

# بررسی عددی پایداری و خاموشی شعله‌ی پیش مخلوط V شکل

نگار نباتیان (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۰)  
دربی ۳-۳، شماره ۲، ص. ۶۷-۵۷، (پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، احتراق پیش مخلوط پروپان - هوا بررسی و بازه پایداری  $\phi = 0.55 - 1.2$  تعیین شده که بازه پایداری تجربی را پوشش می‌دهد. علت اختلاف در نسبت هم‌ارزی‌های آستانه‌ی خاموشی، بالا بودن شدت آشفستگی تجربی نسبت به مدل عددی است. میزان مونواکسید نیتروژن در احتراق رقیق در مقایسه با احتراق غلیظ بیشتر است که ناشی از عدم اختلاط کامل سوخت و هوا، لنگر انداختن شعله‌ی V شکل در یک طرف شعله‌نگهدار و ایجاد ناحیه‌ی گرم محلی است. در آستانه‌ی خاموشی در حالی که بخشی از شعله روی شعله‌نگهدار لنگر انداخته، بخش دیگر به صورت محلی به دلیل نرخ کرنش زیاد ناشی از برهم‌کنش گردابه‌ها و سطح شعله جدا شده و به پایین دست جریان منتقل می‌شود. سطح شعله در اثر اعوجاج‌های ناشی از آشفستگی باز شده و با کاهش بیشتر سوخت، گرمای آزاد شده احتراق برای پایداری شعله کافی نیست که با افت ناگهانی دما و رادیکال‌های OH شعله کاملاً خاموش می‌شود.

واژگان کلیدی: احتراق پیش مخلوط، شعله‌ی V شکل، مدل‌های احتراقی، مدل‌های آشفستگی.

n.nabatian@sbu.ac.ir

## ۱. مقدمه

احتراق توربین‌های گازی دارد. به همین دلیل مطالعه‌ی رفتار پایداری شعله‌رقیق و سازوکارهای ناپایداری آن می‌تواند درک درستی از احتراق پایدار با حفظ بازده و کاهش میزان آلاینده‌ها ایجاد کند.<sup>[۱]</sup>

کنده شدن شعله از روی شعله‌نگهدار با استفاده از مدل آشفستگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ<sup>۱</sup> و مدل احتراقی تابع چگالی احتمال<sup>۲</sup> در نرم‌افزار ANSYS فلوئنت توسط یانگ و همکارانش بررسی شده است. شعله‌ی V شکل روی شعله‌نگهدار مدل شده است و کنده شدن آن با استفاده از حل گذرا با مشاهده‌ی تغییر توزیع دمایی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان می‌دهد که میدان سرعت که به فاصله‌ی شکاف شعله‌نگهدار و عرض آن بستگی دارد در یک نسبت بهینه می‌تواند به دلیل تغییر نحوه‌ی شکل‌گیری و جاری شدن گردابه‌ها در تعویق کنده شدن شعله تأثیرگذار باشد. همچنین پیش‌گرم کردن جریان ورودی و سرعت جریان ورودی، با تأثیری که در میزان انرژی تولیدی برای نگه داشتن شعله دارند، می‌تواند در ایجاد تأخیر در خاموشی شعله مؤثر باشد.<sup>[۳]</sup> برای شبیه‌سازی احتراق توربین‌های گازی با آلاینده‌ی اندک، شعله‌نگهدار با شعله‌ی آشفته با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و این فوم توسط اندرانی و همکارانش شبیه‌سازی شده است. به دلیل وجود جریان آشفته از مدل آشفستگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ استفاده شده و نتایج حاصل با مدل آشفستگی رینولدز متوسط مقایسه شده است. مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ به دلیل حل میدان گردابه‌های بزرگ جزئیات بیشتری از جریان و برهم‌کنش آن با شعله را شبیه‌سازی می‌کند و بنابراین نتایج از نظر ساختار شعله شباهت بیشتری به نتایج تجربی دارد. حال آن که مدل‌های آشفستگی رینولدز متوسط نیز ساختار کلی شعله را به درستی مدل

کاهش آلاینده‌ها به خصوص اکسیدهای نیتروژن در توسعه‌ی توربین‌های گازی در دهه‌ی اخیر مورد توجه قرار گرفته است. کاهش دمای شعله از عوامل مؤثر بر کاهش انتشار ناکس است. یکی از تکنولوژی‌های کاهش دمای شعله، استفاده از احتراق پیش مخلوط رقیق است. با این که احتراق پیش مخلوط از میزان آلاینده‌ها می‌کاهد ولی نسبت به نوسانات ترموآکوستیکی نیز حساس‌تر و ناپایدارتر است. در تعدادی از مطالعات، اثر نوسانات سرعت ورودی بر پایداری شعله‌های پیش مخلوط، با تأثیر برهم‌کنش شعله و رژیم جریان بر هم، بررسی شده است. اثر نوسانات نسبت هم‌ارزی یا تغییر رفتار دینامیکی شعله در نسبت هم‌ارزی خاموشی نیز کم‌تر بررسی شده است که می‌تواند در پدید آمدن ناپایداری ترموآکوستیکی، که به محفظه‌ی احتراق آسیب می‌زند، بسیار تأثیرگذار باشد.<sup>[۱]</sup>

احتراق پیش مخلوط رقیق علاوه بر توربین‌های گازی، در کوره‌های صنعتی نیز کاربرد دارد. همچنین پس‌سوز توربین‌های گازی معمولاً یک شعله‌نگهدار برای پایداری شعله در سرعت‌های بالای گازهای واکنش‌دهنده دارد. در نسبت‌های هم‌ارزی مرزی، ناپایداری‌های القایی از جسم شعله‌نگهدار بر ساختار شعله تأثیر می‌گذارد. این ناپایداری‌های ناشی از برهم‌کنش آشفستگی و احتراق است که می‌تواند منجر به خاموشی، جدایش یا برگشت شعله شود. شعله‌ی پیش مخلوط آشفته‌ی شعله‌نگهدار با هندسه‌ی ساده از منظر برهم‌کنش آشفستگی جریان و احتراق مشابَهت زیادی به

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۲۷.

