

شبیه‌سازی عددی شعله‌های آشفته پیش‌مخلوط با روش ریزشعله کرنش‌یافته

امیرحسین فشامیها^۱، احسان رسولی اسکویی^۲، محمدمهدی صالحی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، a.fashamiha97@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ehsanrasoulioskui2000@gmail.com

۳- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mmsalehi@sharif.edu

*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸)

چکیده: شبیه‌سازی عددی شعله‌های آشفته با روش ریزشعله آرام در شرایط شدت آشفستگی بالا به سادگی میسر نیست. نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی مستقیم نشان می‌دهد که وارد کردن اثرات کرنش در تولید جداول ریزشعله‌ها می‌تواند دقت مدل‌سازی را به صورت قابل توجهی افزایش دهد. به طوری که در این پژوهش با اعمال اثرات کرنش طول شعله نسبت به حالت بدون کرنش افزایش ۳۰ میلی‌متری دارد. در این پژوهش روش ریزشعله آرام کرنش یافته در شبیه‌سازی شعله‌های آشفته پیش‌مخلوط پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تولید جداول ریزشعله‌ها از شعله جریان متقابل پیش‌مخلوط استفاده شده است. این جداول با استفاده از دو متغیر پیشرفت واکنش و روش تابع توزیع احتمال پیش‌فرض در حلگر دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل بدست آمده در این پژوهش برای شبیه‌سازی رینولدز-متوسط شعله آشفته یک مشعل بنزن پیلودار مورد استفاده قرار گرفته است. این مشعل از رویکرد نوینی جهت افزایش شدت آشفستگی ورودی بهره می‌برد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش ریزشعله آرام کرنش یافته در مقایسه با ریزشعله کرنش نیافته سرعت انتشار شعله و در نتیجه طول شعله را به مقدار قابل توجهی بهتر پیش‌بینی می‌کند.

کلیدواژگان: احتراق، آشفستگی، شعله پیش‌مخلوط، مدل ریزشعله آرام، نرخ کرنش

مقدمه

در جهان امروزی، تلاش می‌شود تا سامانه‌های احتراقی موجود به گونه‌ای طراحی شوند که آلاینده‌های زیست محیطی آن تا حد ممکن کاهش یابد. با توجه به پرهزینه بودن بررسی‌های تجربی، روش‌های عددی بیشتر مورد استفاده قرار خواهند گرفت. همچنین، شبیه‌سازی مسائل احتراق و آشفستگی به کاربر اطلاعات دقیقی درباره فیزیک جریان سیال ارائه می‌دهد. توسعه روش‌های شبیه‌سازی شعله‌های آشفته می‌تواند هزینه‌های روش‌های تجربی در این راستا را کاهش داده و در جهت ارائه ایده‌های مهندسی برای داشتن محیطی پاک کمک‌کننده باشد.

فیزیک جریان سیال در عمده سامانه‌های احتراقی آشفته است. ادغام پیچیدگی‌های یک جریان آشفته با پدیده احتراق چالش‌های مدل‌سازی آن را دو چندان می‌کند. دقیق‌ترین روش برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته واکنشی استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم^۱ است. در این روش برای مشاهده اثرات آشفستگی و تقابل بین احتراق و آشفستگی هیچ‌گونه مدل‌سازی به کار گرفته نمی‌شود ولی در این پژوهش جهت جلوگیری از کاهش هزینه‌های محاسباتی و نیاز نبودن به مشاهده تمام ساختارهای آشفستگی از معادلات رینولدز-متوسط^۲ برای مدل‌سازی جریان احتراقی استفاده می‌شود. چالش اصلی در این

¹ Direct Numerical Simulation (DNS)

² Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

شبیه‌سازی‌ها مدل‌سازی نرخ میانگین واکنش گونه‌های شیمیایی و اثرات متقابل احتراق و آشفته‌گی است. ترکیب معادلات سینتیک شیمیایی^۱ و مدل‌سازی آشفته‌گی در احتراق با رویکردهای مختلفی امکان‌پذیر است [۱]. می‌توان گفت ترکیب معادلات مربوط به سینتیک شیمیایی و رویکرد شبیه‌سازی عددی رینولدز متوسط با در نظر داشتن اندرکنش احتراقی به سه دسته تقسیم می‌شوند: رویکردهای هندسی، اختلاطی و آماری [۲]. مدل‌های معادله جی^۲ [۳] فیلتر کردن شعله‌های آرام^۳ [۴] و ضخیم‌سازی مصنوعی شعله^۴ از روش‌های هندسی هستند. هدف اصلی روش‌های هندسی مدل‌سازی دقیق انتشار جبهه شعله است. روش شکست گردابه که توسط اسپالدینگ در سال ۱۹۷۱ معرفی شد، یک روش اختلاطی است [۵]. در روش اختلاطی نرخ واکنش شیمیایی برابر با نرخ مخلوط شدن گونه‌ها در نظر گرفته می‌شود. مدل ریزشعله جزو دسته روش‌های آماری است. یکی از بهینه‌ترین رویکردهای مدل‌سازی احتراق، استفاده از فرض ریزشعله آرام^۵ است. در این رویکرد فرض می‌شود که شعله به صورت محلی آرام است و جریان آشفته این شعله‌های آرام را پراکنده کرده و به صورت محلی باعث کرنش^۶ آنها می‌شود.

استفاده از فرض ریزشعله در ابتدا توسط دامکوهلر پیشنهاد شد [۶]. محاسبات ریزشعله آرام پیش‌مخلوط احتراق آشفته در یک کانال بسته توسط کانت و همکاران به کار رفت [۷]. مدل‌های نفوذ ریزشعله آرام در احتراق آشفته غیر پیش‌مخلوط توسط پیترز بیان شد [۸]. پیچ و همکاران مدل ریزشعله ناپایدار در شبیه‌سازی عددی شعله متلاطم، رقیق شده با نیتروژن-هیدروژن- هوا استفاده کردند [۹]. در این کار اثرات ناپایی نرخ کرنش را روی ریزشعله‌ها مدل‌سازی و کمی‌سازی کردند. در ادامه پیرس و همکاران رویکرد متغیر پیشرفت واکنش را برای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۷ شعله‌ی نفوذی آشفته استفاده کردند [۱۰]. در این کار به جای حل معادلات انتقال برای همه گونه‌ها در یک مکانیزم شیمیایی معمولی و مدل‌سازی عبارتهای چشمه شیمیایی بسته نشده، از یک رویکرد نقشه‌ای^۸ غیرمستقیم استفاده کردند که به موجب آن تمام فرآیندهای شیمیایی دقیق به یک سیستم کاهش یافته از اسکالره‌های ردیابی نگاشت می‌شوند.

اولین استفاده از جداول ریزشعله در جریان آشفته به پژوهش بردلی و همکاران برمی‌گردد [۱۱]. بردلی و همکاران بر اساس مدل میانگین‌گیری رینولدز و مدل آشفته کی-ا پسین^۹ بر اساس تابع چگالی احتمال نقطه‌ای^۱ و ساختار سینتیک شیمیایی شعله آرام به مدل‌سازی شعله آشفته پیش‌مخلوط متان و پروپان- هوا پرداختند. این روش سپس توسط ژیکل و همکاران [۱۲] و همچنین فان‌اوین و دگوی [۱۳] جهت به کارگیری سینتیک شیمیایی دقیق در شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی توسعه پیدا کرد. در این روش شعله پیش‌مخلوط آرام بدون کرنش با استفاده از سینتیک شیمیایی دقیق حل می‌شود و نتایج بر حسب یک متغیر پیشرفت جدول‌بندی می‌شود. این روش اخیراً توسط صالحی و عطائی‌زاده [۱۴] برای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شعله پشت جسم مانع مورد استفاده قرار گرفته است. فیورینا و همکاران [۱۵] مدل ریزشعله بدون کرنش آرام را با استفاده از دو متغیر کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش^{۱۱}، به مدل‌سازی شعله نیمه‌پیش‌مخلوط توسعه دادند.

