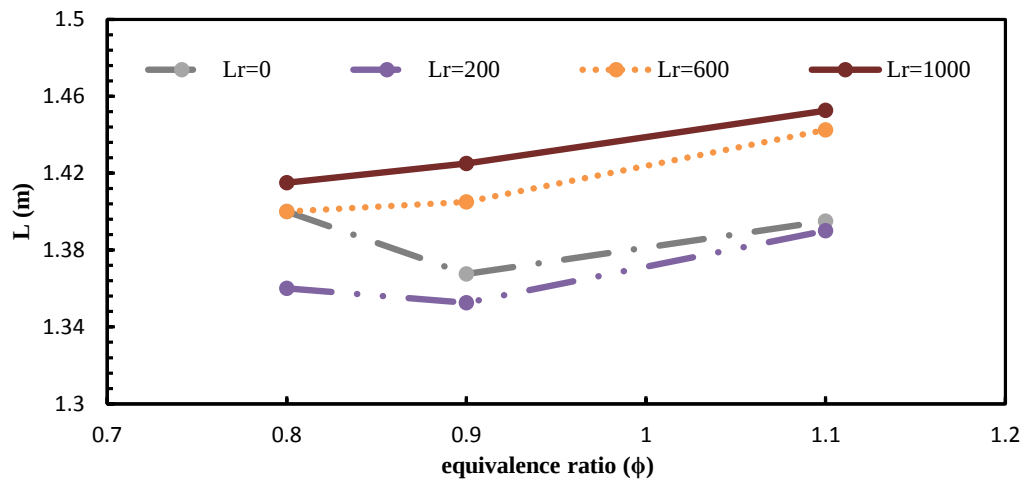


Figure 10- Comparison of flame length at constant mass flow rate of 0.164 kg/s and different inhomogeneity length and equivalence ratio

شکل ۱۰- مقایسه طول شعله در دبی ۰/۱۶۴ کیلوگرم بر ثانیه و طول ناهمگنی و نسبت هم‌ارزی مختلف

در شکل ۱۱، تغییرات طول شعله در دبی ۰/۳۲۸ کیلوگرم بر ثانیه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت و در تمام طول‌های ناهمگنی کمترین میزان طول شعله مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۹ است و از حدود طول ناهمگنی ۶۰۰ میلی‌متر به بعد طول شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و ۰/۹ بسیار به هم نزدیک می‌شود. در حالت کاملاً غیرپیش‌مخلوط، طول شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ بالاترین میزان را دارد، ولی از طول ناهمگنی ۱۰۰ میلی‌متر به بعد طول شعله در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ بیشترین مقدار را دارد.

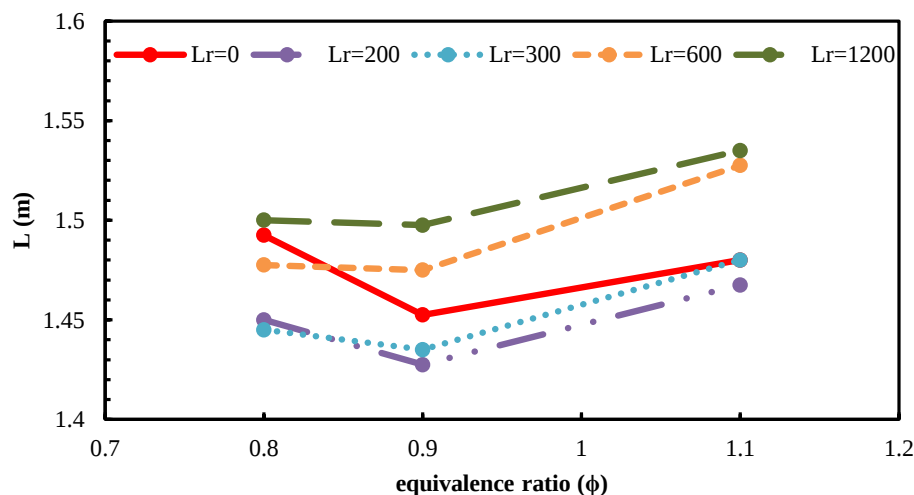


Figure 11- Comparison of flame length at constant mass flow rate of 0.328 kg/s and different inhomogeneity length and equivalence ratio

