

بررسی عملکرد مدل ریزشعله در شبیه‌سازی خاموشی شعله‌های نیمه‌پیش مخلوط

فاخته تقی‌شکرگذار^۱، محمد مهدی صالحی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، fakhte@shokrgozar@gmail.com
۲- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mmsalehi@sharif.edu

* نویسنده مخاطب

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی کارایی مدل ریزشعله آرام در شبیه‌سازی شعله‌های آشفته نیمه‌پیش مخلوط و خاموشی آن‌هاست. هندسه مورد نظر، یک مشعل جت آشفته پیلوت‌دار است که مقدار پیش مخلوط بودن شعله را می‌توان با کنترل کردن مقدار پس‌روی مجرای ورودی سوخت در داخل مجرای ورودی هوا کنترل کرد. این پیکربندی امکان بررسی پایداری شعله‌های پیش مخلوط، غیرپیش مخلوط و طیف وسیعی از شعله‌های نیمه‌پیش مخلوط را فراهم می‌کند. در این پژوهش با کمک روش خمینه ریزشعله در چهارچوب روش رینولدز-متوسط به شبیه‌سازی این شعله‌ی آشفته در مقادیر مختلف پس‌روی و با شرایط اولیه مختلف پرداخته و از نتایج برای بررسی دقت این مدل در مقابل نتایج تجربی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مرز خاموشی استفاده شده‌است. با مقایسه نتایج این پژوهش با مقادیر تجربی می‌توان مشاهده کرد که روش ریزشعله توانایی شبیه‌سازی مقدار بهینه‌ی پس‌روی و همچنین مشخصات جریان با دقت بالا را دارد، اما محدودی پایداری شعله را کمتر از مقدار واقعی و خاموشی را در سرعت‌های نسبی کمتری تخمین می‌زند.

کلمات کلیدی: روش خمینه ریزشعله، شعله نیمه‌پیش مخلوط، شعله‌ی جت آشفته پیلوت‌دار، پایداری شعله آشفته، شبیه‌سازی احتراق

مقدمه

با توجه به اهمیت احتراق در صنایع مختلف اعم از حمل و نقل، انرژی، نفت و گاز و ... و ضرورت حرکت به سمت حفظ محیط‌زیست، شبیه‌سازی عددی احتراق در مقابل آزمایش تجربی، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ی طراحی سامانه‌های مختلف احتراقی می‌شود. شعله‌ها با توجه به میزان اختلاط سوخت و اکسید به سه دسته پیش مخلوط، غیر پیش مخلوط و نیمه پیش مخلوط تقسیم‌بندی می‌شوند. در شعله‌های پیش مخلوط سوخت و اکسید قبل از احتراق کاملاً مخلوط می‌شوند. در شعله‌های غیر پیش مخلوط سوخت و اکسید از دو مجرای مختلف وارد محفظه احتراق شده و در حین مخلوط شدن واکنش می‌دهند. شعله‌های نیمه پیش مخلوط طیف وسیعی از شعله‌های بین پیش مخلوط و غیرپیش مخلوط را شامل می‌شوند که در آنها سوخت و اکسید قبل از واکنش تا حدودی مخلوط شده‌اند [۱]. شعله‌های پیش مخلوط و غیرپیش مخلوط طبیعتاً کم‌یاب و اغلب کاربرد آزمایشگاهی دارند و در اکثر کاربردهای واقعی، شعله‌ها به صورت نیمه‌پیش مخلوط تشکیل می‌شوند. از این جهت مطالعه و شبیه‌سازی دقیق این نوع شعله‌ها به نسبت اهمیت بیشتری دارد.

شبیه‌سازی احتراق آشفته با پیچیدگی‌های زیادی همراه است که منجر به ابداع روش‌های مختلف شبیه‌سازی در تلاش برای ساده‌سازی معادلات حاکم بر این پدیده شده‌است. برای بهره‌گیری از این روش‌ها و طراحی بر اساس آن‌ها، لازم است کاربرد، عملکرد و دقت آن‌ها در محیط‌های مختلف بررسی شود چرا که ساده‌سازی این معادلات به بهای نادیده گرفتن پدیده‌هایی است که ممکن است در یک مورد خاص، بسیار پراهمیت واقع شوند [۲].

مدل ریزشعله آرام^۱، روشی بهینه از لحاظ حجم محاسباتی است که این مزیت به دلیل پیش‌فرض آرام بودن محلی شعله در این روش است. در این روش یک میدان جریان آشفته با تجمع تعدادی از شعله‌های آرام یک‌بعدی - که اصطلاحاً ریزشعله نامیده می‌شوند - شبیه‌سازی می‌شود. مدل ریزشعله آرام بر اساس جداسازی معادلات انتقال از سینتیک دقیق شیمیایی است. و محاسبات لازم برای بدست آوردن شعله‌های آرام یک‌بعدی با استفاده از سینتیک شیمیایی دقیق انجام می‌شود. سپس مشخصات ترمو-شیمیایی اعم از دما، غلظت گونه‌های مختلف و غیره بر حسب پارامتری به نام کسر مخلوط که نمایانگر میزان اختلاط سوخت و اکسید است و متغیر پیشرفت واکنش در یک جدول^۲ ذخیره می‌شوند. برای حل میدان جریان واکنشی در یک شعله آرام با استفاده از این روش دو معادله انتقال برای متغیر پیشرفت واکنش^۳ و کسر مخلوط^۴ حل می‌شود و خصوصیات ترمو-شیمیایی از جدول بازیابی می‌شوند. در شعله‌های آشفته، جهت تخمین احتمال وقوع ریزشعله‌های مختلف در یک نقطه از میدان و استفاده از این جدول نیازمند مدل‌سازی تابع توزیع احتمال متغیر پیشرفت و کسر مخلوط است.