DOI:10.24200/J40.2021.57579.1578

هم‌ارزی نزدیک به خاموشی است. مدل‌های مختلف آشفستگی و برهم‌کنش آشفستگی و احتراق برای شبیه‌سازی دینامیک شعله مقایسه شده و مدل آشفستگی و احتراقی مناسب تعیین شده است. نتایج در قالب میدان جریان سرد و گرم، کنتورهای دما و توزیع گونه‌ها ارائه شده و محدوده‌ی پایداری شعله تعیین شده است. همچنین دینامیک شعله در آستانه‌ی خاموشی با مدل‌های منتخب با تقریب خوبی مدل‌سازی شده است.

## ۲. معادلات حاکم

### ۲.۱. مدل‌های آشفستگی

برای حل معادله‌ی مومنتوم در جریان آشفته، ترم تنش مطابق معادله‌ی ۱ با استفاده از معادله‌ی ۲ بر اساس فرض بوزینسک، تنش رینولدز را از طریق محاسبه‌ی ترم لزجت گردابه‌ی  $\mu_t$  از مدل‌های آشفستگی رینولدز محاسبه می‌کند. مدل‌های رینولدز متوسط بر اساس متوسط‌گیری پارامترهای جریان برحسب زمان و حذف ترم متوسط نوسانی پارامتر عمل می‌کنند و بسته به نحوه‌ی محاسبه لزجت گردابه‌ی و وضوح شبکه دقت متفاوتی دارند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$R_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2)$$

### ۲.۱.۱. مدل‌های آشفستگی $k - \varepsilon$

در این مدل رینولدز متوسط دو معادله‌ی، پس از محاسبه‌ی انرژی جنبشی آشفستگی و اتلاف گردابه‌ی، ترم لزجت گردابه‌ی از  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  تخمین زده می‌شود. معادله‌ی انتقال انرژی جنبشی نوسانی از معادله‌ی دقیق استخراج می‌شود در حالی که مدل نرخ اتلاف گردابه‌ی به صورت نیمه تجربی محاسبه می‌شود. طبق معادله‌ی ۲ تنش نرمال با فرض بوزینسک از رابطه‌ی  $\overline{u'^2} = \frac{2}{3} k - 2 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial U}{\partial x}$  محاسبه می‌شود؛ زمانی که مقدار کرنش زیاد باشد، مقدار تنش نرمال با ثابت فرض کردن  $C_\mu$  می‌تواند منفی شود که غیرفیزیکی است. برای جلوگیری از این مسئله در مدل  $k - \varepsilon$  قابل‌اعتماد، در محاسبه‌ی لزجت آشفستگی تابعی از کرنش متوسط و نرخ چرخش است که با عدد رینولدز تغییر می‌کند. همچنین معادله‌ی انتقال اتلاف ویژه تصحیح شده و بر اساس میانگین مربعات نوسانات سرعت محاسبه می‌شود.

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (4)$$

که در این معادلات،  $G_k$  ترم تولید انرژی از گردان‌های سرعت جریان،  $G_b$  ترم تولید انرژی ناشی از شناوری،  $Y_M$  ترم انرژی جنبشی حاصل از تراکم‌پذیری،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب اعداد پراوتل متناسب با معادلات انرژی جنبشی و اتلاف گردابه‌ی  $S_\varepsilon$ ،  $S_k$ ، ترم‌های چشمه قابل تعریف توسط کاربر هستند. ثابت‌های این مدل‌ها با استفاده از آزمایش‌های تجربی تعیین شده است.

می‌کند؛ اگرچه تغییر ضخامت شعله و اثرات آشفستگی در آن کم‌تر دیده می‌شود، طبیعتاً میزان حجم محاسبات مدل آشفستگی رینولدز متوسط به‌مراتب از مدل شبیه‌سازی گردابه‌بزرگ کم‌تر است.<sup>[۴]</sup> از مدل آشفستگی گردابه‌های جدا شده<sup>۳</sup> که در آن ترکیبی از مدل‌های آشفستگی شبیه‌سازی گردابه‌بزرگ و رینولدز متوسط برای شبیه‌سازی آشفستگی جریان یک جسم مثلثی شکل که برای پایدار کردن شعله‌ی پیش‌مخلوط هوا و پروان استفاده می‌شود، توسط هو و همکارانش استفاده شده است. نتایج آنها حاکی از آن است که جریان سرد این مدل تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد ولی در جریان گرم حاصل از احتراق نتایج از دقت کافی برخوردار نیستند. در این کار از مدل جبهه‌ی شعله برای شبیه‌سازی احتراق پیش‌مخلوط استفاده شده است که در آن ضریب کشش سطح شعله مقدار پیش فرض در نظر گرفته شده است. این امر باعث شده توزیع دمایی دقیقی از شعله به‌دلیل انتخاب مدل ساده‌ی احتراقی که شامل جزئیات نیست حاصل نشود و ناحیه‌ی خاموشی نیز به‌دلیل عدم انتخاب ضریب کشش مناسب درست مدل نشود. هرچند میدان سرعت حاصل از مدل آشفستگی گردابه‌ی جدا شده با نتایج آزمایش تجربی به خوبی مطابقت دارد. نتایج آنها نشان داد که انتخاب ضریب مناسب، شبکه‌ی محاسباتی ریزتر و همچنین استفاده از مدل احتراقی دقیق‌تر که جزئیات واکنش را لحاظ کند و برهم‌کنش شعله و آشفستگی جریان را دقیق‌تر مدل کند می‌تواند به رفع خطای حاصله از این تحقیق منجر شود.<sup>[۵]</sup> محدوده‌ی پایداری شعله‌ی پیش‌مخلوط هیدروژن روی شعله‌نگهدار و ناحیه‌ی کنده شدن آن با استفاده از مدل تابع چگالی احتمال و در نظر گرفتن زیرواکنش‌های مؤثر از نرم‌افزار کمکین توسط زنگ و همکارانش بررسی شده است. همچنین اثر نسبت انسداد و میدان سرعت جریان بر احتراق شعله‌ی هیدروژن بررسی شده و با توجه به تأثیرگذاری میدان سرعت و میزان آشفستگی بر پایداری شعله، یک نسبت بهینه برای شعله‌ی پایدار قابل محاسبه است. اثر سرعت جریان ورودی و نسبت انسداد به‌عنوان پارامترهای غالب بر پایداری شعله با استفاده از آنالیز حساسیت بررسی شدند. در نسبت انسداد ثابت، رابطه‌ی سرعت جریان و محدوده‌ی کنده‌شدن شعله‌ی لگاریتمی و در سرعت جریان ثابت، رابطه‌ی محدوده‌ی کنده شدن شعله و نسبت انسداد، سهمی است.<sup>[۶]</sup> رفتار شعله‌ی پیش‌مخلوط رقیق با استفاده از مدل احتراقی نیمه‌پیش‌مخلوط و مدل‌های آشفستگی رینولدز متوسط به‌صورت پایا توسط سودارما و همکارانش بررسی شده است. نتایج آنها شامل میدان سرعت، توزیع دمایی و غلظت اجزای اصلی احتراق تطبیق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دارد و از بین مدل‌های مختلف آشفستگی، مدل کی‌اسپیلن دقیق‌تر از بقیه برهم‌کنش آشفستگی و شعله را مدل کرده و ساختار دقیق‌تری را ایجاد می‌کند.<sup>[۷]</sup>