برخلاف شعله‌های غیرپیش‌مخلوط، شعله‌های پیش‌مخلوط حساسیت کمتری به نرخ کرنش هیدرودینامیک دارند و اثرات نرخ کرنش بر روی ساختار ریزشعله‌ها فقط در شدت آشفته‌گی‌های بالا اهمیت دارد. نودسن و همکاران [۱۶] برای شبیه‌سازی با روش گردابه‌های بزرگ در شعله‌هایی با عدد کارلوویتز^{۱۲} بالا مدل ریزشعله کرنش‌یافته را ارائه دادند. در این روش برای

¹ Chemical kinetic

² Level set or "G-equation" formalism

³ Filtering laminar flames

⁴ Artificially thickened Flame model

⁵ Laminar flamelet model

⁶ Strain

⁷ Large eddy simulation

⁸ Mapping

⁹ K-epsilon

¹⁰ One point probability density function

¹¹ Progress variable

¹² Karlovitz

شعله‌های پیش‌مخلوط، جدول کتابخانه‌ای بر حسب متغیر پیشرفت و کسر جرمی رادیکال هیدروژن تهیه می‌شود. تانگ و رامان [۱۷] به تازگی مدل ریزشعله کرنش‌یافته برای مطالعه شعله غیرآدیاباتیک تحت کرنش بر اساس شعله جریان متقابل را توسعه داده اند؛ در کار دیگر نیز شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در شعله مشعل کمبریک-سندیا^۱ با در نظر گرفتن عدد لوییس^۲ غیر واحد و تحت کرنش توسط ژانگ و همکاران [۱۸] صورت گرفته است. لانگلا و همکاران ریزشعله کرنش‌یافته و کرنش‌نیافته را برای احتراق پیش‌مخلوط با روش گردابه‌های بزرگ در مشعل بانسن با مخلوط سوخت و هوا به کار برده‌اند [۱۹]. مدل‌سازی برهم‌کنش آشفستگی و اندرکنش شیمیایی در شعله‌های هیدروژن پیش‌مخلوط با مدل شعله‌های کرنش‌یافته بر اساس داده‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم توسط تریسجونو و همکاران بررسی شده‌اند [۲۰]. یک روش ترکیب فضایی مستقل برای شعله‌های پیش‌مخلوط صاف و دارای انحنا کرنش یافته توسط شولتیسک معرفی شد [۲۱]. از دیگر پژوهش‌های انجام شده جهت استفاده از ریزشعله‌های کرنش یافته می‌توان به پژوهش کولا و سوامینیتان اشاره کرد که برای جدول‌بندی ریزشعله‌های کرنش یافته علاوه بر متغیر پیشرفت واکنش از نرخ اضمحلال آن نیز استفاده شده است [۲۲]. روش‌های دیگری نیز برای مدل‌سازی شعله‌های آشفته پیش‌مخلوط وجود دارد. از این روش‌ها می‌توان به روش چگالی سطح شعله، معادله جی و روش بری-ماس-لیبی اشاره کرد [۲۳].

هدف از این پژوهش پیاده‌سازی مدل نودسن و همکاران است. این مدل در نرم‌افزار انسیس - فلوئنت^۳ موجود نمی‌باشد و نیز نرم‌افزار به صورت متن‌باز نبوده و پیاده‌سازی روش ریزشعله آرام کرنش یافته در این نرم‌افزار، گلوگاه اصلی این پژوهش است. برای پیاده‌سازی این روش در فلوئنت از قابلیت توابع تعریفی کاربر^۴ استفاده می‌شود و بنابراین مدل احتراقی ریزشعله آرام در نرم‌افزار اعمال شده و تأثیر کرنش بر ساختار شعله از این طریق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جهت سنجش کاربرد و برتری مدل ریزشعله آرام نسبت به مدل‌های مشابه، می‌توان به نتایج برآمده از مرجع [۲۴] اشاره کرد. در ادامه به بررسی تئوری و معادلات حاکم بر جریان، فرض ریزشعله آرام، مدل‌سازی صورت گرفته و نتایج حاصل پرداخته می‌شود.

¹ Sandia

² Lewis

³ Ansys fluent

⁴ User-Defined Functions (UDF)

معادلات حاکم

فیزیک پدیده‌های جریان سیال با در نظر گرفتن فرض پیوستگی، به مدل ریاضی تبدیل می‌شود و در این مدل‌سازی فرض‌هایی نیز بر مسئله اعمال خواهد شد، احتراق یا سوختن نتیجه‌ی یک فرایند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه است. آزاد کردن گرما می‌تواند با تولید نور به صورت شعله یا تشعشع همراه باشد. به‌طور کلی یک جریان احتراقی ترکیبی از فیزیک‌های مختلف نظیر سینتیک شیمیایی، انتقال حرارت و آشفستگی است. برهمکنش سینتیک شیمیایی و آشفستگی نیز از چالش‌های اصلی جریان‌های احتراقی است زیرا سینتیک شیمیایی طیف وسیعی از مقیاس‌های زمانی را شامل می‌شود و این در مقایسه با مقیاس زمانی آشفستگی متفاوت است. رویکرد این پژوهش در شبیه‌سازی عددی معادلات استفاده از رویکرد رینولدز - متوسط است. در این رویکرد کمیت‌های جریان به دو بخش متوسط و نوسانی تقسیم می‌شود و با تبدیل تمام متغیرها به این صورت عملیات متوسط‌گیری از معادلات حاکم انجام می‌شود. در این فرآیند عبارت‌های جدیدی در معادلات اضافه می‌شود که تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات خواهد شد. رفع این مشکل نیازمند مدل‌سازی فیزیکی است.

هنگامی که از میانگین‌گیری رینولدز در معادلات استفاده می‌شود، عبارت‌های همبستگی^۱ نوسان‌های چگالی و دیگر پارامترهای میدان نیز به معادلات اضافه می‌شوند. برای جلوگیری از مشکلات ناشی از مدل‌سازی این عبارت‌ها، از روش میانگین‌گیری وزنی چگالی مبنا^۲ استفاده می‌شود. معادلات حاکم برای جریان احتراقی با استفاده از روش میانگین‌گیری چگالی مبنا به صورت زیر است:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای تکانه:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u''_j u''_i}) + \bar{\rho} g_i \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{h}) - \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^K \bar{\rho} D_k h_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} - \overline{\rho u''_j h''}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \tau_{ij}}) + \bar{S}_E \quad (3)$$

معادله بقای گونه‌ها:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{V_{k,j} Y_k} + \bar{\rho} u''_j Y''_k) + \bar{\omega}_k \quad (4)$$

در معادله (۳)، h آنتالپی کل سیال و q_j نرخ انتقال انرژی حرارتی مولکولی است و S_E بیانگر عبارت منبع معادله بقای انرژی است. در تمام معادله‌های بالا، ρ چگالی، u_j بردار سرعت، P فشار استاتیکی و τ_{ij} تانسور تنش لزجت است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، μ لزجت دینامیکی و δ_{ij} بیانگر دلتای کرانکر^۳ است. همچنین λ ضریب رسانش گرمایی، D_k ضریب پخش مولکولی گونه k ام و h_k آنتالپی گونه k ام است و آنتالپی کل مخلوط احتراقی و آنتالپی ویژه هرگونه به ترتیب با روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

¹ Correlation terms

² Density-Weighted averaging (Favre-averaging)

³ Kronecker delta

$$h = \sum_{k=1}^K Y_k h_k \quad (6)$$

$$h_k = \Delta h_{f,k}^0 + \int_{T_0}^T c_{P,k} dT \quad (7)$$

در این روابط c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و Y_k کسر جرمی گونه k ام است. نرخ تولید گونه‌ها ($\dot{\omega}_k$) عبارت بسته‌ای^۱ است که به واسطه غیرخطی بودن آن و میانگین‌گیری از معادله بقای گونه‌ها ظاهر می‌شود. نرخ واکنش شیمیایی در حالت کلی به کسر جرمی گونه‌ها، دما و چگالی به صورت غیرخطی وابسته است. در نتیجه نمی‌توان متوسط نرخ تولید گونه‌ها را با استفاده از مقدار متوسط کسر جرمی، دما و چگالی حساب کرد. بنابراین برای بستن معادلات جریان، نیاز به مدل‌سازی عبارت بسته منبع نرخ واکنش شیمیایی برای هر گونه است.