مدل‌های احتراقی مختلفی بر مبنای فرض ریزشعله آرام گسترش یافته‌اند و از معروف‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش خمینه تولیدی ریزشعله^۵ اشاره کرد. این روش برپایه‌ی برقراری پلی بین روش سینتیک کاهش یافته^۶ و مدل ریزشعله‌ی خطی است که قبلاً دو روش مستقل از هم شناخته می‌شدند [۴-۲]. این روش ابتدا برای شبیه‌سازی شعله‌های پیش مخلوط مورد استفاده قرار گرفت [۷-۵] و در ادامه برای شعله‌های غیرپیش مخلوط و نیمه پیش مخلوط نیز با موفقیت به کار گرفته شد [۱۳-۸].

در این پژوهش دقت روش خمینه تولیدی ریزشعله با بهره‌گیری از معادلات رینولدز-متوسط^۷ در پیکربندی مشعل دانشگاه سیدنی [۱۵، ۱۴] مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مشعل از سه لوله هم محور که به ترتیب برای سوخت، اکسید و پیلوت مورد استفاده قرار می‌گیرند، تشکیل شده‌است. ویژگی اصلی این مشعل امکان پس‌روی^۸ لوله‌ی جت سوخت داخل لوله‌ی جت هوا از ۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است که امکان بررسی محدوده‌ی وسیعی از درجات نیمه‌پیش مخلوط بودن را فراهم می‌کند. در صورت نبود پس‌روی (پس‌روی ۰ میلی‌متر)، شعله کاملاً غیرپیش مخلوط است و در صورت پس‌روی بیش از ۳۰۰ میلی‌متر، شعله‌ی تقریباً پیش مخلوط تشکیل می‌شود. آزمایشات تجربی نشان‌دهنده‌ی این است که پایداری شعله تابعی از مقدار پس‌روی یا مقدار همگونی مخلوط در ورودی محفظه است.

تحقیقات زیادی برای بررسی عملکرد روش‌های مختلف شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار شعله‌های این مشعل در سال‌های اخیر انجام شده‌است [۱۶-۲۲]. در این پژوهش‌ها عمدتاً یا از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۹ [۱۶-۲۲] و یا از مدل‌های احتراقی پیشرفته‌ای نظیر تابع توزیع احتمال انتقال یافته^{۱۰} [۲۲] استفاده شده‌است. هزینه محاسباتی هر یک از این

⁷ Reynolds-Averaged

⁸ Recess

⁹ Large Eddy Simulation (LES)

¹⁰ Transported PDF Model

¹ Laminar flamelet

² Look-up table

³ Progress variable transport equation

⁴ Mixture Fraction

⁵ Flamelet Generated Manifold (FGM)

⁶ Reduced chemistry

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{\zeta}^{\prime 2})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{\zeta}^{\prime 2}) & \quad (7) \\ & = \nabla \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \bar{\zeta}^{\prime 2} \right) \\ & + 2 \frac{\mu_t}{Sc_t} |\nabla \bar{\zeta}|^2 - \frac{\rho C_\varphi}{\tau_{turb}} \bar{\zeta}^{\prime 2} \end{aligned}$$

که k رسانایی گرمایی مخلوط و C_p ظرفیت گرمایی مخصوص مخلوط است. همچنین در معادلات ۵ و ۷، C_φ ثابت و برابر با ۲ است.

مقادیر جملات منبع معادلات ۶ و ۷ و همچنین مقدار متوسط گونه‌های مختلف با انتگرال گیری از جداول خمینه تولیدی ریزشعله به کمک یک تابع توزیع احتمال قابل محاسبه است. جداول مربوطه از حل معادلات یک شعله آرام یک بعدی بدست می‌آید.

احتمال مطابق معادله ۸ قابل محاسبه است و معادله ۹ نرخ هدر رفت را محاسبه می‌کند.

$$\bar{c}^{\prime\prime} \bar{\omega}_c = \int_0^1 (c^* - \bar{c}) \bar{\omega}_c^{FGM}(c^*) P(c^*) dc^* \quad (8)$$

$$\epsilon_c = \left(C_D \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} \right) \bar{c}^{\prime\prime 2} \quad (9)$$

معادلات فوق با استفاده از مکانیزم 3 GRI-Mech برای محاسبه نرخ تولید گونه‌ها حل می‌شوند.

معادلات یک‌بعدی شعله‌ی پیش‌مخلوط آدیاباتیک را می‌توان با کمک معادلات ۱۰ و ۱۱ از فضای فیزیکی به فضای پیشرفت واکنش انتقال داد.

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \frac{\partial Y_k}{\partial c} \bar{\omega}_c = \rho \chi_c \frac{\partial^2 Y_k}{\partial c^2} + \bar{\omega}_k \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial c} \bar{\omega}_c & = \rho \chi_c \frac{\partial^2 T}{\partial c^2} - \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \bar{\omega}_k \\ & + \frac{\rho \chi_c}{c_p} \left(\frac{\partial c_p}{\partial c} + \sum_k c_{p,k} \frac{\partial Y_k}{\partial c} \right) \frac{\partial T}{\partial c} \end{aligned} \quad (11)$$

در معادلات فوق Y_k ، نشان‌دهنده‌ی کمین کسر جرمی گونه‌ها، T ، دما، ρ ، چگالی سیال، t ، زمان، $\bar{\omega}_k$ ، کمین نرخ واکنش جرمی گونه‌ها، h_k ، آنتالپی توتال و C_p, k ، کمین گرمای ویژه‌ی گونه‌ها در فشار ثابت است.