شکل ۱۱- مقایسه طول شعله در دبی ۰/۳۲۸ کیلوگرم بر ثانیه و طول ناهمگنی و نسبت هم‌ارزی مختلف

در شکل ۱۲، کانتور کسر جرمی OH در شرایط یکسان و سه نسبت هم‌ارزی متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی، ضخامت شعله در وسط محفظه احتراق افزایش می‌یابد. در نسبت هم‌ارزی ۰/۹، میزان حداکثر کسر جرمی OH در محفظه نزدیک به محور مرکزی است و این میزان حداکثر کسر جرمی OH، در نسبت هم‌ارزی ۱/۱، کاملاً به وسط محفظه احتراق متمایل است. همچنین، مشاهده می‌شود که میزان بلندشدگی شعله در اثر افزایش نسبت هم‌ارزی به میزان کمی کاهش می‌یابد. همچنین، ضخامت شعله در هنگام تشکیل شعله در ابتدای محفظه احتراق با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش یافته است.

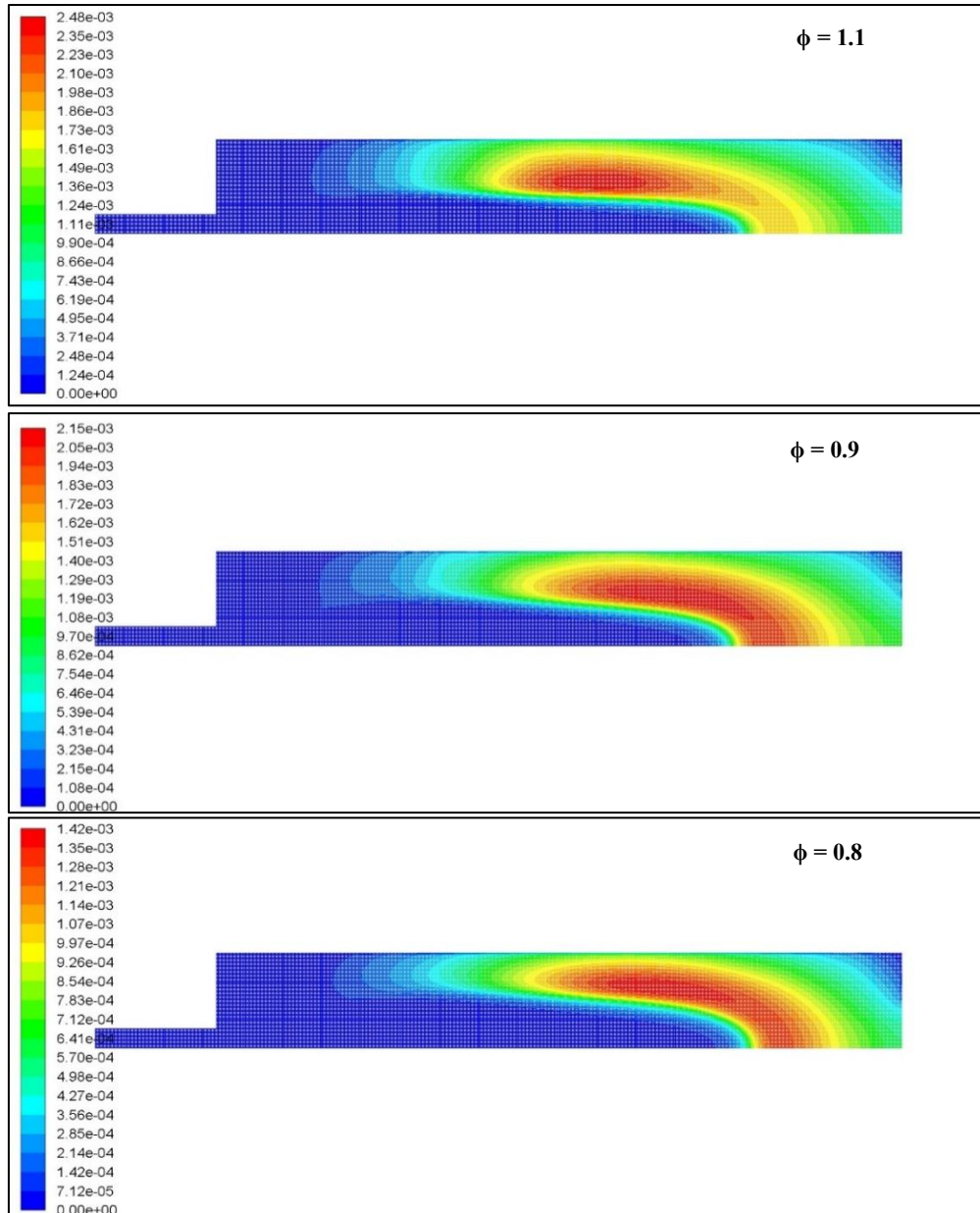


Figure 12- Comparison of contour of OH mass fraction at mass flow rate 0.164 kg/s and without inhomogeneity length and different equivalence ratio

شکل ۱۲- مقایسه کانتور کسر جرمی OH در دبی ۰/۱۶۴ کیلوگرم بر ثانیه و طول ناهمگنی صفر و نسبت هم‌ارزی مختلف

در شکل ۱۳، کانتور کسر جرمی OH در شرایط یکسان و در سه دبی متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش دبی، ضخامت شعله در وسط محفظه احتراق افزایش پیدا می‌کند. همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی، هم طول شعله افزایش می‌یابد و هم طول بلندشدگی شعله کاهش پیدا می‌کند و درواقع می‌توان گفت که افزایش دبی، هم سطح شعله در جهت طولی و هم سطح شعله در جهت عرضی را زیاد می‌کند.