برای مدل‌سازی آشفته‌گی که ناشی از عبارت $\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u''_j u''_i)$ در معادله تکانه است، از روش کی - اپسیلون استاندارد استفاده می‌شود. در این روش دو معادله انتقال برای k و ε حل می‌شود. مقدار ثابت $C_{\varepsilon 1}$ در این مدل بسته به نوع جریان آشفته می‌تواند متفاوت باشد. در جریان جت صفحه‌ای^۲ این مقدار برابر با ۱/۴۴ است. اما در جریان جت تقارن محوری^۳ این مقدار تا ۱/۶ افزایش می‌یابد. در بخش نتایج این پژوهش، آنالیز حساسیت نسبت به این پارامتر انجام شده است.

مدل‌سازی احتراق

در روش ریزشعله آرام برای مدل‌سازی اثرات کرنش از شعله ساده جریان متقابل آرام^۴ استفاده می‌شود. در این شعله که به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است، مواد اولیه به صورت پیش‌مخلوط از یک طرف و محصولات احتراق در همان نسبت هم‌ارزی از سمت دیگر وارد می‌شوند. در نتیجه با ایجاد گرادیان سرعت در جهت عمود بر جریان، شعله کشیده می‌شود. برای ایجاد گرادیان سرعت مقادیر دبی ورودی مواد اولیه و محصولات تغییر داده می‌شوند. معادلات حاکم بر این شعله در کد کنترال^۵ پیاده‌سازی شده است. با استفاده از این کد حل انجام‌شده و مقادیر غلظت‌های گونه‌ها به دست می‌آید.

¹ Unclosed term

² Plane jet

³ Axi-Symmetric round jet

⁴ Laminar counter flow flame

⁵ Cantera

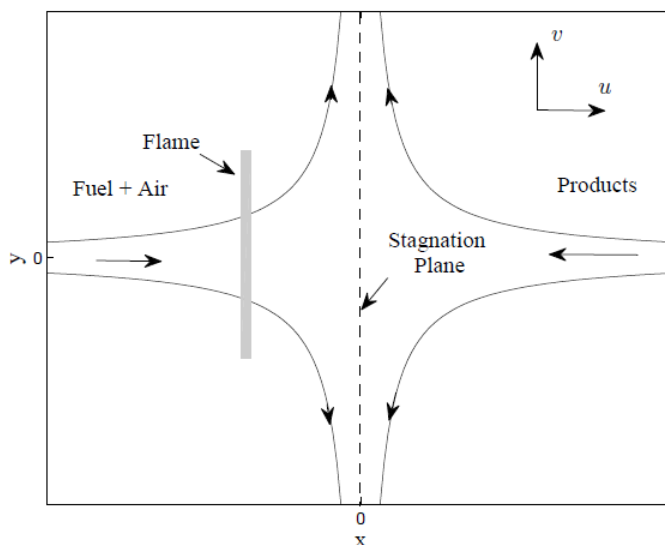


Figure 1- Schematic of the laminar counter flow flame in reactant-to-product configuration[25]

شکل ۱ - شماتیک شعله جریان متقابل آرام در ساختار مواد اولیه به محصولات احتراق [25]

در فرض ریزشعله آرام، شعله به صورت محلی آرام در نظر گرفته می شود. نسخه پیاده شده این روش در نرم افزار فلونت، تنها با یک نرخ کرنش کلی لحاظ می شود. در واقعیت بسته به نقاط مختلف میدان جریان، مقدار کرنش به صورت محلی متفاوت خواهد بود. برای حل این مشکل از روش ریزشعله آرام کرنش یافته استفاده می شود. در این روش متغیرهای کنترلی به صورت مستقل انتخاب می شوند که عبارت اند از: متغیر نرخ کرنش و متغیر پیشرفت واکنش. با اعمال تابع توزیع احتمال برای متغیر پیشرفت واکنش، مقادیر متوسط هر کمیت محاسبه می شود. در نرم افزار فلونت یک معادله انتقال برای متغیر پیشرفت و یک معادله انتقال دیگر برای متغیر دیگری که نماینده تغییر کرنش است حل می شود. با به دست آمدن مقدار این متغیر و مقایسه با مقادیر جدول، نرخ کرنش متوسط شعله در هر نقطه از میدان جریان مشخص می شود.

برای محاسبه تابع توزیع احتمال برای متغیر پیشرفت واکنش، نیاز به مقدار ممان اول (متوسط) و ممان دوم (واریانس) آن کمیت است. متغیر پیشرفت برای شعله مورد نظر به صورت ترکیب خطی گونه های زیر تعریف شده است:

$$Y_c = Y_{CO_2} + Y_{CO} \quad (8)$$

برای متوسط متغیر پیشرفت واکنش و واریانس متغیر دو معادله انتقال را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{Y}_c}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \bar{Y}_c) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} D_{eff} \frac{\partial \bar{Y}_c}{\partial x_i} \right) + \bar{S}_c \quad (9)$$

$$\left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{Y}_c'^2}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \bar{Y}_c'^2) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} D_{eff} \frac{\partial \bar{Y}_c'^2}{\partial x_i} \right) + c_\varphi D_{eff} |\nabla \bar{Y}_c|^2 - \bar{\rho} \tilde{\chi} + 2\bar{\rho} (\bar{Y}_c \bar{\omega}_{Y_c} - \bar{Y}_c' \bar{\omega}_{Y_c}') \quad (10)$$

$$D_{eff} = \bar{D} + D_t = \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad (11)$$

$$\tilde{\chi} = \frac{c_\varphi}{\tau_{turb}} \bar{Y}_c'^2 \quad (12)$$

در معادله (۱۰) $\tilde{\chi}$ نرخ اضمحلال اسکالر است که با مدل ساده اختلاط خطی معادله (۱۲) مدل شده است. در این مدل τ_{turb} مقیاس زمانی اختلاط^۲ است که از نسبت k/ε بدست می آید. همچنین c_φ یک عدد ثابت است که برابر با ۲ فرض

¹ Variance

می‌شود. در معادله (۱۱) عبارت \bar{D} بیانگر ضریب پخش مولکولی و عبارت D_t بیانگر ضریب پخش آشفتگی است و به صورت رابطه (۱۴) در UDF محاسبه می‌شوند. در معادله (۱۱)، μ لزجت مولکولی، μ_t لزجت آشفتگی، Sc و Sc_t به ترتیب عدد اشمیت جریان آرام و آشفته هستند.

در این پژوهش، از تابع توزیع احتمال ریزشعله آرام اصلاح‌یافته جین و همکاران [۲۶] استفاده می‌شود. با پیش‌فرض کردن تابع توزیع احتمال دلتا^۳ برای متغیر نرخ کرنش و تابع توزیع احتمال مرجع برای متغیر پیشرفت واکنش حل در نرخ کرنش‌های مختلف صورت می‌گیرد و جدول مراجعه‌ای تهیه می‌شود. پس از تهیه جدول مراجعه‌ای، برای کسر جرمی یک گونه خاص یا ترکیب خطی از گونه‌های مختلف، معادله انتقال حل می‌شود. مقدار حاصل از این معادله انتقال با مقادیر کسر جرمی جدول مراجعه‌ای مقایسه شده و نرخ کرنش شعله در هر نقطه از میدان جریان مشخص می‌شود. اگر در هر سلول محاسباتی، نرخ کرنش به درستی حساب شود، مقادیر کمیت‌های ترموشیمیایی از جدول مراجعه‌ای برای همان نرخ کرنش فراخوانی می‌شود و اثر نرخ کرنش‌های متفاوت در شعله اعمال می‌شود.