در معادله ۱۲، با قرار دادن χ_{max} برابر با ۱۰۰۰ ساختار یک شعله پیش‌مخلوط یک‌بعدی بدون کرنش حاصل می‌شود. معادلات فوق برای مقادیر مختلف کسر مخلوط حل و نتایج در قالب جداول دو بعدی $Y_k^{FGM}(Y_c, \zeta)$ ارائه می‌شود.

$$\chi_c(c) = \chi_{max} \exp(-2(\text{erfc}^{-1}(2c))^2) \quad (12)$$

برای محاسبه مقادیر متوسط گونه‌ها و جملات منبع معادلات ۱۲ از یک تابع چگالی احتمال توأم^۳ از متغیرهای پیشرفت واکنش نرمال شده و کسر مخلوط $P(c^*, \zeta^*)$ استفاده می‌شود که متغیر پیشرفت واکنش نرمال شده از تقسیم کردن Y_c بر مقدار تعادلی آن بدست می‌آید. در نرم افزار فلونت تابع

روش‌ها بسیار بالاست و در نتیجه قابلیت استفاده از آن‌ها در بهینه‌سازی احتراق مشعل‌ها را محدود می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی دقت روش خمینه تولید ریزشعله در کنار یک مدل ساده رینولدز-متوسط برای شبیه‌سازی آشفستگی، به منظور پیش‌بینی محدوده پایداری طیف وسیعی از شعله‌ها از غیرپیش‌مخلوط تا کاملاً پیش‌مخلوط است. در این مقاله ابتدا تئوری روش خمینه ریزشعله و معادلات حاکم بر میدان جریان تشریح می‌شود. سپس نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی مقایسه شده و مورد بحث، بررسی و نتیجه‌گیری قرار می‌گیرد.

تئوری و معادلات حاکم

در این پژوهش، شبیه‌سازی دینامیک سیالات عددی جریان آشفته بر اساس مدل $k - \epsilon$ که یک نوع مدل رینولدز-متوسط است انجام شده است. در این روش علاوه بر معادلات حاکم بر جریان - اعم از معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله انرژی - برای محاسبه تخمینی از تنسور تنش رینولدز، دو معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی آشفستگی^۱ و نرخ هدررفت آن^۲ حل می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{k}) & \quad (1) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right) - \bar{\rho} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ & - \bar{\rho} \bar{\epsilon} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{\epsilon}) & \quad (2) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_j} \right) \\ & + C_{\epsilon 1} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} \bar{\rho} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\bar{\epsilon}^2}{\bar{k}} \end{aligned}$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \bar{\rho} \bar{k}^2}{\bar{\epsilon}} \quad (3)$$

در روش خمینه تولید ریزشعله علاوه بر معادلات حاکم بر جریان و معادلات آشفستگی، چهار معادله دیگر برای مقدار متوسط متغیر پیشرفت واکنش \bar{Y}_c ، کسر مخلوط ζ و واریانس‌های آنها حل می‌شود:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{Y}_c)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\rho} \bar{v} \bar{Y}_c) = \bar{\nabla} \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \bar{\nabla} \bar{Y}_c \right) + \bar{S}_{Y_c} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{Y}_c^{\prime 2})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\rho} \bar{v} \bar{Y}_c^{\prime 2}) & \quad (5) \\ & = \bar{\nabla} \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \bar{\nabla} \bar{Y}_c^{\prime 2} \right) \\ & + 2 \frac{\mu_t}{Sc_t} |\bar{\nabla} \bar{Y}_c|^2 - \frac{\rho C_\varphi}{\tau_{turb}} \bar{Y}_c^{\prime 2} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{\zeta})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\rho} \bar{v} \bar{\zeta}) = \bar{\nabla} \cdot \left(\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \bar{\nabla} \bar{\zeta} \right) \quad (6)$$

³ Joint Probability density function

¹ Turbulent kinetic energy (k)

² Rate of dissipation of turbulent kinetic energy (ε)

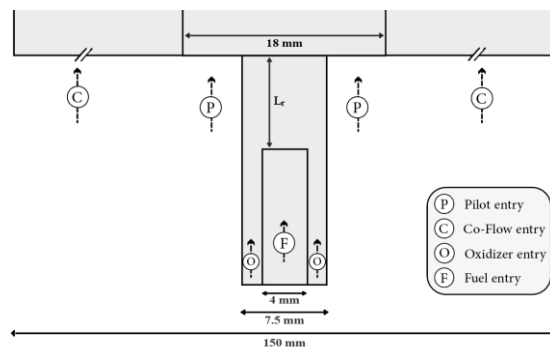
چگالی احتمال توأم با فرض عدم همبستگی آماری به صورت حاصل ضرب دو تابع توزیع احتمال $P(c^*)$ و $P(\zeta^*)$ مانند رابطه‌ی ۱۳ تنظیم شده است.

$$\bar{Y}_k = \int_0^1 \int_0^1 Y_k^{FGM}(c^*, \zeta^*) P(c^*) P(\zeta^*) dc^* d\zeta \quad (13)$$

تابع توزیع احتمال کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش در معادله فوق با فرض تابع چگالی احتمال بتا^۱ به کمک ممان‌های اول و دوم این تو متغیر که از روابط ۴ تا ۷ به دست آمده است، محاسبه می‌شود.