چنان که اشاره شد، عوامل مختلفی از جمله سرعت جریان، نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی، فشار، دما، نسبت انسداد و شکل جسم شعله‌نگهدار و نرخ کشش سطحی شعله در خاموشی شعله‌ی پیش‌مخلوط رقیق مؤثرند. همچنین اشاره شد که چون احتراق پیش‌مخلوط رقیق شعله‌نگهدار تمامی خصوصیات احتراق پیش‌مخلوط توربین‌های گازی را که ناشی از برهم‌کنش ساختارهای گردابه‌ی حاصل از آشفستگی جریان با نرخ واکنش جزء‌های شیمیایی است که در مقیاس مولکولی اتفاق می‌افتد، بررسی رفتار این شعله می‌تواند درک درستی از فیزیک این احتراق که در توربین‌های گازی با هندسه‌های پیچیده‌تر اتفاق می‌افتد را ارائه دهد. محاسبات عددی به‌عنوان ابزاری کارآمد با هزینه پایین در بررسی احتراق مورد استفاده است.<sup>[۸-۱۰]</sup>

هدف مطالعه‌ی حاضر، بررسی عددی توانایی و محدودیت‌های مدل‌های مختلف آشفستگی و مدل‌های مختلف برهم‌کنش احتراقی با آشفستگی در پیش‌بینی خصوصیات میدان جریان، محدوده‌ی پایداری شعله‌ی پیش‌مخلوط یک شعله‌نگهدار V شکل طراحی شده<sup>[۱۱]</sup> و مطالعه‌ی رفتار دینامیک احتراق آن در حالت رقیق در نسبت

بنابراین جریان پایا با استفاده از مدل  $kw - SST$  و جریان ناپایدار با استفاده از محاسبه‌ی مقیاس طولی فون کارمن، با مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ حل می‌شود؛ هر قدر مقیاس طولی  $L$  از معیار طولی فون کارمن  $L_{vk}$  بزرگ‌تر شود، مقدار لزجت آشفته‌گی کم‌تر خواهد بود. مطابق رابطه‌ی ۹ ترن  $QSAS$  به حل معادله‌ی انتقال اتلاف گردابه‌ی ویژه مرتبط است و برخلاف مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ مستقل از شبکه‌بندی است.

### ۲.۲. مدل‌های برهم‌کنش احتراق و آشفته‌گی

معادله‌ی بقای گونه‌های شیمیایی طبق رابطه‌ی ۱۰ برای  $N - ۱$  گونه  $N$  بار حل می‌شود که در آن  $Y_i$  کسر جرمی هرگونه،  $\nabla Y_i = \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{Et}} \right) \nabla Y_i$   $J_i$  شار انتشار آرام و آشفته ناشی از گردادین غلظت،  $S_i$  نرخ تولید گونه‌ی  $i$  از منابع دیگر مانند تغییر فاز و  $R_i$  نرخ کلی واکنش است. این نرخ کلی از مجموع نرخ زیرواکنش‌های مربوط به هرگونه محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (۱۰)$$

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} R_{i,r} \quad (۱۱)$$

### ۱.۲.۲. مدل واکنش نرخ محدود/ اتلاف گردابه<sup>۵</sup>

مطابق رابطه‌ی ۱۵ مدل احتراقی نرخ محدود/اتلاف گردابه یکی از مدل‌هاست که در آن نرخ واکنش با مقایسه‌ی نرخ واکنش سینتیک شیمیایی  $R_{i,r,1}$  و نرخ اختلاط آشفته  $R_{i,r,2}$  و انتخاب کمینه به‌عنوان نرخ محدودکننده‌ی واکنش تعیین می‌شود. برای محاسبه‌ی نرخ مولی واکنش شیمیایی هرگونه، از روش نرخ محدود از رابطه‌ی آرنیوس استفاده می‌شود که بر اساس دما و غلظت اجرا متوسط محاسبه می‌شود که در این رابطه  $v'_{i,r}$  ضریب استوکیومتری برای واکنش دهنده،  $v''_{i,r}$  ضریب استوکیومتری برای محصول،  $C_{j,r}$  غلظت مولی برای گونه‌ی  $j$ ،  $\eta'_{j,r}$  توان نرخ واکنش رفت برای گونه  $j$  و  $\eta''_{j,r}$  توان نرخ واکنش برگشت و  $k_{b,r}$ ،  $k_{f,r}$  ثابت‌های نرخ پیشرفت رفت و برگشت در واکنش  $r$  است که تابع دما و انرژی فعال‌سازی اجرا هستند.

$$R_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left( k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}} \right) \quad (۱۲)$$

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT}$$

نرخ اختلاط نیز با فرض این که واکنش سریع اتفاق می‌افتد و این نرخ محدودکننده‌ی سرعت واکنش است با روش اتلاف گردابه محاسبه می‌شود. نرخ واکنش برابر با کم‌ترین نرخ اختلاط بر اساس مقیاس زمانی گردابه‌ها  $k/\varepsilon$  و کسر جرمی واکنش دهنده‌ها یا محصولات است که در رابطه‌ی ۱۳ و ۱۴ تعریف شده است.