انتخاب گونه مناسب نماینده کرنش برای حل معادله انتقال بسیار حائز اهمیت است. معیار اصلی برای انتخاب این گونه این است که این کمیت می‌بایست به تغییرات نرخ کرنش بسیار حساس باشد. تغییرات دو گونه CO ، H_2O برحسب متغیر بی‌بعد پیشرفت واکنش در نرخ کرنش‌های مختلف در شکل ۲ و شکل ۳ رسم شده است. ترکیب خطی کسر جرمی گونه‌های CO ، H_2O به صورت معادله (۱۳) انتخاب مناسبی برای حل معادله انتقال است.

$$Y_s = 0/1Y_{H_2O} + Y_{CO} \quad (13)$$

جهت حل معادله انتقال برای کمیت Y_s از UDF استفاده می‌شود و معادله انتقال آن به فرم زیر است:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{Y}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{Y}_s) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} (\bar{D} + D_t) \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_{Y_s} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) جمله $\bar{\omega}_{Y_s}$ عبارت چشمه معادله انتقال Y_s است. با استفاده از UDF، مقدار این عبارت از جدول مراجعه‌ای فراخوانی می‌شود. همانطور که گفته شد، در جدول مراجعه‌ای هر کمیت ترموشیمیایی تابعی از سه متغیر نماینده نرخ کرنش (\bar{Y}_s) ، میانگین متغیر پیشرفت و واریانس متغیر پیشرفت است. در گام اول حل عددی، این سه متغیر با توجه به مقداردهی اولیه مسئله مشخص هستند و عبارت چشمه معادله (۱۴) به راحتی از جدول فراخوانی می‌شود و در زمان‌های بعدی، میانگین و واریانس متغیر پیشرفت از حل معادله انتقال حاصل می‌شوند. با حل معادله انتقال در هر گام حل عددی، کمیت Y_s برای هر سلول محاسباتی مشخص می‌شود. از طرف دیگر، مقدار این کمیت برای نرخ کرنش‌های مختلف در جدول مراجعه‌ای از قبل موجود است. بنابراین، تنها کافیست که مقدار کمیت Y_s حاصل از معادله انتقال (۱۴) با مقادیر کمیت Y_s در جدول مراجعه‌ای مقایسه شود تا نرخ کرنش در هر سلول محاسباتی مشخص شود. با دانستن نرخ کرنش در هر سلول محاسباتی، کمیت‌های ترموشیمیایی با اعمال نرخ کرنش مقداردهی می‌شوند. با این کار نرخ کرنش در شعله پیش‌مخلوط آشفته در نظر گرفته می‌شود. تمام این مراحل توسط UDF در هر گام حل عددی در نرم‌افزار فلونت اعمال می‌شود.

¹ Scalar dissipation rate

² Mixing time scale

³ Delta probability distribution function

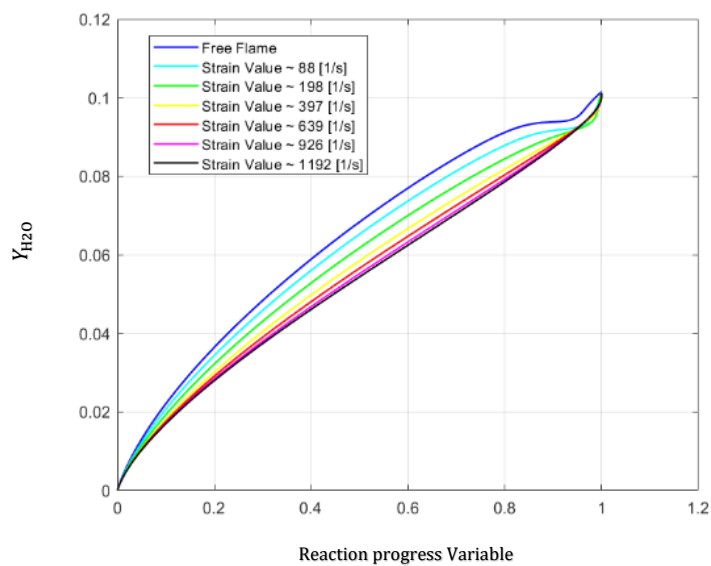


Figure 2 -Mass fraction of H₂O species in terms of c at different values of strain rate.

شکل ۲ - کسر جرمی گونه H₂O بر حسب متغیر پیشرفت واکنش در مقادیر مختلف نرخ کرنش

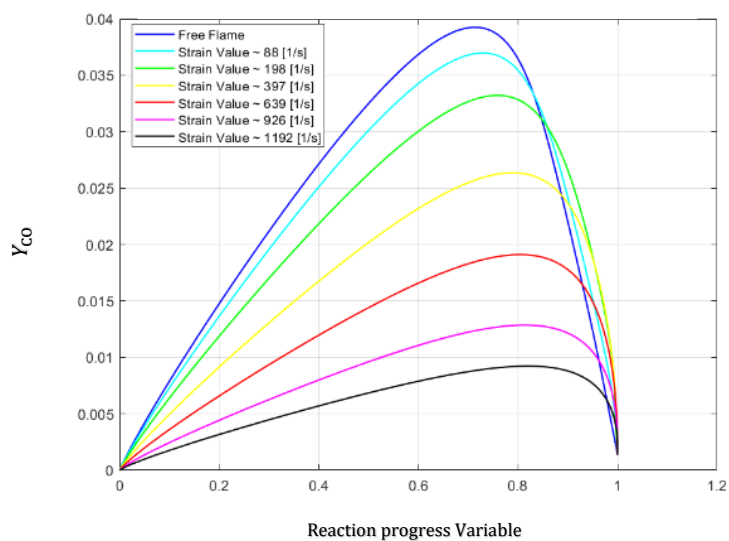


Figure 3- Mass fraction of CO species in terms of c at different values of strain rate.

شکل ۳ - کسر جرمی گونه CO بر حسب متغیر پیشرفت واکنش در مقادیر مختلف نرخ کرنش

پیکربندی و مدل سازی

مشعل مورد بررسی در این پژوهش، مشعل اصلاح یافته سیدنی^۱ است که جهت شبیه سازی شعله پیش مخلوط و نیمه پیش-مخلوط به کار می رود. این مشعل همان گونه که در شکل ۴ نمایش داده شده است، از دو استوانه هم مرکز ساخته شده است که استوانه مرکزی ورودی جت اصلی بوده و مخلوط با نسبت هم آرزوی و سرعت ۲۱۶ متر بر ثانیه در این مجرا جاری می شود. این ورودی جت با طول متغیر می تواند از سر مشعل جابجا شود که این فاصله از ۰ تا ۳۰۰ میلی متر متفاوت است. در استوانه اطراف جت، مخلوط با همان نسبت هم آرزوی ولی با سرعت متفاوت ۸۸ متر بر ثانیه جریان دارد. این تفاوت سرعت باعث ایجاد یک لایه برشی^۲ بین دو جریان و در نتیجه تولید آشفتگی با شدت بالا می شود. جریان آشفته مخلوط سوخت و هوای حاصل با شدت آشفتگی بالا توسط مجرای حلقوی بخش پایلوت احاطه شده است. بخش پایلوت^۳ دمای ۲۲۲۲ کلوین دارد و کل مشعل در یک تونل باد ۱۵ در ۱۵ سانتی متری محصور شده است. جریان هوای تونل ۱۵ متر بر ثانیه سرعت دارد. برای هندسه سه نوع شبکه اعمال شده است که شبکه متوسط ۵۵۴۴۶ سلول دارد و مقدار بیشینه و کمینه چولگی^۴ صفر بوده و کیفیت تعامد ۱ است. این مقادیر از نظر کیفیت شبکه قابل قبول هستند. شکل ۵ شبکه تولیدی و هندسه میدان حل را نشان می دهد. مشخصات شرایط مرزی در شکل ۵ قابل مشاهده است و شبیه سازی به صورت متقارن محوری^۵ انجام می شود.