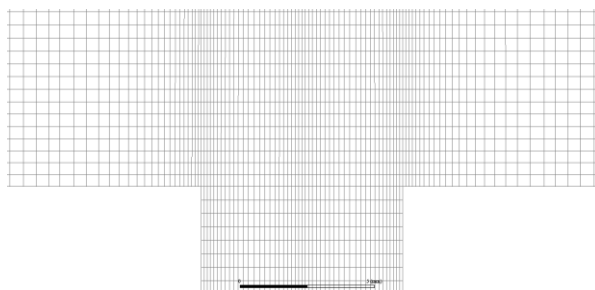
هندسه و شرایط مرزی

هندسه‌ی این پژوهش متشکل از دو استوانه‌ی هم‌مرکز است که از استوانه‌ی داخلی به قطر ۴ میلی‌متر سوخت و از استوانه‌ی بیرونی هوا به قطر ۷.۵ میلی‌متر اکسیژن و نیتروژن وارد می‌شود. در آزمایش تجربی استوانه‌ی سومی که نقش پایدارکننده را دارد (پیلوت) این دو استوانه را دربر گرفته است که قطر ورودی آن ۱۸ میلی‌متر است. در آزمایشات تجربی کل این مجموعه در تونل بادی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر قرار گرفته است که هوا از این طریق با سرعت ثابتی وارد محل آزمایش می‌شود. (شکل ۱)



شکل ۱: نمای مقطع هندسه

برای این پژوهش، پس‌رفت لوله‌ی ورودی سوخت در ۱۳ مرحله شبیه‌سازی شده است. از مقدار پس‌روی صفر میلی‌متر تا پس‌روی کامل ۳۰۰ میلی‌متر، به ازای هر ۲۵ میلی‌متر، یک هندسه و مش تولید شده است که چگالی و ساختار مش در تمام ۱۳ شبیه‌سازی ثابت مانده است. (شکل ۲ و ۳)



شکل ۲: نمایی نزدیک از شبکه در ورودی سوخت، هوا و پیلوت

شکل ۳: نمایی از کل شبکه در کیس پس‌روی ۷۵ میلی‌متری

تعداد شبکه با توجه به میزان پس‌رفت از ۳۳۶۰۰ تا ۴۸۰۰۰ متغیر است. در تنظیمات سیدنی پیلوت دارای ۳ نوع گاز هوا، هیدروژن و استیلین با دمای آدیاباتیک شعله ۲۴۸۰ کلوین است و از گاز طبیعی متراکم به عنوان سوخت استفاده می‌شود. در تنظیمات سندیا پیلوت ۲ گونه‌ی کربن‌دی‌اکسید و نیتروژن را علاوه بر گونه‌های سیدنی دارد. در این پژوهش شرایط اولیه و نتایج براساس تنظیمات سندیا و نتایج آن تنظیم شده است. پیلوت مورد مطالعه، با دمای تعادل آدیاباتیک مخلوط استوکیومتری متان/هوا (معادل ۲۲۲۶ کلوین) وارد محفظه می‌شود و از متان خالص به عنوان سوخت استفاده می‌شود که مطابق سندیا است [۲۲]. سرعت ورودی گازهای نسوخته به پیلوت ۳ متر بر ثانیه ذکر شده است که با توجه به چگالی تجربی مربوط به سوختن متان، سرعت ورود گازهای سوخته از پیلوت به داخل محفظه در این پژوهش ۲۲.۶ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. همچنین جریان هوای اطراف با سرعت ثابت ۱۵ متر بر ثانیه در شکل ۱ نشان داده شده است. تمام این چهار شرایط مرزی به صورت سرعت^۲، ورودی داده و خروجی انتهای هندسه با شرط مرزی فشار خروجی^۳ شبیه‌سازی می‌شود.

نتایج

برای اعتبارسنجی و بررسی عملکرد مدل ریزشعله، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. پروفیل‌های شعاعی (الف) و (ب) برای کیس با سرعت جت ۸۲ متر بر ثانیه و مقدار پس‌روی ۱۰۰ میلی‌متر و (ج) و (د) برای کیس با سرعت جت ۸۰ متر بر ثانیه و مقدار پس‌روی ۷۵ میلی‌متر موجود است.

در این شکل‌ها پروفیل‌های شعاعی نتایج تجربی و عددی برای سرعت محوری، سرعت شعاعی، کسر مخلوط و دما در مقاطع محوری مختلف در محفظه مقایسه شده است. شکل ۴ (الف) نشان می‌دهد که سرعت محوری با دقت قابل قبولی در این شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است. در عین حال نتایج عددی سرعت شعاعی که در شکل ۴ (ب) نشان داده شده، در فواصل محوری بالا تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با نتایج تجربی دارد. این مهم می‌تواند ناشی از به کارگیری یک مدل ساده رینولدز-متوسط در شبیه‌سازی میدان جریان باشد. نتایج بدست آمده برای پارامتر کسر مخلوط و دما در شکل ۴ (ج) و (د) با نتایج تجربی مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که اختلاط سوخت و اکسید در شبیه‌سازی‌ها به خوبی پیش‌بینی شده است. تطابق نتایج شبیه‌سازی دما با نتایج تجربی نشان‌دهنده‌ی این است که میزان آزادسازی انرژی در مدل ساده ریزشعله به خوبی تخمین زده شده است.