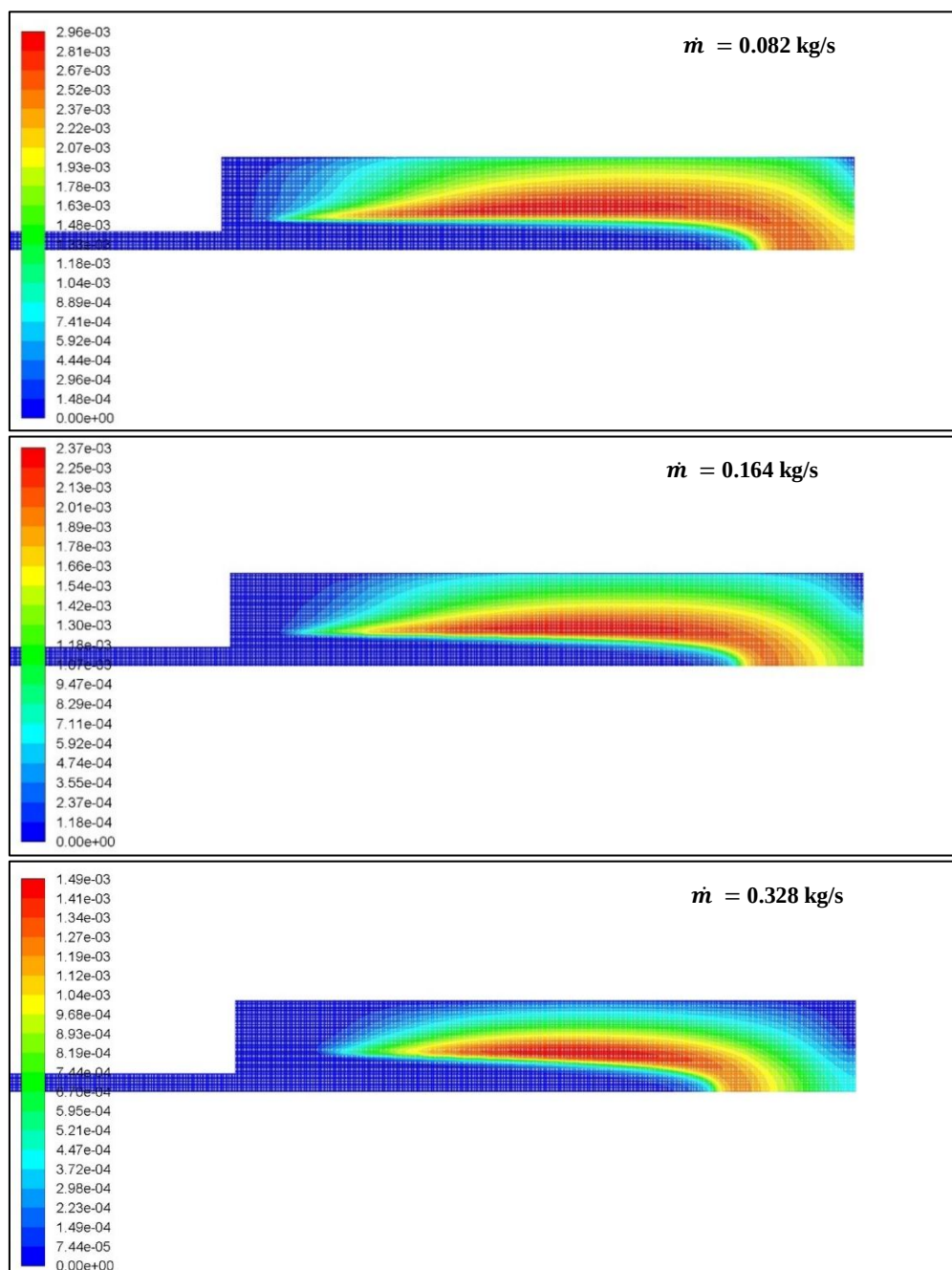


Figure 13- Comparison of contour of OH mass fraction at inhomogeneity length 1000 mm and equivalence ratio 1.1 and different mass flow rate

شکل ۱۳- مقایسه کانتور کسر جرمی OH در نسبت هم‌ارزی ۱/۱ و طول ناهمگنی ۱۰۰۰ میلی‌متر و دبی مختلف

در شکل ۱۴، کانتور کسر جرمی OH در شرایط یکسان و در سه طول ناهمگنی مختلف نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش طول ناهمگنی، سطح شعله در زمان تشکیل شدن آن به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است و به صورت نوک تیز درآمده است. به عبارت دیگر، با افزایش طول ناهمگنی، طول بلندشدگی شعله به طور قابل توجهی کاهش پیدا می کند.