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}, \nu_{j,r} \right) \quad (۱۳)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \sum_P Y_P \nu_{j,r} M_{w,j} \quad (۱۴)$$

از آنجا که در مدل اتلاف گردابه هر جا که آشفته‌گی باشد  $k/\varepsilon > 0$  مخلوط سوخت و اکسیدکننده می‌تواند واکنش دهد، برای رفع این مشکل در احتراق پیش مخلوط،

### ۲.۱.۲. مدل آشفته‌گی $kw - SST$

مدل دوم معادله‌ی  $kw - SST$  شامل یک معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی آشفته‌گی و یک معادله‌ی اتلاف گردابه‌ی ویژه است که پس از حل سری معادلات ۵ و ۶ برای محاسبه‌ی لزجت گردابه‌ی دقیق‌تر و عدم تخمین بیش از اندازه، مقدار آن از معادله‌ی  $\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{S_{F_T}}{a_1 \omega}]}$  استفاده می‌کند. ضریب  $\alpha^*$  برای کاهش لزجت آشفته‌گی برای تصحیح اعداد رینولدز پایین تعریف شده است و  $S$  بیان‌گر نرخ کرنش است. تابع ترکیب وزنی  $F_T$  به همراه  $\alpha^*$  کاهنده‌ی میزان لزجت آشفته‌گی است. این ترم مانع پیش‌بینی بیش از اندازه‌ی لزجت آشفته‌گی شده و محل شروع و میزان جدایش را درست‌تر تخمین می‌زند.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (۵)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho (1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۶)$$

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2, \varphi = \beta, \sigma_k, \sigma_\omega, \gamma$$

که  $G_k = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  مؤثر، معادلات انتشار مؤثر،  $\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$  و  $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$  و  $G_\omega = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  به ترتیب ترم تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف ویژه،  $Y_\omega = \beta \rho \omega$ ،  $Y_m = \beta^* k \rho \omega$  ترم‌های اتلاف انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف ویژه و  $D_\omega = 2\rho (1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$  ترم اصلاح انتشار متقابل،  $\sigma_\omega$ ،  $\sigma_k$  و ترتیب اعداد پرتل مربوط به معادلات انرژی جنبشی آشفته‌گی و اتلاف ویژه هستند.  $F_1$  و  $F_2$  توابع ترکیب وزنی هستند؛  $F_1$  در معادله‌ی فرکانس اتلاف ضرب شده است به‌گونه‌ی که در نزدیکی دیواره مقدار آن ۱ و از مدل  $kw$  در دور دست صفر و از معادله‌ی  $k - \varepsilon$  استفاده می‌شود. با این وجود این مدل نسبت به جریان برشی آزاد حساس است.

### ۳.۱.۲. مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی تطبیق مقیاس<sup>۴</sup>

در این مدل، یک معادله‌ی انتقالی برای مقیاس طولی و انرژی جنبشی آشفته‌گی تعریف شده است که قابلیت مدل کردن تأثیر حرکات گردابه‌های بزرگ روی جریان متوسط را دارد. در این روش با اضافه کردن ترم تولید  $QSAS$  در معادله‌ی انتقال اتلاف گردابه‌ی ویژه، مانع پیش‌بینی بیش از اندازه‌ی مقدار لزجت آشفته‌گی می‌شود. این مدل با تعریف مقیاس طولی فون کارمن، که متناسب با اندازه‌ی المان شبکه  $\Delta$  که از ریشه دوم اندازه حجم کنترل محاسبه می‌شود میرایی عدد موج بالا را کنترل می‌کند.

$$\frac{D}{Dt} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho C_\mu k \omega \quad (۷)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \alpha \frac{\omega}{k} G_k - \beta \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + QSAS + \frac{2\rho}{\sigma_{\omega^2}} (1 - F_1) \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۸)$$

$$QSAS = \max \left[ \rho \eta_r \kappa S^r \left( \frac{L_{vk}}{L_{vk}} \right)^r - C \frac{\rho k}{\sigma_\omega} \right] \times \left[ \max \left( \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), 0 \right]$$

$$L_{vk} = \max \left( \kappa \left| \frac{U'}{U''} \right|, C_s \sqrt{\frac{\kappa \eta_r}{(\beta/C_\mu) - \alpha}} \Delta \right),$$

$$\Delta = \Omega_{CV}^{1/2} \quad (۹)$$

مدل احتراقی نرخ محدود/اتلاف گردابه استفاده می شود. [۱۲]

$$R_{i,r} = \min(R_{i,r,1}, R_{i,r,2}) \quad (15)$$

به مخلوط سوخت پروپان و هوا اکسیدهای نیتروژن از دو روش ایجاد می شود: ۱. اکسیدهای نیتروژن حرارتی حاصل از واکنش نیتروژن موجود در هوا و اکسیدهای نیتروژن سریعی که حاصل زیرواکنش های پیوندهای کربنی با نیتروژن هواست. از آنجا که تولید مونواکسید نیتروژن ناشی از حرارت نسبت به دیگر سازوکارها بیشتر است، واکنش های مربوط به این روش در روابط ۲۰ تا ۲۲ ارائه شده است.



با فرض شبه پایا بودن  $d[N]/dt \cong 0$  و محاسبه ی غلظت رادیکال اکسیژن با در نظر گرفتن تعادل جزئی، نرخ تشکیل مونو اکسید نیتروژن از رابطه ی ۲۳ محاسبه می شود.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2] + k_{f,3}[OH]}\right)} \quad (23)$$

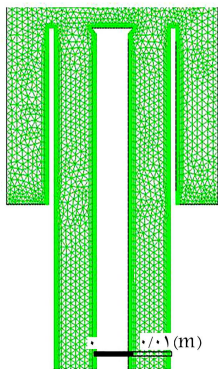
معادله ی انتقالی کسر جرمی  $NO$  مانند گونه های دیگر از رابطه ی ۲۴ تعیین می شود که در آن  $S_{NO}$  ترم چشمه که می تواند سازوکار حرارتی یا سریع باشد.

$$\nabla \cdot (\rho u Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (24)$$

### ۳. مدل سازی هندسی، شبکه بندی و شرایط مرزی حل

#### عددی

شماتیک مشعل مطابق شکل ۱ شامل یک میله ی مرکزی با سر بیخ که در مرکز لوله برای پایداری شعله ی پیش مخلوط تعبیه شده است. هندسه ی دوبعدی در ورک بنچ<sup>۸</sup> ANSYS ایجاد شده است. قطر ورودی هوا  $2.6d$ ، ورودی سوخت  $1.7d$ ، طول لوله عبوری مخلوط سوخت و هوا  $40d$  قطر آن  $2.75d$  است ( $d$  قطر میله ی مرکزی است). [۱۱] مشعل با مخلوط پروپان و هوا تغذیه می شود. واکنش استیومتریکی مخلوط پروپان و هوا با معادله ی ۲۵ تعریف می شود. نسبت هم آریزی به صورت



شکل ۱. شبکه بندی دامنه ی دوبعدی حل مشعل.