³ Pressure outlet

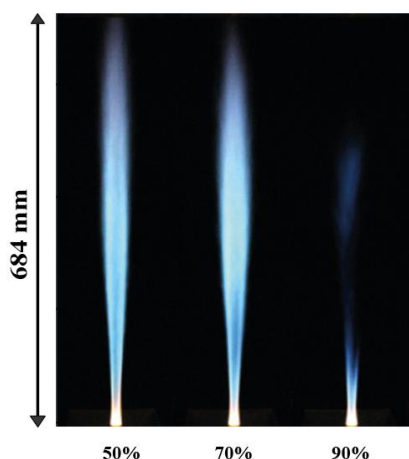
¹ β probability density function

² Velocity inlet

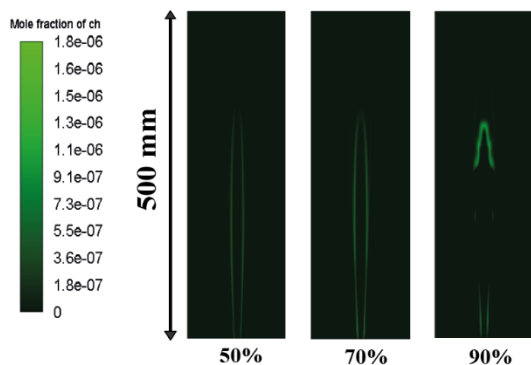
مقایسه طول شعله با نتایج تجربی

شعله‌ی ایجاد شده با این پیکربندی و هندسه در آزمایشات مختلفی به ثبت رسیده است. برای مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی با شعله‌ی واقعی از لحاظ طول شعله، از تصویر موجود در منبع [۱۴] استفاده شده است. با توجه به مقاله‌ی منبع [۲۳] برای تخمین طول شعله از لحاظ بصری برای شبیه‌سازی عددی از کسرمولی گونه‌ی رادیکال CH استفاده می‌شود که نورتایی شیمیایی^۱ دارد. البته در مقاله‌ی منبع ذکر شده تمرکز اصلی بر روی پیش‌بینی طول شعله‌ها است که ما در این پژوهش از روش‌های استفاده شده در این مقاله استفاده نمی‌کنیم و صرفاً با مقایسه‌ی مقدار کسر جرمی این گونه در میدان جریان با شعله‌ی تجربی، به مقایسه می‌پردازیم.

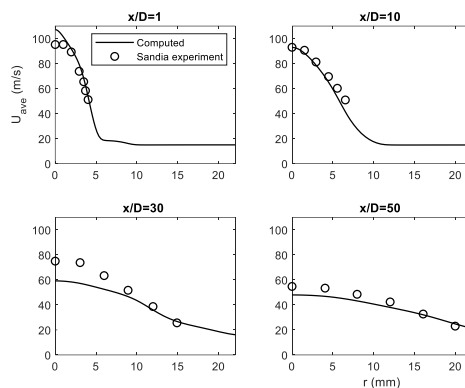
در شکل ۵ و ۶ که برای مقدار پس‌روی ۱۰۰ میلی‌متر است، شعله‌ی تجربی، نتایج شبیه‌سازی عددی برای کسرمولی گونه CH، در ۳ سرعت مختلف که ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد از سرعت خاموشی نشان داده شده است. رنگ آبی شعله متناظر با نورتایی شیمیایی گونه CH* است. کانتور حاصل از شبیه‌سازی این گونه در شکل ۶ نشان داده شده است. کاهش طول شعله با افزایش سرعت ورودی جت به صورت کیفی در شبیه‌سازی‌ها به درستی پیش‌بینی شده اما مقدار کمی طول شعله بر مبنای کانتور گونه CH کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است. بخشی از نورتایی شیمیایی شعله در نتایج تجربی که با رنگ بنفش نشان در ارتفاعات بالاتر شعله قابل مشاهده است، ناشی از گونه CO₂* است که در نتایج شبیه‌سازی موجود نیست.



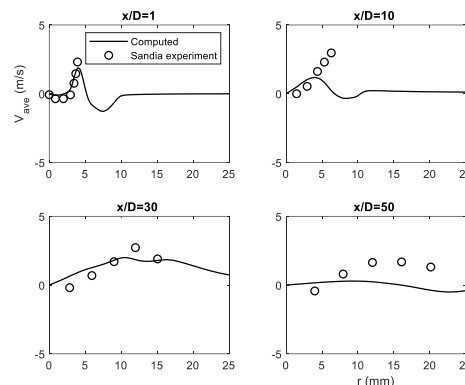
شکل ۵: تصویر عکاسی شده از شعله‌ها در پس‌روی ۱۰۰ در سه نسبت مختلف از سرعت خاموشی [۱۴]



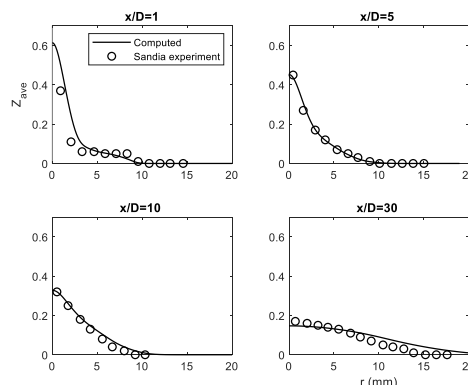
شکل ۶: نتایج این پژوهش برای پس‌روی ۱۰۰ میلی‌متر و در سه سرعت ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد سرعت خاموشی - کسر مولی CH