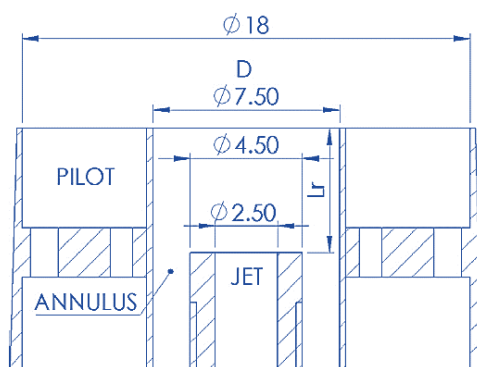


Figure 4- Modified Sydney burner in 2D mode [24]

شکل ۴ - مشعل اصلاح یافته سیدنی در حالت دوبعدی [24]

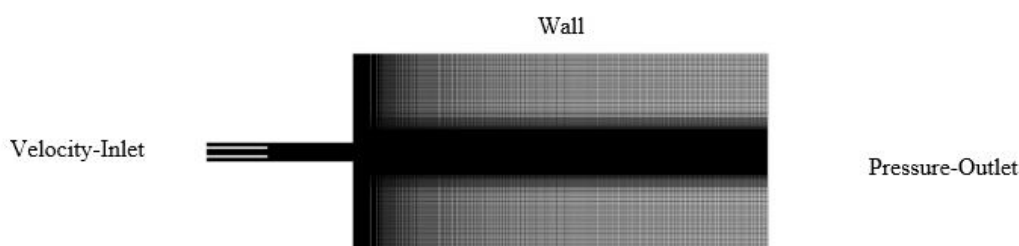


Figure 5- Production grid for 2D burner geometry

شکل ۵ - شبکه تولیدی برای هندسه دوبعدی مشعل

- ¹ Modified sydney burner
- ² Shear layer
- ³ Pilot
- ⁴ Skewness
- ⁵ Axisymmetric

برای حل شعله پیش مخلوط از مکانیزم شیمیایی جزئی 3 GRI-Mech استفاده شده است. این مکانیزم شامل ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی است. سوخت مورد نظر ترکیب خاصی از گاز طبیعی است و می توان از این مکانیزم برای آن استفاده کرد. هوا به عنوان اکسیدکننده در نظر گرفته می شود. مقدار کمیت نسبت هم ارزی برای مخلوط واکنش برابر با ۰/۸۵ است. ترکیب مخلوط سوخت و اکسیدکننده برحسب ضرایب مولی آن ها برای نسبت هم ارزی ۰/۸۵ در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱ - مشخصات مخلوط واکنشی

Table 1- Characteristics of the reaction mixture

Oxidizer		Fuel	
Species	Mole Fraction	Species	Mole Fraction
O ₂	0/21008	CH ₄	0/899
		C ₂ H ₄	0/078
N ₂	0/78992	H ₂	0/011
		N ₂	0/012

نتایج

در آزمایش های تجربی این شعله، میدان سرعت و گونه شیمیایی CH اندازه گیری شده است. ابتدا نتایج آنالیز حساسیت مدل آشفته گی نسبت به ثابت C_{ϵ_1} در شکل ۶ ارائه شده است. نحوه ایجاد آشفته گی در ورودی این مشعل ترکیبی از جریان برشی جت و جریان آشفته لایه مرزی درون لوله است. مقدار استاندارد برای این ثابت در پژوهش های پیشین ارائه نشده است. در نتیجه انجام آنالیز حساسیت برای یافتن بهینه ترین مقدار لازم است. شکل ۶ پروفیل سرعت محوری در ورودی مشعل را نشان می دهد. مطابق این نمودار استفاده از مقدار ۱/۴۴ برای این ثابت مقدار سرعت محوری را کمتر از مقدار تجربی پیش بینی می کند و مقدار ۱/۶ باعث پیش بینی بیش از حد سرعت محوری می شود. این شکل نشان می دهد که مقدار بهینه این پارامتر ۱/۵ است. پیش بینی دقیق این پروفیل که در ورودی مشعل است از اهمیت ویژه ای برخوردار است. زیرا تخمین طول شعله به صورت مستقیم به پروفیل سرعت ورودی وابسته است.

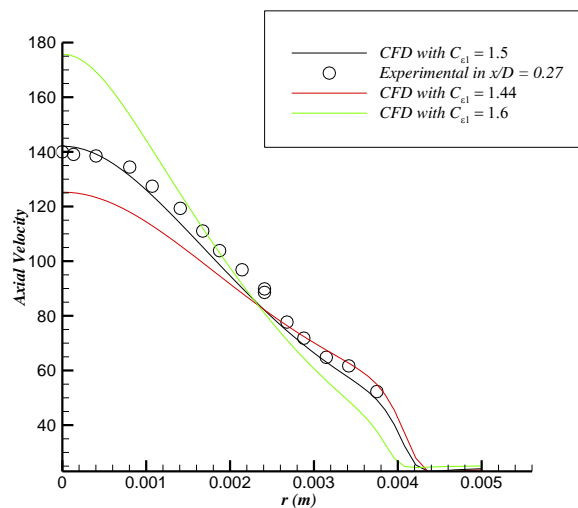


Figure 6- The results of the sensitivity analysis of the disturbance model with respect to the constant C_{ϵ_1}

شکل ۶ - نتایج آنالیز حساسیت مدل آشفته گی نسبت به ثابت C_{ϵ_1}

شکل ۸ نرخ تولید متغیر پیشرفت واکنش در شعله آرام جریان متقابل را قبل از انتگرال گیری نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که با افزایش نرخ کرنش، نرخ تولید این متغیر کاهش می یابد. همچنین، با افزایش نرخ کرنش، بیشینه نرخ واکنش شیمیایی به سمت راست و در جهت متغیر پیشرفت واکنش حرکت می کند. نرم افزار فلونت تنها در یک نرخ واکنش معین، شعله پیش مخلوط آرام را حل می کند. همچنین شکل ۷ نرخ تولید متغیر پیشرفت واکنش شعله آرام را در این نرم افزار برای مقدار پیش فرض نرخ کرنش نشان می دهد. همچنین نرخ تولید به دست آمده توسط نرم افزار کنترتا در حالت بدون کرنش نیز در این شکل نمایش داده شده است. مقایسه این دو منحنی نشان می دهد که نرم افزار فلونت به صورت پیش فرض مقدار کمی کرنش را در محاسبه ریزشعله ها لحاظ می کند.

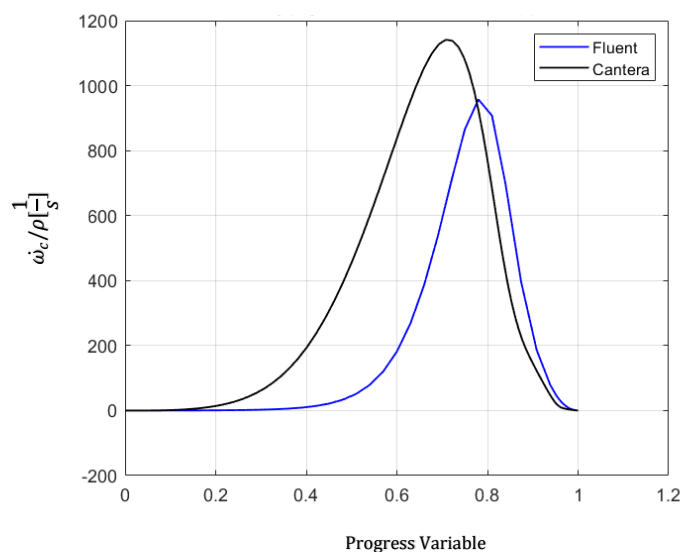


Figure 7- The rate of reaction for progress variable of laminar flame reaction in Fluent and Cantera (right) and the variable (left)

شکل ۷ - نرخ تولید متغیر پیشرفت واکنش شعله آرام در فلونت و کنترتا

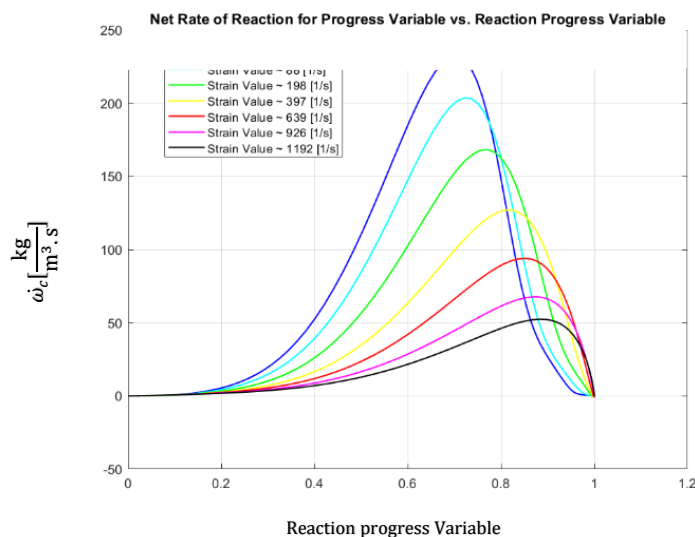


Figure 8- production rate of reaction progress in counterflow laminar flame before integration