۲.۲.۲. مدل مفهوم اتلاف گردابه<sup>۶</sup>  
این مدل برهم کنش آشفته گی با احتراق را با جزئیات بیشتری مدل می کند. در مدل مفهوم اتلاف گردابه اثر نوسانات آشفته گی بر نرخ متوسط واکنش شیمیایی با ارجاع به آبشار انرژی آشفته گی لحاظ می شود. در این مدل سلول محاسباتی به صورت مفهومی به ۲ بخش تقسیم می شود: ساختارهای کوچک آشفته در مقیاس کلموگرف  $\xi$  و سیال پیرامونی. مدل های مختلفی از این روش توسعه یافته است که آخرین آن قابلیت انتقال جرم و انرژی به سیال پیرامون را در نظر گرفتن بسط واکنش به خارج از ساختار آشفته و نفوذ ادی ها به ساختار شعله و ضخیم کردن آن را دارد. سرعت این ادی ها با سرعت شعله متناسب است که در ضرایب  $C_\tau, C_\xi$  خود را نشان می دهد. در این مدل، احتراق در ساختارهای کوچک آشفته  $\xi = C_\xi \left(\frac{\nu}{k}\right)^{1/2}$  شکل می گیرد که نسبت حجمی آن توسط  $\gamma^* = \frac{m^*}{m} = \gamma_\lambda^*$  که برابر با جرم ساختارهای آشفته به جرم کل است و در مقیاس زمانی که توسط نرخ اختلاط  $\tau^* = \frac{1}{m^*} = C_\tau \left(\frac{\nu}{\xi}\right)^{1/2}$  واکنش انجام می شود، مشخص می شود. مطابق رابطه ی ۱۶ نرخ واکنش گونه ی  $i$  برابر است با:

$$\bar{R}_i = \bar{\rho} \dot{m} (Y_i^* - Y_i^0) \quad (16)$$

که در آن  $Y_i^*$  و  $Y_i^0$  به ترتیب کسرهای جرمی ساختار آشفته و سیال پیرامون است. متوسط خصوصیات اجزا از رابطه ی ۱۷ محاسبه می شود. ترم  $x$  کسر واکنش دهنده از ساختار آشفته را نشان می دهد که برای ساده سازی ۱ در نظر گرفته شده است در حالی که این مقدار بسته به مقدار واکنش دهنده ی موجود و میزان حرارت آزاد شده می تواند کم تر از ۱ تعریف شود.

$$\tilde{\psi} = \gamma^* \chi \psi^* + (1 - \gamma^* \chi) \psi^0 \quad (17)$$

با جایگذاری مقدار متوسط کسر جرمی و دبی ساختار آشفته نرخ واکنش متوسط، همچنین تصحیح ضریب مقیاس زمانی  $\frac{\gamma_\lambda^*}{m^*}$  نرخ متوسط واکنش از معادله ی ۱۸ محاسبه می شود، که در آن  $Y_i^*$  به ترتیب کسر جرمی گونه در ساختار آشفته ی کوچک و  $\tilde{Y}_i$  کسر جرمی میانگین سیال پیرامونی هستند. زمان اقامت متوسط، معکوس زمان تبادل جرمی بین سیال محیطی و ساختار آشفته تعریف می شود و  $x$  بخش از ساختار آشفته است که در آن واکنش اتفاق می افتد. پیشرفت واکنش  $R_{i,r}$  در مقیاس زمانی  $\tau^*$  در ساختارهای ریز برای تعیین مقدار کسر جرمی ساختار ریز  $Y_i^*$  مطابق رابطه ی ۱۲ با نرخ واکنش آرنهوس با الگوریتم آیس<sup>۷</sup> محاسبه می شود.