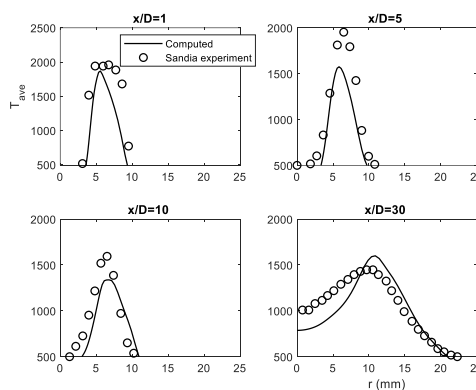
(الف)



(ب)



(ج)

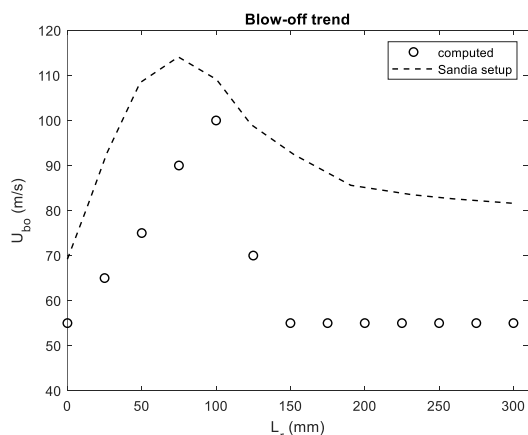


(د)

شکل ۴: (الف) مقایسه سرعت محوری و (ب) مقایسه سرعت شعاعی تجربی و محاسبه شده (L_r=100 mm, U_j=82 m/s) (ج) مقایسه کسر مخلوط و (د) مقایسه دما تجربی و محاسبه شده (L_r=75 mm, U_j=80 m/s)

¹ Chemiluminescence

یکی از اهداف این پژوهش، پیش‌بینی روند پایداری شعله‌ی مورد نظر با تغییر میزان پس‌روی است. شکل ۸ نشان می‌دهد که نتایج عددی روند خاموشی را به درستی پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۸: سرعت خاموشی شعله براساس میزان پس‌روی؛ مقایسه روند محاسبه‌شده در این پژوهش و نتایج تجربی

در پس‌روی صفر، یک شعله کاملاً غیر پیش‌مخلوط تشکیل می‌شود و بین جت سوخت و پایلوت یک لایه هوا وجود دارد. با افزایش مقدار پس‌روی، سوخت و هوا قبل از رسیدن به خروجی و تماس با پایلوت مخلوط می‌شوند، در نتیجه پایداری شعله افزایش قابل‌توجهی پیدا می‌کند که این روند در شبیه‌سازی‌های عددی نیز پیش‌بینی شده‌است. با افزایش پس‌روی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر محدوده پایداری کوچک‌تر خواهد شد؛ به بیان دیگر شعله در سرعت جت کمتری خاموش می‌شود. برای بررسی بیشتر علت این پدیده پروفیل شعاعی کسر مخلوط متوسط در خروجی لوله در شکل ۹ برای سه مقدار پس‌روی مختلف رسم شده‌است. این پروفیل‌ها از مرکز جت تا شعاع ۴ میلی‌متر ترسیم شده و محل شعاع پایلوت با یک خط عمودی مشخص شده‌است. محدوده خاکستری بیانگر کسر مخلوط اشتعال‌پذیر و خط چین افقی نمایانگر کسر مخلوط استوکیومتریک است. طبق انتظار با افزایش مقدار پس‌روی جت سوخت، مخلوط خروجی از جت در سرمشعل در نقطه تماس با پایلوت به تدریج در محدوده اشتعال‌پذیری قرار می‌گیرد. همین امر سبب افزایش پایداری شعله می‌شود. حداکثر پایداری در میزان پس‌روی حدود ۱۰۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد.

شکل ۹ نشان می‌دهد که در این شرایط مخلوط خروجی از جت در سرمشعل در نقطه تماس با پایلوت در نسبت هم‌ارزی استوکیومتری است. در نتیجه نرخ آزادسازی انرژی گرمایی در حداکثر مقدار ممکن است و در نتیجه پایداری افزایش پیدا می‌کند. با افزایش پس‌روی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر محدوده پایداری کاهش می‌یابد. این امر – همان‌گونه که در شکل ۹ برای پس‌روی ۱۵۰ میلی‌متر نشان داده شده‌است – ناشی از غنی از سوخت شدن مخلوط خروجی است.

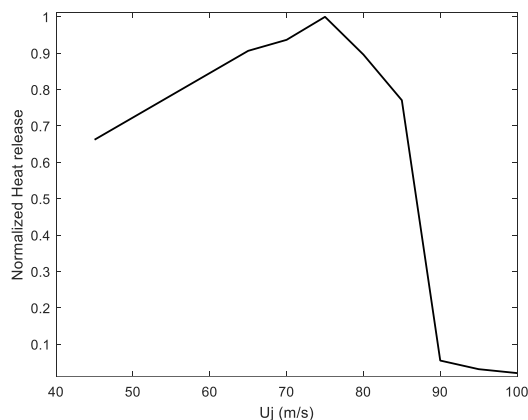
تطبیق نتایج شبیه‌سازی عددی با شعله‌ی بصری از لحاظ اینکه چه گونه‌هایی و با چه چگالی با دقت بسیار بالا تشکیل‌دهنده‌ی این شعله‌ی دیده‌شده با چشم یا دوربین هستند، پیچیده و دشوار است. از لحاظ تئوری گونه‌ی انتخاب شده نورتایی شیمیایی دارد و انتظار می‌رود در ایجاد بصری شعله تاثیر داشته باشد اما اینکه چه چگالی از کدام گونه‌ها قابل دیده‌شدن است در این پژوهش نمی‌گنجد. در خصوص پیش‌بینی روند تغییرات ساختار شعله می‌توان این شبیه‌سازی عددی را تحلیل کرد. در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که ضخامت شعله در ۷۰ درصد سرعت خاموشی بیشتر از حالت ۵۰ درصدی است و این موضوع در شعله‌ی عکس برداری شده شکل ۵ نیز قابل مشاهده است. در شکل ۶، در سرعت ۹۰ درصد خاموشی، شعله به وضوح در حال دور شدن و خاموش شدن است. همینطور مشاهده می‌شود که شعله از سر مشعل جدا شده‌است و کسر مولی CH پیوستگی خود را با ابتدای میدان جریان از دست داده‌است.