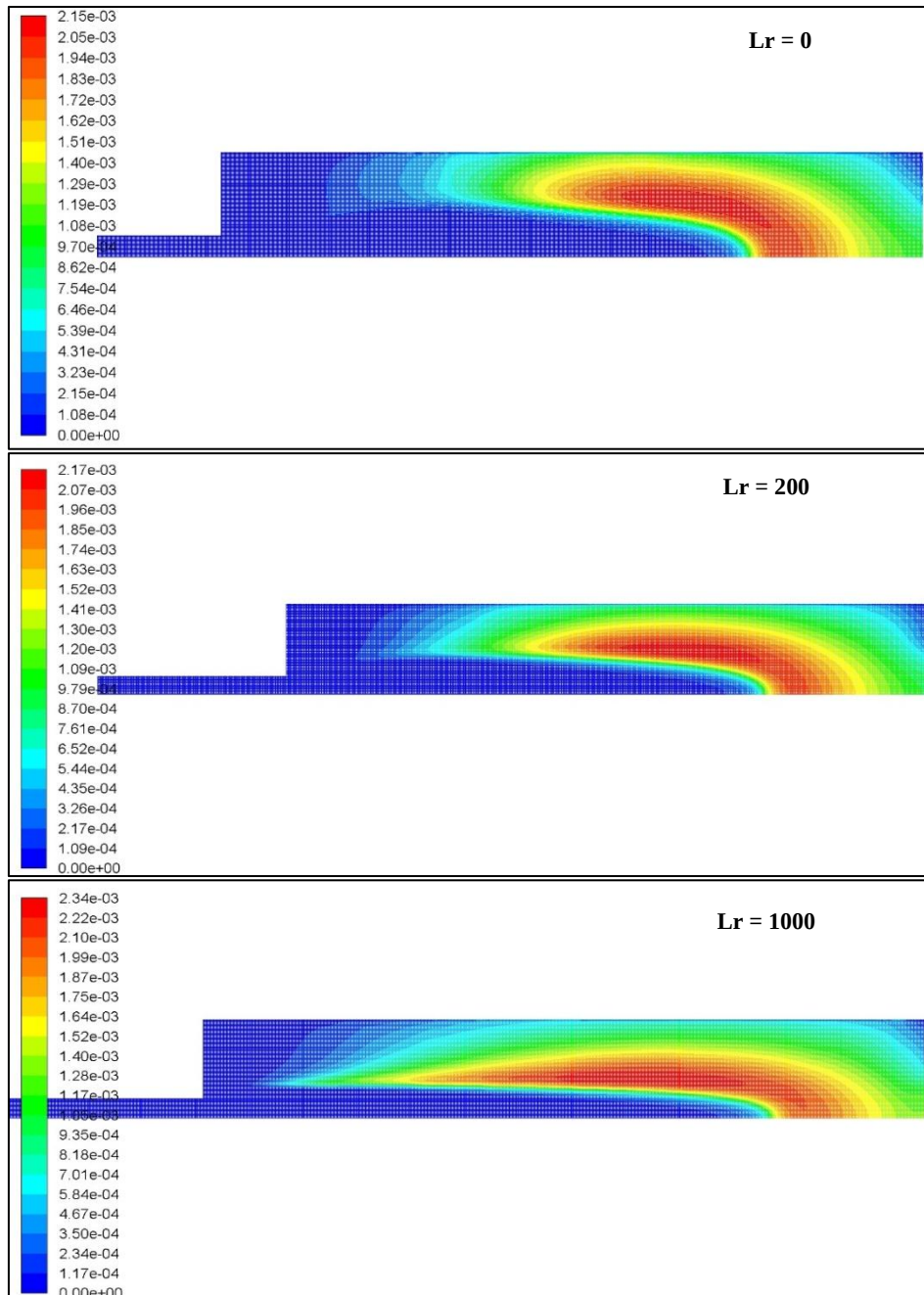


Figure 14- Comparison of contour of OH mass fraction at mass flow rate 0.164 kg/s and equivalence ratio 0.9 and different inhomogeneity length

شکل ۱۴- مقایسه کانتور کسر جرمی OH در دبی ۰/۱۶۴ کیلوگرم بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و طول ناهمگنی مختلف

با توجه به اینکه در طول ناهمگنی زیاد، تقریباً سوخت و هوا به طور کامل باهم مخلوط شده و نیازی به اختلاط بیشتر برای فرایند احتراق ندارند، به همین دلیل، هم شعله سریع تر تشکیل می شود و هم سطح ابتدایی شعله نوک تیز است. ولی، در طول ناهمگنی کم، سوخت و هوا پس از ورود به محفظه، ابتدا، در یک طول مشخص، باهم مخلوط می شوند. بنابراین، هم دیرتر به نسبت هم ارزی مورد نیاز برای اشتعال می رسند و هم سطح شعله تشکیل شده در ابتدا به صورت گنبدی است.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، با شبیه سازی محفظه احتراق، اثر طول ناهمگنی، دبی مخلوط سوخت و هوا و نسبت هم ارزی بر روی طول شعله بررسی شد. نتایج نشان داد که:

- میزان طول شعله در طول ناهمگنی مشخصی دارای یک حد پایین است، به طوری که در طول های ناهمگنی قبل و بعد از آن طول شعله افزایش پیدا می کند.
- طول ناهمگنی با کمینه طول شعله با تغییر دبی و تغییر نسبت هم ارزی متفاوت است. این طول در حالت های مختلف بررسی شده از ۱۵۰ میلی متر تا ۳۰۰ میلی متر به دست آمد.
- با توجه به نتایج، مشخص شد که در تمامی حالت های بررسی شده طول شعله در حالت کاملاً غیرپیش مخلوط کمتر از طول شعله در حالتی است که تقریباً مخلوط سوخت و هوا به صورت پیش مخلوط در محفظه مشتعل می شوند. ولی، هرچه نسبت هم ارزی کاهش پیدا کرد، اختلاف کمتر شد، به طوری که انتظار می رود در نسبت هم ارزی های کمتر طول شعله در حالت غیرپیش مخلوط بیشتر از حالت نزدیک پیش مخلوط شود.
- همچنین، نتایج نشان داد که تأثیر طول ناهمگنی در نسبت هم ارزی های غنی با رقیق متفاوت است.
- سطح مقطع شعله در داخل محفظه چه در جهت طولی و چه عرضی با تغییر طول ناهمگنی به طور آشکار تغییر می کند.

منابع

1. J. C. Barnes and A. M. Mellor, "Effects of unmixedness in piloted lean premixed gas-turbine combustors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, 1998, pp. 967-973.
2. T. W. Lee, M. Fenton and R. Shankland, "Effects of Variable Partial Premixing on Turbulent Jet Flame Structure," *Combustion and Flame*, Vol. 109, No. 4, 1997, pp. 536-548.
3. M. Mansour, "A Concentric Flow Conical Nozzle Burner for Highly Stabilized Partially Premixed Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 152, No. 1, 2000, pp. 115-145.
4. B. Renou, E. Samson and A. Boukhalfa, "An experimental study of freely propagating turbulent propane/air flames in stratified inhomogeneous mixtures," *Combustion Science and Technology*, Vol. 176, 2004, pp. 1867-1890.
5. F. Seffrin, F. Fuest, D. Geyer and A. Dreizler, "Flow field studies of a new series of turbulent premixed stratified flames," *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 384-396.
6. S. Meares, V. N. Prasad, G. Magnotti, R. S. Barlow and A. R. Masri, "Stabilization of piloted turbulent flames with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, 2015, pp. 1477-1484.
7. A. R. Masri, "Partial premixing and stratification in turbulent flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, 2015, pp. 1115-1136.
8. K. Kleinheinz, T. Kubis, P. Trisjono, M. Bode and H. Pitsch "Computational study of flame characteristics of a turbulent piloted jet burner with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, Issue 2, 2017, pp. 1747-1757.
9. B. A. Perry, M. E. Mueller and A. R. Masri "A two mixture fraction flamelet model for large eddy simulation of turbulent flames with inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, 2017, pp. 1767-1775.
10. T. F. Guiberti, M. Juddoo, D. A. Lacoste, M. J. Dunn, W. L. Roberts and A. R. Masri, "Fuel effects on the stability of turbulent flames with compositionally inhomogeneous inlets," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, 2017, pp. 1777-1784.
11. S. Galindo, F. Salehi, M. J. Cleary and A. R. Masri, "MMC-LES simulations of turbulent piloted flames with varying levels of inlet inhomogeneity," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, Issue 2, 2017, pp. 1759-1766.
12. M. S. Mansour, H. Pitsch, S. Kruse, M. F. Zayed, M. S. Senosy, M. Juddoo, J. Beeckmann and A. R. Masri, "A concentric flow slot burner for stabilizing turbulent partially premixed inhomogeneous flames of gaseous fuels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 91, 2018, pp. 214-229.