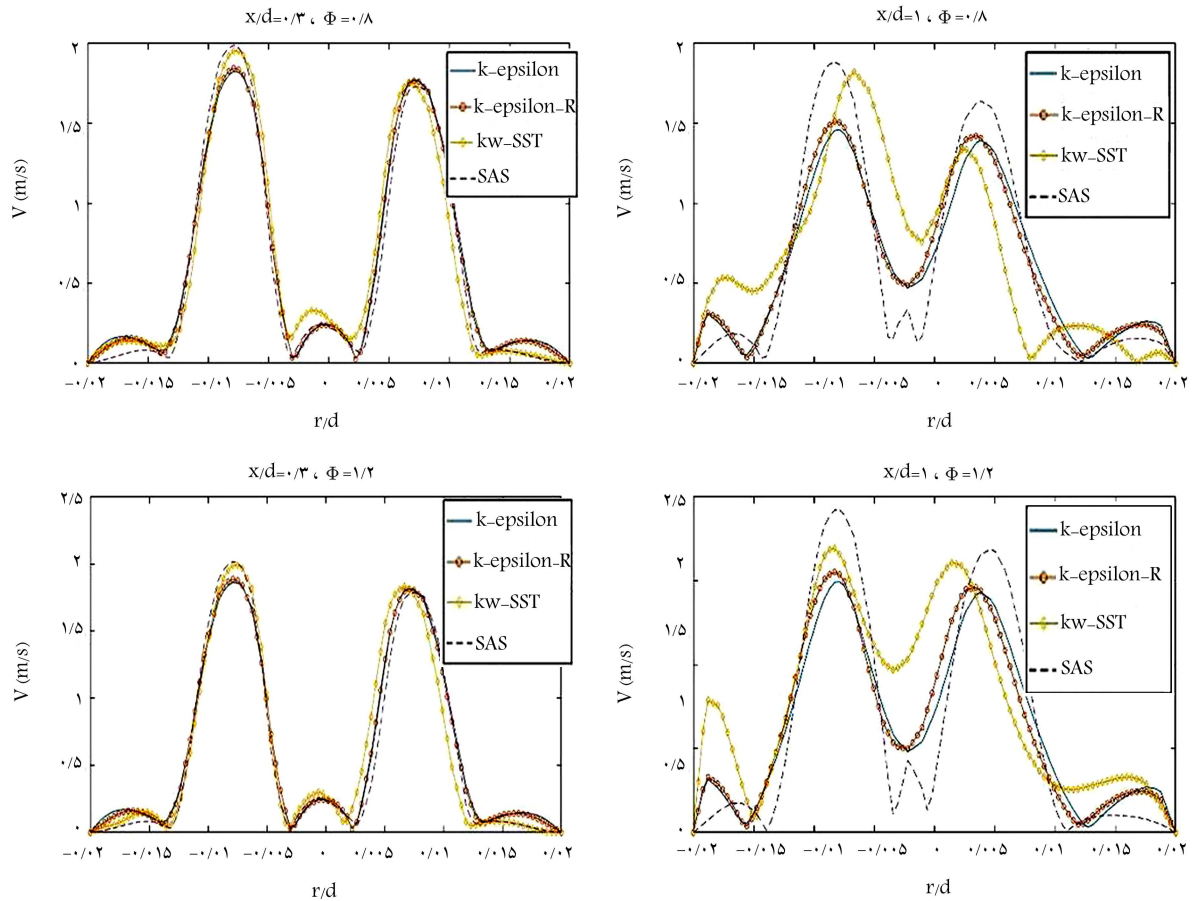
$$\bar{R}_i = \frac{\bar{\rho} \gamma_\lambda^* \chi}{\tau^* (1 - \gamma_\lambda^* \chi)} (Y_i^* - \tilde{Y}_i) \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho Y_i) = R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (19)$$

این مدل به دلیل حل جزئی واکنش احتراق، حجم محاسباتی بالایی نیاز دارد و زمانی که فرض احتراق سریع برقرار نباشد مورد استفاده قرار می گیرد. [۱۲]

### ۳.۲. مدل سازی اکسیدهای نیتروژن

معادله ی انتقالی اکسید نیتروژن با توجه به نرخ پایین احتراق آن در سازوکارهای تک گامی یا دوگامی در مرحله ی پردازش حل مدل می شود. در این احتراق با توجه

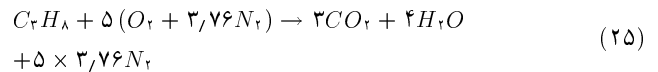


شکل ۲. پروفایل سرعت در فاصله محوری‌های مختلف برای مدل‌های مختلف آشفستگی.

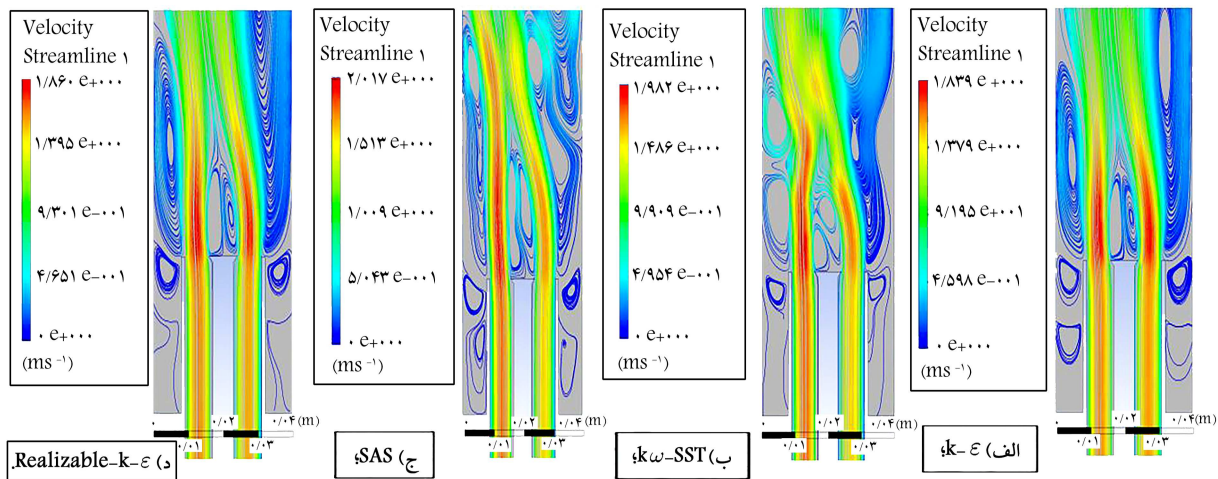
#### ۴. نتایج و بحث

پروفایل سرعت در مقاطع مختلف محوری برای جریان سرد در دو نسبت هم‌ارزی با مدل‌های مختلف آشفستگی رسم شده است. از مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۲ مشخص است که در نسبت هم‌ارزی پایین‌تر به دلیل پایین بودن دبی سوخت، عدم تقارن در پروفایل سرعت شعاعی نسبت به محور عمودی عبوری از صفر، کمی بیشتر از نسبت هم‌ارزی با دبی سوخت بالاتر است. پروفایل سرعت مدل‌های  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon-R$  به هم نزدیک‌اند، حال آن‌که مدل  $kw-SST$  و  $SAS$  به دلیل مدل کردن جریان نزدیک دیواره و گردابه‌ها، توزیع سرعت متفاوتی را به‌ویژه در مقاطع پایین دست از خود نشان می‌دهند. مدل  $Realizable-k-\epsilon$  در مقایسه با مدل  $k-\epsilon$ ، خصوصیات عدم تقارن جریان را در پایین دست جریان بهتر مدل می‌کند (شکل ۲) و به مدل  $k-\epsilon$  ارجحیت دارد. مدل  $kw-SST$  با این که لزجت گردابه‌یی را بسته به نرخ کرنش متوسط و دوران اندازه‌گیری می‌کند، با این حال نسبت به جریان برشی آزاد حساس است. از آن‌جا که در محل شعله، جریان با تغییر سطح مقطع روبرو بوده و جریان برشی آزاد ایجاد می‌شود، لزجت آشفستگی با دقت کم‌تر و سرعت بیشتر از مقدار واقعی به خصوص در ناحیه‌ی چرخشی داخلی محاسبه شده است. از بین مدل‌های رینولدز متوسط، مدل  $Realizable-k-\epsilon$  به دلیل توانایی آن در پیش‌بینی گسترش جت آزاد برای مدل‌سازی آشفستگی مناسب‌تر است. مدل  $SAS$  با در نظر گرفتن فیلتر ابعاد گردابه و لحاظ کردن انتقال انرژی از طریق آبشارادی ناشی از اتلاف گردابه، مقدار لزجت گردابه‌یی را دقیق‌تر از بقیه مدل‌های