معیار خاموشی

در این شعله با افزایش سرعت جت ورودی، که از رابطه‌ی ۱۳ برآمده از هندسه محاسبه می‌شود، شعله ابتدا از سرمشعل جدا شده و سپس خاموش می‌شود:

$$U_j = \frac{U_F \times 4^2 + U_A \times (7.5^2 - 4^2)}{7.5^2} \quad (13)$$

تعیین مرز خاموشی با استفاده از پارامترهای مختلفی اعم از نرخ گرمای آزاد شده، دما و کسر جرمی رادیکال‌های CH و CO₂ در میدان قابل محاسبه است. در این پژوهش مقدار گرمای آزادشده در کل میدان محاسبه شده و بر حسب سرعت جت ورودی در نموداری مانند شکل ۷ ترسیم می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که در مرز خاموشی که گذار از سرعت ۸۵ متر بر ثانیه تا ۹۰ متر بر ثانیه است، مقدار گرمای آزادشده افت قابل توجهی دارد و در نتیجه، سرعت ۹۰ برای خاموشی در این کیس تخمین زده می‌شود. همانطور که ذکر شد، این عدد با مقایسه‌ی بصری مقدار دمای هر سلول و کسر مخلوط‌های مختلف در میدان جریان نیز قابل تایید است. بدین‌صورت با بررسی افت گرمای آزادشده در کل میدان برای هر کدام از ۱۳ حالت پس‌روی (از ۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) سرعت خاموشی این محاسبات عددی بدست آمده و در شکل ۸ به همراه نتایج تجربی نشان داده شده‌است.



شکل ۷: مقدار گرمای آزاد شده بکه‌شده با بیشینه در هر سرعت برای پس‌روی ۷۵ میلی‌متر

فهرست علائم

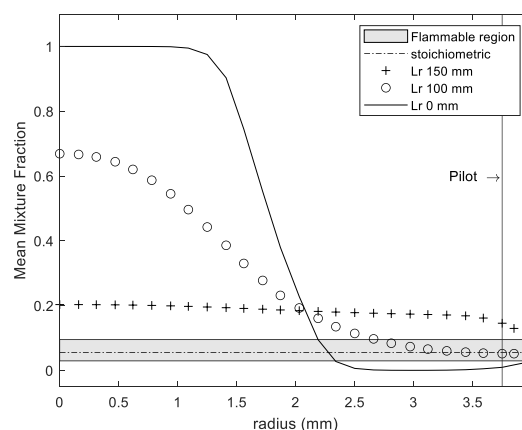
c^*	متغیر پیشرفت واکنش یکه شده، m^2
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK
\tilde{k}	متوسط انرژی جنبشی آشفته، $m^2.s^{-2}$
c_{φ}	ثابت معادلات واریانس‌ها
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	ثوابت معادله‌ی نرخ اتلاف آشفته‌گی کسر مخلوط
C_{μ}	ثابت رابطه‌ی ضریب لزجت
P	تابع چگالی احتمال
Sc_t	عدد اشتمیت آشفته‌گی
T	دما، K
u_i	میدان سرعت، m/s
Y_c	متغیر پیشرفت واکنش
\tilde{Y}_c	متوسط متغیر پیشرفت واکنش
Y_k	کمین کسر جرمی گونه

فهرست علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
μ_t	لزجت آشفته‌گی، $kg/m.s$
ζ	مقدار متوسط کسر مخلوط
$\tilde{\varepsilon}$	نرخ اتلاف آشفته‌گی، m^2/s^3
τ	پارامتر آزادسازی گرما
ω_k	کمین نرخ واکنش جرمی گونه

مراجع

- Turns S. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. Vol. 499, McGraw hills international editions. 2000. 1-676 p.
- Thierry Poinsot DV. Theoretical and Numerical Combustion, Second Edition. Vol. 38, Decision Support Systems. RT Edwards, Inc.; 2005. 557-573 p.
- van Oijen JA, Donini A, Bastiaans RJM, ten Thije Boonkkamp JHM, de Goey LPH. State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds. Prog Energy Combust Sci. 2016;57:30-74.
- Gicquel O, Darabiha N, Thévenin D. Laminar premixed hydrogen/air counterflow flame simulations using flame prolongation of ILDM with differential diffusion. Proc Combust Inst. 2000;28(2):1901-8.
- van Oijen JA, de Goey LPH. Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds. Combust Sci Technol. 2000;161(1):113-37.
- van Oijen JA, de Goey LPH. Modelling of premixed counterflow flames using the flamelet-generated manifold method. Combust Theory Model. 2002;6(3):463-78.
- Van Oijen JA, Lammers FA, De Goey LPH. Modeling of complex premixed burner systems by using flamelet-generated manifolds. Combust Flame. 2001;127(3):2124-34.
- Bongers H, Van Oijen JA, De Goey LPH. Intrinsic low-dimensional manifold method extended with diffusion. Proc Combust Inst. 2002;29(1):1371-8.
- Fiorina B, Gicquel O, Vervisch L, Carpentier S, Darabiha N. Approximating the chemical structure of partially premixed and diffusion counterflow flames using FPI flamelet tabulation. Combust Flame. 2005;140(3):147-60.