13. H. C. Cutcher, R. S. Barlow, G. Magnotti and A. R. Masri, "Turbulent flames with compositionally inhomogeneous inlets: Resolved measurements of scalar dissipation rates," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, Issue 2, 2017, pp. 1737-1745.
14. M. S. Mansour, H. Pitsch, S. Kruse, M. F. Zayed, M. S. Senosy, M. Juddoo, J. Beeckmann and A. R. Masri, "A concentric flow slot burner for stabilizing turbulent partially premixed inhomogeneous flames of gaseous fuels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 91, 2018, pp. 214-229.
15. N. Kim and Y. Kim, "Multi-environment probability density function approach for turbulent partially-premixed methane/air flame with inhomogeneous inlets," *Combustion and Flame*, Vol. 182, 2017, pp. 190-205.
16. W. Jin, S. A. Steinmetz, M. Juddoo, M. J. Dunn, Z. Huang and A. R. Masri, "Effects of shear inhomogeneities on the structure of turbulent premixed flames," *Combustion and Flame*, Vol. 208, 2019, pp. 63-78.
17. B. E. Van doormaal and G. D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, 1984, pp. 147.
18. K. Cheong, P. Li, F. Wang and J. Mi, "Emissions of NO and CO from counterflow combustion of CH₄ under MILD and oxyfuel conditions," *Energy*, Vol. 124, 2017, pp. 652-664.
19. R. S. Barlow, A. N. Karpetis and J. H. Frank, *Scalar Profiles and NO Formation in Laminar Opposed Flow Partially Premixed Methane/Air Flames*, Combustion Research Facility, Sandia National Laboratories, Livermore, CA 94551, USA, 2001.
20. http://combustion.berkeley.edu/Combustion_Laboratory/grimech, "Gri2.11 Chemistry and thermodynamic files," Accessed 25.02.2018.
21. D. Garréton and O. Simonin, "Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces," *ASCF Ercoftac CFD Workshop*, EDF Org, Chatou, France, 1994.
22. C. V. da Silva, H. A. Vielmo and F. H. R. Franca, "Numerical Simulation of the Combustion of Methane and Air in a Cylindrical Chamber," *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, 2005.
23. E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen and D. J. E. M. Roekaerts, "Role of entrainment in the stabilisation of jet-in-hot-coflow flames," *Combustion and Flame*, Vol. 158, 2011, pp. 1553-1563.
24. A. E. Oldenhof, P. Sathiah and D. Roekaerts, "Numerical Simulation of Delft-Jet-in-Hot-Coflow (DJHC) Flames using the Eddy Dissipation Concept Model for Turbulence-Chemistry Interaction," *Flow Turbulence Combust*, Vol. 87, 2011, pp. 537-567.
25. E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen and D. J. E. M. Roekaerts, "Ignition kernel formation and lift-off behaviour of jet-in-hot-coflow flames," *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 1167-1178.
26. H. Yang, Y. Feng, X. Wang, L. Jiang, D. Zhao, N. Hayashi, and H. Yamashita, "OH-PLIF investigation of wall effects on the flame quenching in a slit burner," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, 2013, pp. 3379-3386.

English Abstract

Numerical study of the effect of different levels of inhomogeneity on turbulent flame length in a combustion chamber

Seyed Mohammad Mahdi Sabet¹ and Seyed Abdolmahdi Hashemi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, smms_sabet@yahoo.com

2- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, hashemi@kashanu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2020.02.13., Received in revised form: 2020.04.15, Accepted: 2020.05.08)

Combustion of a mixture of inhomogeneity reactants is a type of combustion that has been used since 1997. All previous studies have been done on this type of outdoor combustion. The aim of this study was to investigate the numerical effect of different levels of inhomogeneity on the flame length at different velocities and equivalence ratios in closed space without the presence of ambient air and its influence on the flame. In this numerical study, the configuration modeling of Navier Stokes equations using Reynolds averaging method has been used. The results show that the flame length during a given inhomogeneity has a low limit so that the flame length increases before and after the inhomogeneity. This length of inhomogeneity varies at different velocities and equivalence ratios. The results also show that the flame length in the non-premixed state is less than the flame length when the fuel/air mixture is almost pre-mixed in the ignition chamber but as the equivalence ratio decreases, the difference is expected to be equal. The lower flame length values in the non-mixed state will be greater than the near-mixed state. Also, the cross-sectional area of the flame inside the chamber changes significantly both in length and width by changing the length of the inhomogeneity.

Keywords: Turbulent combustion, inhomogeneity, flame length, combustion chamber