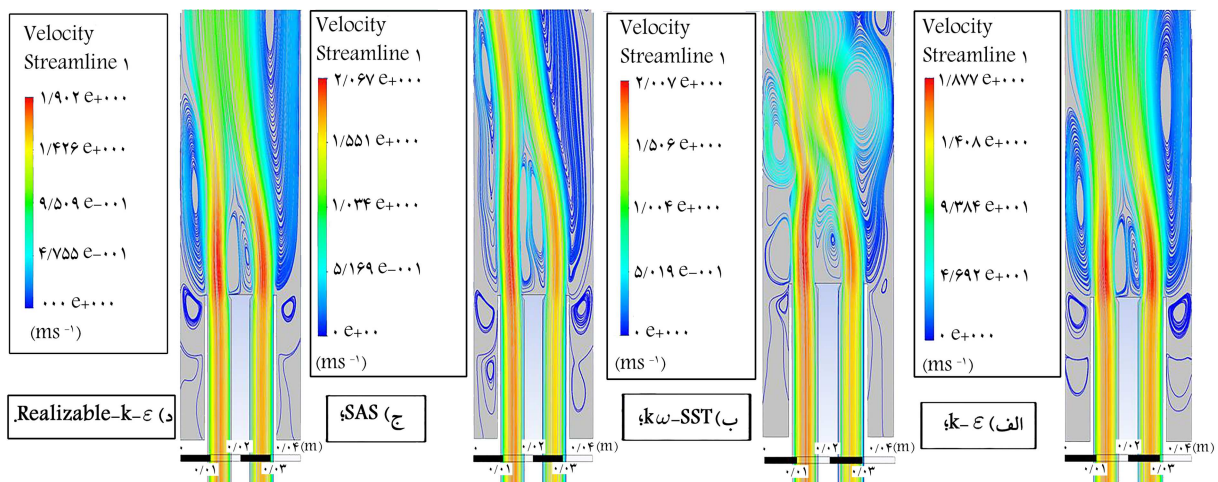
نسبت سوخت به هوا واقعی به نسبت سوخت به هوا استیومتریک تعریف می‌شود. با تغییر دبی سوخت، نسبت هم‌ارزی‌های مختلف با گام  $0.5$  مدل‌سازی شده است.



شبکه‌بندی سازمان‌یافته با لحاظ کردن لایه‌ی مرزی روی دیواره‌های میله‌ی مرکزی در ANSYS انجام شده است. برای مشاهده‌ی چروکیدگی‌های سطح شعله در اثر نوسانات انتقالی ناشی از ساختارهای آشفته کوچک باید از شبکه‌بندی با وضوح بالا استفاده کرد. پس از بررسی استقلال شبکه و گام زمانی که با استفاده از دمای متوسط بی‌بعد صورت گرفته است، اندازه‌ی شبکه با  $38395$  المان و گام زمانی  $0.01$  ثانیه به‌عنوان مقادیر مناسب برای مدل‌سازی عددی انتخاب شدند. جریان تراکم‌ناپذیر و گاز ایده‌آل فرض شده است. مخلوط سوخت و هوا در فشار اتمسفر و دمای محیط وارد مشعل می‌شوند. جریان هوا و سوخت با شرط ورودی سرعت و شرط مرزی خروجی، خروجی فشار تعریف شده است. دیواره‌ها بی‌دررو و با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. با توجه به دوبعدی بودن دامنه‌ی حل دوصفحه‌ی جانبی به‌صورت متقارن در نظر گرفته شده است. کوپل فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل انجام می‌شود. برای معادله‌ی فشار، گسسته‌سازی خطی برای کاهش خطای عددی و رسیدن به شعله‌ی مشخص‌تر انجام شده است. برای معادلات مومنتوم گسسته‌سازی مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است که به نسبت گسسته‌سازی خطی پایدارتر است.



شکل ۳. خطوط جریان در  $\varphi = 0,08$  برای مدل‌های آشفتگی.



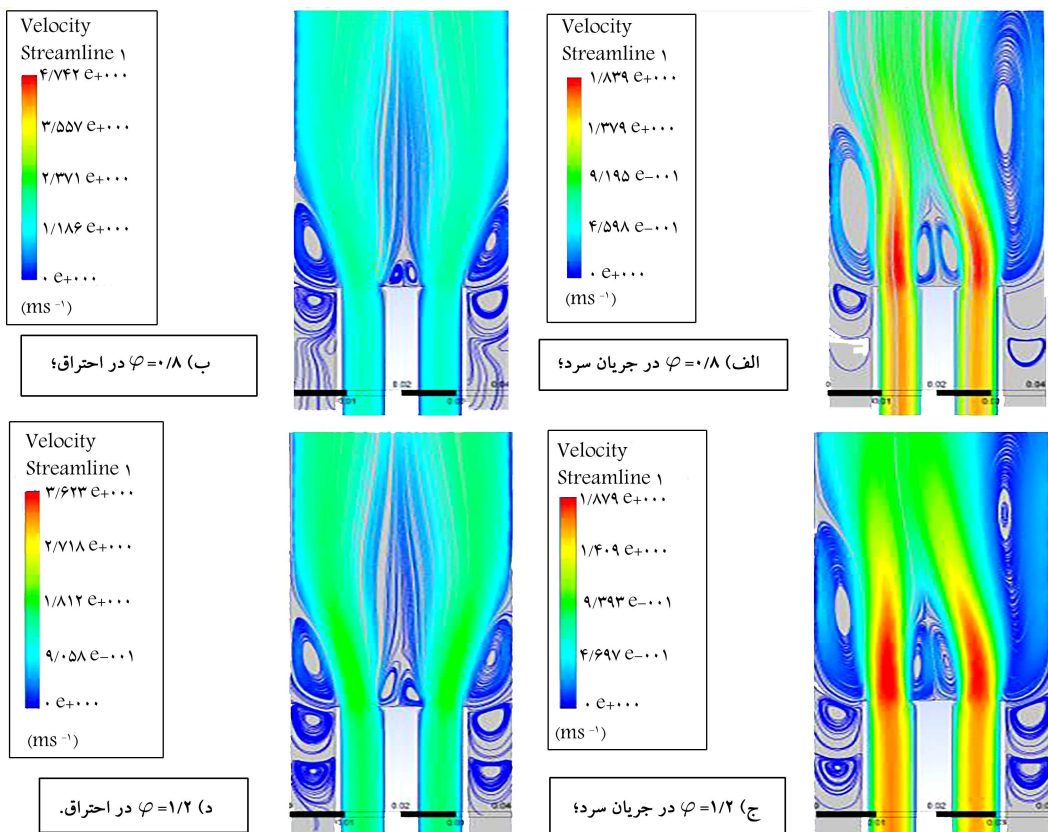
شکل ۴. خطوط جریان در  $\varphi = 0,12$  برای مدل‌های آشفتگی.