شکل ۸ - نرخ تولید متغیر پیشرفت واکنش در شعله آرام جریان متقابل قبل از انتگرال گیری

در ادامه در ابتدا، نتایج شبیه‌سازی شعله با استفاده از مدل ریزشعله آرام برای حالتی که نرخ کرنش در محاسبات شعله دخیل نشده است، ارائه می‌شود. جدول مراجعه‌ای مورد استفاده برای این حالت، جدول حاصل از حل شعله پیش‌مخلوط آرام در نرخ کرنش صفر است. سپس برای اعمال کرنش از جدول مراجعه‌ای حاصل از حل شعله آرام با اعمال نرخ کرنش‌های مختلف استفاده شده است. در این حالت، از ترکیب خطی $0.1 \text{ H}_2\text{O} + \text{CO}$ به‌عنوان متغیر نماینده نرخ کرنش استفاده شده است.

داده تجربی موجود از این شعله، عکس از نور مرئی شعله با زمان نوردهی بالا است. نور مرئی شعله پیش‌مخلوط در نسبت هم‌ارزی‌های رقیق عمدتاً ناشی از نورتایی شیمیایی گونه CH^* است. همچنین نورتایی گونه CO_2^* نیز در پایین‌دست شعله به صورت آبی کم‌رنگ‌تر در عکس قابل مشاهده است. شکل ۹ نتایج عددی کانتورهای گونه CH را در دو شبیه‌سازی با و بدون کرنش به همراه نتایج تجربی نمایش می‌دهد.

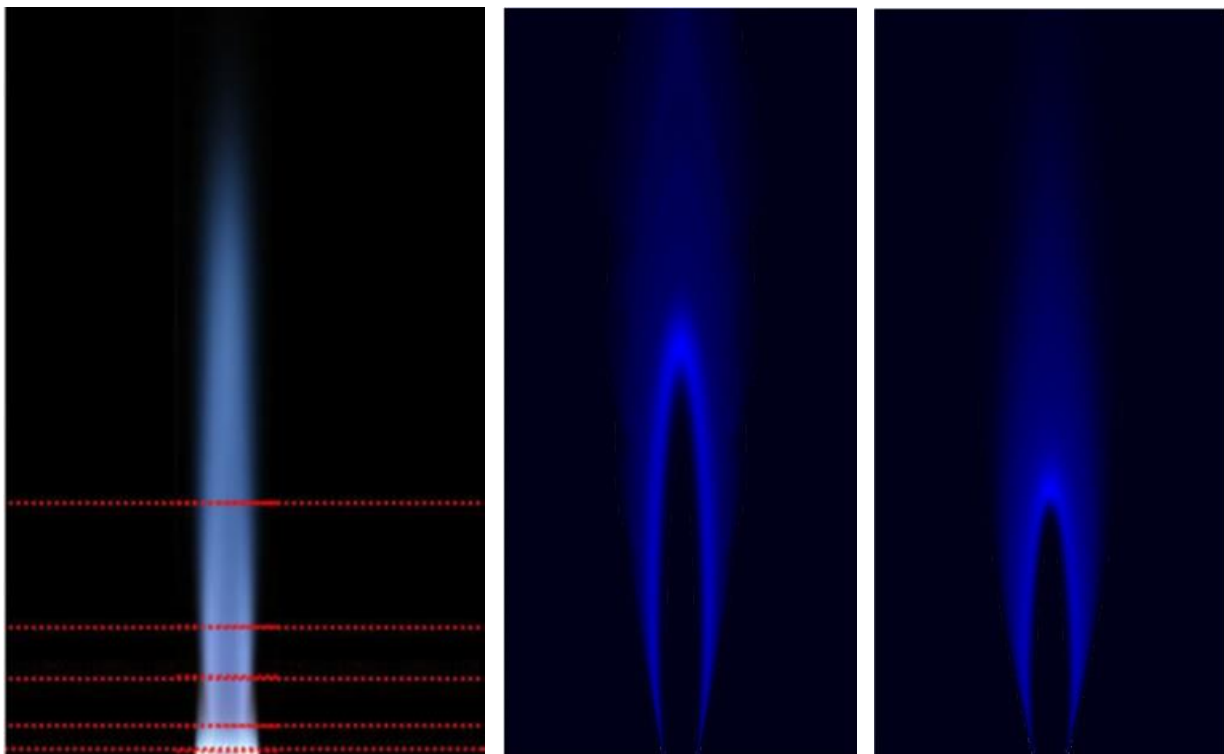


Figure 9- Comparison of flame length, from right: numerical solution without strain, numerical solution with strain, real flame

شکل ۹- مقایسه طول شعله، از سمت راست: حل عددی بدون کرنش، حل عددی با کرنش، شعله واقعی

اگر برای حل عددی یک شعله، تأثیرات نرخ کرنش در نظر گرفته نشود، عبارت‌های منبع نرخ واکنش شیمیایی با فرض ریزشعله‌های بدون کرنش تخمین زده می‌شوند. اما در واقعیت، نرخ کرنش در طول شعله کمی متغیر است. با افزایش نرخ کرنش - مطابق شکل ۸- نرخ تولید محصولات احتراق کاهش می‌یابد. متقابلاً، سوخت نیز با نرخ کمتری مصرف می‌شود. در نتیجه سرعت شعله آشفته کاهش و طول شعله افزایش می‌یابد. شکل ۹ نشان می‌دهد که لحاظ کردن این فیزیک در مدل احتراقی سبب می‌شود که نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک‌تر شود. اما هنوز طول شعله در نتایج عددی کمتر از مقدار واقعی است. مقادیر کمی طول شعله در حالت تجربی، حل عددی با کرنش و بدون کرنش در جدول ۲ قابل مشاهده است. مطابق این

جدول مقدار طول شعله با حالت کرنش یافته ۳۰ میلی متر بیشتر از مقدار طول شعله بدون کرنش است. طول شعله کرنش یافته با مقدار واقعی ۶۵ میلی متر اختلاف دارد و مقداری عددی کمتر است.

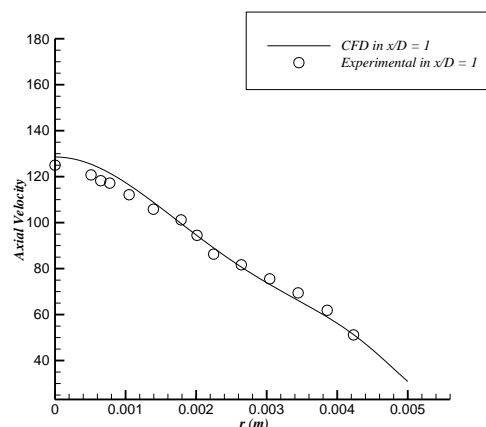
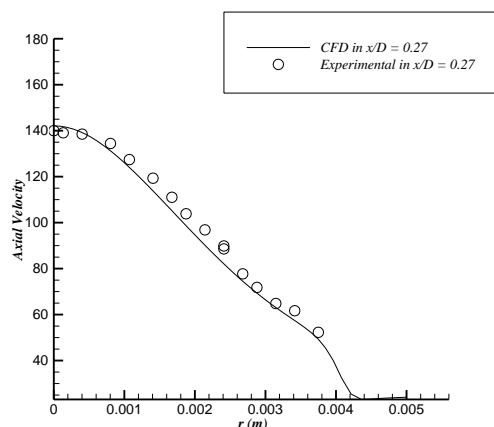
جدول ۲ - مقایسه کمی طول شعله

Table 2- Quantitative comparison of flame length

Model	Flame Length(mm)
Experimental	175
Strained	105
Free Flame (without strain)	75