شکل ۹: پروفیل شعاعی کسر مخلوط متوسط در خروجی جت برای سه کسب مختلف با پس‌روی‌های متفاوت؛ در این شکل کسر مخلوط استوکیومتری با خط چین نشان داده شده و محدوده خاکستری بیانگر محدوده اشتعال‌پذیری است

شکل ۸ نشان می‌دهد که گرچه مدل استفاده شده در این پژوهش قابلیت پیش‌بینی روند خاموشی را دارد، اما محدوده‌ی پایداری را کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. این امر می‌تواند ناشی از محدودیت‌های مدل ریزشعله به کاررفته در این پژوهش باشد که بر مبنای شعله‌های پیش مخلوط در کسر مخلوط‌های مختلف بدست آمده‌است. در این مشعل ریزشعله‌های مختلفی اعم از پیش مخلوط، غیرپیش مخلوط، نیمه‌پیش مخلوط پشتیبان شده^۱ و ... وجود دارد. از مهم‌ترین این ساختارها، شعله نیمه پیش مخلوط پشتیبان شده است که مخلوط با نسبت هم‌ارزی کمتر از استوکیومتری یک در مجاورت مخلوط استوکیومتری یک قرار می‌گیرد و در نتیجه محدوده اشتعال‌پذیری آن افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد مدل خمینه ریزشعله در چهارچوب روش رینولدز-متوسط برای پیش‌بینی شعله‌ای نیمه پیش مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. مشعل مورد استفاده یک مشعل جت پایلوت دار است که با تغییر میزان پس‌روی لوله‌ی سوخت در لوله‌ی هوا قابلیت تشکیل شعله‌های مختلف نیمه‌پیش مخلوط را دارا می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای سرعت محوری، سرعت شعاعی، کسر مخلوط و دما در یک شعله پایدار با نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. در بخش دوم این پژوهش، برای ۱۳ مقدار پس‌روی متفاوت از ۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر، سرحد خاموشی پیش‌بینی و با نتایج تجربی مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل روند رابطه‌ی بین سرعت خاموشی و پس‌روی را به درستی تخمین می‌زند اما محدوده‌ی پایداری شعله را کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند.

¹ Supported-partially premixed flame

- 10- Delhay S, Somers LMT, van Oijen JA, de Goey LPH. Incorporating unsteady flow-effects in flamelet-generated manifolds. *Combust Flame*. 2008;155(1-2):133-44.
- 11- Ramaekers WJ. Development of flamelet generated manifolds for partially-premixed flame simulations. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven University of Technology; 2011.
- 12- van Oijen JA, de Goey LPH. A numerical study of confined triple flames using a flamelet-generated manifold. *Combust Theory Model*. 2004;8(1):141-63.
- 13- Verhoeven LM, Ramaekers WJS, van Oijen JA, De Goey LPH. Modeling non-premixed laminar co-flow flames using flamelet-generated manifolds. *Combust Flame*. 2012;159(1):230-41.
- 14- Kim N, Kim Y. Multi-environment probability density function approach for turbulent partially-premixed methane/air flames. 11th Asia-Pacific Conf Combust ASPACC 2017. 2017;2017-Decem.
- 15- Galindo S, Salehi F, Cleary MJ, Masri AR. MMC-LES simulations of turbulent piloted flames with varying levels of inlet inhomogeneity. *Proc Combust Inst*. 2017;36(2):1759-66.
- 16- Perry BA, Mueller ME, Masri AR. A two mixture fraction flamelet model for large eddy simulation of turbulent flames with inhomogeneous inlets. *Proc Combust Inst*. 2017;36(2):1767-75.
- 17- Perry BA, Mueller ME. Effect of multiscale subfilter PDF models in LES of turbulent flames with inhomogeneous inlets. *Proc Combust Inst*. 2019;37(2):2287-95.
- 18- Chen ZX, Langella I, Barlow RS, Swaminathan N. Prediction of local extinctions in piloted jet flames with inhomogeneous inlets using unstrained flamelets. *Combust Flame*. 2020;212:415-32.
- 19- Hansinger M, Ge Y, Pfitzner M. Deep Residual Networks for Flamelet/progress Variable Tabulation with Application to a Piloted Flame with Inhomogeneous Inlet. *Combust Sci Technol*. 2020;
- 20- Kleinheinz K, Kubis T, Trisjono P, Bode M, Pitsch H. Computational study of flame characteristics of a turbulent piloted jet burner with inhomogeneous inlets. *Proc Combust Inst*. 2017;36(2):1747-57.
- 21- Meares S, Masri AR. A modified piloted burner for stabilizing turbulent flames of inhomogeneous mixtures. *Combust Flame*. 2014;161(2):484-95.
- 22- Meares S, Prasad VN, Magnotti G, Barlow RS, Masri AR. Stabilization of piloted turbulent flames with inhomogeneous inlets. *Proc Combust Inst*. 2015;35(2):1477-84.
- 23- Xi Z, Fu Z, Hu X, Sabir SW, Jiang Y. An investigation on flame shape and size for a high-pressure turbulent non-premixed swirl combustion. *Energies*. 2018;11(4):1-20.