این اختلاف در طول شعله می تواند ناشی از مدل ساده رینولدز-متوسط کی-اِپسیلون باشد. معادلات انتقال این مدل دارای ضرایب ثابتی هستند که به صورت نیمه تجربی محاسبه می شوند. بنابراین، برای هر مسئله با شرایط خاص، تأثیر این ضرایب سبب بروز خطاهای این چینی می شود. به کارگیری رویکرد شبیه سازی گردابه های بزرگ که به نسبت رویکرد رینولدز-متوسط دقت بیشتر و ثوابت کمتری دارد، ممکن است نتایج عددی را بهبود ببخشد. همچنین در این شبیه سازی اثرات رقیق شدن مخلوط با هوای اطراف لحاظ نشده است. مدل سازی این امر می تواند سرعت شعله را کاهش و طبیعتاً طول شعله را افزایش داده و به مقادیر تجربی نزدیک تر کند. برای این منظور باید جداول ریزشعله در نسبت هم آری های مختلفی محاسبه شده و عملاً از یک مدل احتراقی ریزشعله نیمه پیش مخلوط استفاده کرد. پیاده سازی هم زمان اثرات رقیق سازی و نرخ کرنش از اهداف پژوهش های آینده است.

از دیگر عوامل خطا در شبیه سازی ها مدل ساده نرخ اضمحلال اسکالر (معادله (۱۲)) در نرم افزار فلوئنت است. پژوهش های پیشین نشان می دهد که این مدل باعث کاهش بیش از حد مقدار واریانس متغیر پیشرفت شعله و در نتیجه افزایش نرخ واکنش شیمیایی می شود [۲۷]. متعاقباً استفاده از این مدل باعث می شود که طول شعله کمتر از مقدار واقعی پیش بینی شود. مدل های دقیق تری برای این پارامتر در پژوهش های پیشین ارائه شده است [۲۸] و [۲۹] که باید در پژوهش های آتی در نرم افزار فلوئنت پیاده سازی شود.



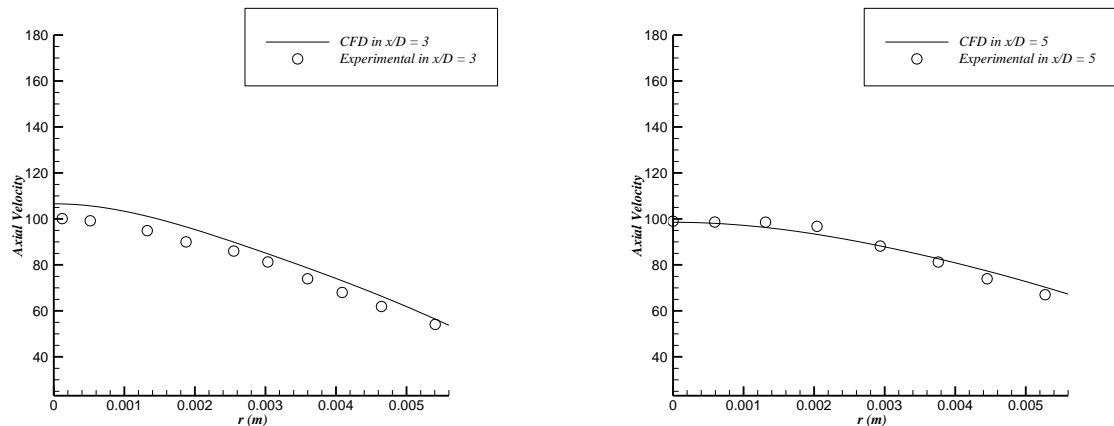


Figure 10 – Comparison of axial flame speed data in numerical solution by applying strain with experimental

شکل ۱۰ - مقایسه داده‌های سرعت محوری شعله در حل عددی با اعمال کرنش با داده‌های تجربی

از دیگر داده‌های اندازه‌گیری شده در این مشعل، سرعت محوری است. نتایج شبیه‌سازی برای این پارامتر در حالت با کرنش در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مطابق این شکل هر مقدار از سرمشعل فاصله گرفته شود، جت در جهت شعاعی گسترش یافته و در نتیجه سرعت محوری جریان کاهش پیدا می‌کند. این روند با کمی اختلاف در فاصله محوری $x/D=3$ در نتایج عددی به خوبی شبیه‌سازی شده است.

در شکل ۱۱ نمودار تغییرات مقدار سرعت اغتشاشی بر روی خط محوری شعله در نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش فاصله محوری مقدار سرعت اغتشاشی کاهش می‌یابد. نتایج عددی با داده‌های تجربی اختلاف کمی دارند و مقادیر به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند. الگوی کاهش مقدار سرعت اغتشاشی در هر دو نمودار قابل مشاهده است.

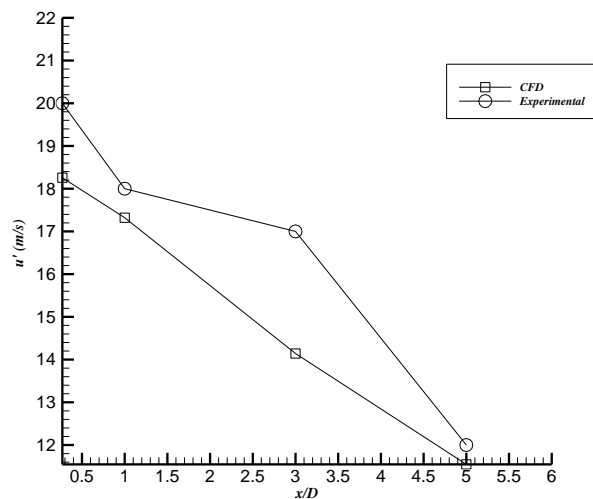


Figure 11-The diagram of changes in the amount of turbulence speed on the axial line of the flame

شکل ۱۱ - نمودار تغییرات مقدار سرعت اغتشاشی بر روی خط محوری شعله

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، شعله پیش مخلوط آشفته با لحاظ کردن نرخ کرنش، به صورت عددی مدل سازی شد. نوآوری این پژوهش پیاده سازی روش ریزشعله آرام در نرم افزار تجاری انسیس فلونت است. پیاده سازی این روش به کمک توابع تعریفی کاربر صورت گرفته است. مدل احتراقی بسط ریزشعله آرام با کمک توابع تعریفی کاربر تأثیر کرنش بر ساختار شعله را اعمال می کند. نرم افزار فلونت یک نرم افزار غیر متن باز است. در این پژوهش روش بستن ریزشعله آرام جهت تحلیل کرنش در شعله پیش- مخلوط با کمک کدنویسی توابع تعریفی در این نرم افزار اعمال شده است. پیاده سازی روش ریزشعله آرام کرنش یافته در این نرم افزار با کدنویسی UDF انجام شده است. نتایج نشان می دهد که با اعمال نرخ کرنش در حل عددی شعله، نرخ خالص تولید گونه های شیمیایی و کسر جرمی این گونه ها دچار تغییرات می شود. بررسی شد که با افزایش نرخ کرنش، نرخ واکنش شیمیایی گونه ها کاهش می یابد. این مسئله سبب می شود که مصرف مواد اولیه در مکان هایی که نرخ کرنش زیاد است، کاهش یافته و در نتیجه طول شعله با اعمال نرخ کرنش افزایش می یابد. مقایسه نتایج عددی با استفاده از مدل ریزشعله کرنش یافته با مدل ریزشعله بدون کرنش نشان می دهد که اعمال اثرات کرنش تأثیر قابل توجهی در بهبود تخمین طول شعله دارد. با این حال، طول شعله کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می شود. بهبود مدل احتراقی با در نظر گرفتن اثرات نیمه پیش مخلوطی با هوای اطراف، بهبود مدل آشفته گی و بهبود مدل نرخ اضمحلال اسکالر در پژوهش های آتی ممکن است باعث بهبود نتایج عددی شود.

منابع

- [1] B. Fiorina, D. Veynante, and S. Candel, "Modeling Combustion Chemistry in Large Eddy Simulation of Turbulent Flames," *Flow Turbul. Combust.*, vol. 94, no. 1, pp. 3–42, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10494-014-9579-8.
- [2] B. Fiorina and D. Veynante, "MODELING COMBUSTION CHEMISTRY IN LARGE EDDY SIMULATION OF TURBULENT FLAMES," 2013.
- [3] A. R. Kerstein, W. T. Ashurst, and F. A. Williams, "Field equation for interface propagation in an unsteady homogeneous flow field," *Phys. Rev. A*, vol. 37, no. 7, pp. 2728–2731, Apr. 1988, doi: 10.1103/PhysRevA.37.2728.
- [4] C. Dopazo, Ed., *Advances in turbulence VIII: proceedings of the Eighth European Turbulence Conference; held in Barcelona, Spain, June 27 - 30, 2000*. Barcelona: CIMNE, 2000.
- [5] D. B. Spalding, "Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames," *Symp. Int. Combust.*, vol. 13, no. 1, pp. 649–657, Jan. 1971, doi: 10.1016/S0082-0784(71)80067-X.
- [6] G. Damkoh, "The effect of turbulence on the flame: Velocity in gas mixtures".
- [7] R. S. Cant and K. N. C. Bray, "Strained laminar flamelet calculations of premixed turbulent combustion in a closed vessel," *Symp. Int. Combust.*, vol. 22, no. 1, pp. 791–799, Jan. 1989, doi: 10.1016/S0082-0784(89)80088-8.
- [8] N. Peters, "Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 319–339, Jan. 1984, doi: 10.1016/0360-1285(84)90114-X.
- [9] H. Pitsch, M. Chen, and N. Peters, "Unsteady flamelet modeling of turbulent hydrogen-air diffusion flames," *Symp. Int. Combust.*, vol. 27, no. 1, pp. 1057–1064, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0082-0784(98)80506-7.
- [10] C. D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *J. Fluid Mech.*, vol. 504, pp. 73–97, Apr. 2004, doi: 10.1017/S0022112004008213.
- [11] D. Bradley, L. K. Kwa, A. K. C. Lau, M. Missaghi, and S. B. Chin, "Laminar flamelet modeling of recirculating premixed methane and propane-air combustion," *Combust. Flame*, vol. 71, no. 2, pp. 109–122, Feb. 1988, doi: 10.1016/0010-2180(88)90001-6.
- [12] O. Gicquel, N. Darabiha, and D. Thévenin, "Liminar premixed hydrogen/air counterflow flame simulations using flame prolongation of ILDM with differential diffusion," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1901–1908, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0082-0784(00)80594-9.
- [13] J. A. Van Oijen and L. P. H. De Goey, "Modelling of premixed counterflow flames using the flamelet-generated manifold method," *Combust. Theory Model.*, vol. 6, no. 3, pp. 463–478, Sep. 2002, doi: 10.1088/1364-7830/6/3/305.
- [14] M. M. Salehi and H. Ataizadeh, Assessment of the progress variable variance modelling on large-eddy simulation of turbulent premixed flames using flamelet-generated manifold model, vol. 14, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.22034/jfnc.2022.334445.1311, [in persian].
- [15] B. Fiorina, R. Baron, O. Gicquel, D. Thevenin, S. Carpentier, and N. Darabiha, "Modelling non-adiabatic partially premixed flames using flame-prolongation of ILDM," *Combust. Theory Model.*, vol. 7, no. 3, pp. 449–470, Sep. 2003, doi: 10.1088/1364-7830/7/3/301.
- [16] E. Knudsen, H. Kolla, E. R. Hawkes, and H. Pitsch, "LES of a premixed jet flame DNS using a strained flamelet model," *Combust. Flame*, vol. 160, no. 12, pp. 2911–2927, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.033.

- [17] Y. Tang and V. Raman, "Large eddy simulation of premixed turbulent combustion using a non-adiabatic, strain-sensitive flamelet approach," *Combust. Flame*, vol. 234, p. 111655, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111655.
- [18] W. Zhang, S. Karaca, J. Wang, Z. Huang, and J. V. Oijen, "Large eddy simulation of the Cambridge/Sandia stratified flame with flamelet-generated manifolds: Effects of non-unity Lewis numbers and stretch," *Combust. Flame*, vol. 227, pp. 106–119, May 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.01.004.
- [19] I. Langella and N. Swaminathan, "Unstrained and strained flamelets for LES of premixed combustion," *Combust. Theory Model.*, vol. 20, no. 3, pp. 410–440, May 2016, doi: 10.1080/13647830.2016.1140230.
- [20] P. Trisjono, K. Kleinheinz, E. R. Hawkes, and H. Pitsch, "Modeling turbulence–chemistry interaction in lean premixed hydrogen flames with a strained flamelet model," *Combust. Flame*, vol. 174, pp. 194–207, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.07.008.
- [21] A. Scholtissek, P. Domingo, L. Vervisch, and C. Hasse, "A self-contained composition space solution method for strained and curved premixed flamelets," *Combust. Flame*, vol. 207, pp. 342–355, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.06.010.
- [22] H. Kolla and N. Swaminathan, "Strained flamelets for turbulent premixed flames, I: Formulation and planar flame results," *Combust. Flame*, vol. 157, no. 5, pp. 943–954, May 2010, doi: 10.1016/j.combustflame.2010.01.018.
- [23] T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*, 2. ed. Philadelphia, Pa: Edwards, 2005.
- [24] 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," *Combust. Flame*, vol. 208, pp. 63–78, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.combustflame.2019.06.015.
- [25] M. M. Salehi, "Numerical Simulation of Turbulent Premixed Flames with Conditional Source-Term Estimation".
- [26] B. Jin, R. Grout, and W. K. Bushe, "Conditional Source-Term Estimation as a Method for Chemical Closure in Premixed Turbulent Reacting Flow," *Flow Turbul. Combust.*, vol. 81, no. 4, pp. 563–582, Dec. 2008, doi: 10.1007/s10494-008-9148-0.
- [27] M. M. Salehi and W. K. Bushe, "Presumed PDF modeling for RANS simulation of turbulent premixed flames," *Combust. Theory Model.*, vol. 14, no. 3, pp. 381–403, Jul. 2010, doi: 10.1080/13647830.2010.489957.
- [28] L. Vervisch, R. Hauguel, P. Domingo, and M. Rullaud, "Three facets of turbulent combustion modelling: DNS of premixed V-flame, LES of lifted nonpremixed flame and RANS of jet-flame," *J. Turbul.*, vol. 5, p. N4, Jan. 2004, doi: 10.1088/1468-5248/5/1/004.
- [29] H. Kolla, J. W. Rogerson, N. Chakraborty, and N. Swaminathan, "Scalar Dissipation Rate Modeling and its Validation," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 181, no. 3, pp. 518–535, Feb. 2009, doi: 10.1080/00102200802612419.

English Abstract

Numerical simulation of turbulent premixed flames using strained flamelet model

Amirhosein Fashamiha¹, Ehsan Rasouli Oskui², Mohammad Mahdi Salehi³

1- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, a.fashamiha97@gmail.com

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, ehsanrasoulioskui2000@gmail.com

3- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, mmsalehi@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2023/10/22, Received in revised form: 2023/12/25, Accepted: 2024/01/08)

Numerical simulation of turbulent flames with laminar flamelet models is not easily possible under high turbulence intensity conditions. Experimental results and direct numerical simulations show that introducing strain effects in the production of flamelet tables can significantly increase the accuracy of modeling. In this work, implementing the strain effects in the model results in 30 mm increase in the flame height relative to the unstrained model. In this work, a strained flamelet model has been implemented and evaluated in the simulation of turbulent premixed flames. The premixed counterflow flame has been used to produce the flamelet tables. These tables are used in the computational fluid dynamics solver using two reaction progress variables and the presumed probability density function method. The model obtained in this research has been used in Reynolds-Averaged simulation of a turbulent piloted premixed flame in a bunsen burner. This burner utilized a novel approach to highly increase the input turbulence intensity. The results show that the strained flamelet model predicts the flame propagation speed and consequently the flame length, significantly better compared to the unstrained flamelet model.

Keywords: Combustion, Turbulence, Premixed flame, Laminar flamelet model, Strain rate