با ایجاد ناحیه‌ی چرخشی منطقه‌ی را ایجاد می‌کند که سرعت جریان پایین بوده و شعله با گازهای داغ می‌تواند آنجا لنگر بیندازد. همچنین شکست گردابه‌ها مطابق شکل ۴ باعث افزایش میزان اختلاط و پایداری شعله می‌شود.

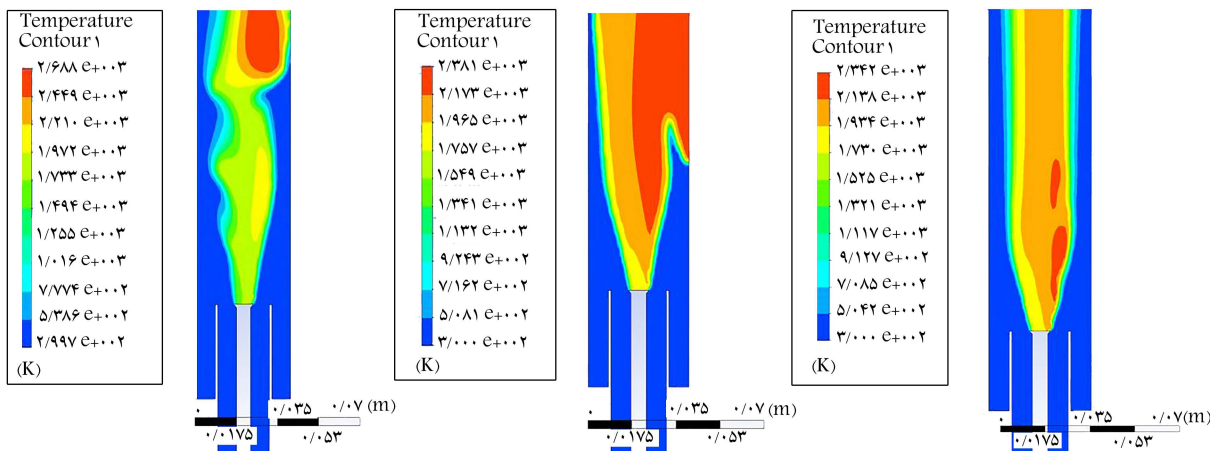
در شکل ۵ خطوط میدان جریان سرد و گرم در دو نسبت هم‌ارزی با مدل آشفتگی  $Realizable - k - \epsilon$  مقایسه شده است تا تأثیر احتراق در تغییر الگوی جریان نشان داده شود. در زمان احتراق انبساط گازها به دلیل آزاد شدن حرارت ناشی از واکنش شیمیایی است باعث افزایش سرعت محوری شده و گردابه‌های داخلی کوچک‌تر شده‌اند. همچنین گردابه‌های خارجی با افزایش سرعت محوری و انبساط گازهای داغ متقارن می‌شود.

چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، شعله‌ی پیش‌مخلوط V شکل با سوخت پروپان و هوا روی شعله‌نگهدار به دلیل وجود ناحیه چرخشی پایین دست میله مرکزی پایدار شده است. کنتور دما برای احتراق شعله‌ی پیش‌مخلوط با نسبت هم‌ارزی ۱ با سه سازوکار مختلف نشان داده شده است. دمای آدیاباتیک شعله‌ی پروپان  $2253 K$  است. در مدل احتراقی نخب محدود/انلاف گردابه‌ی دوگامی، چون برهم‌کنش آشفتگی و احتراق مدل نمی‌شود، ساختار شعله‌ی V شکل آرام است و به دلیل شرط مرزی دیواره بی‌دررو و لحاظ نکردن زیرواکنش‌ها دمای شعله در ناحیه‌ی بالاتر از دمای آدیاباتیک است. در مدل احتراقی مفهوم انلاف گردابه‌ی، ساختار شعله به دلیل

رینولدز متوسط مدل می‌کند و رفتارش به‌ویژه در نسبت هم‌ارزی‌های پایین که بیشتر ناپایداری‌های ایجاد می‌شود دقیق‌تر است. اگرچه حجم محاسباتی بالاتری نسبت به مدل‌های رینولدز متوسط دارد. بنابراین در مدل کردن ناپایداری‌های جریان، برای حل گذرا از مدل آشفتگی SAS استفاده شده است. نتایج حاصل از خطوط جریان مطابق شکل ۳ این تحلیل را تأیید می‌کند. چنان‌که اشاره شد، به دلیل تفاوت در سرعت جریان ورودی هوا و سوخت در سر مشعل خطوط جریان عبوری از دو سر میله‌ی مرکزی کاملاً متقارن نبوده و بنابراین گردابه‌های بیرونی ایجاد شده نیز ابعاد متفاوت دارند. این عدم تقارن توسط  $Realizable - k - \epsilon$  از میان مدل‌های رینولدز میانگین و مدل SAS با دقت بیشتری مدل شده است. در مدل  $k\omega - SST$  در مقایسه با سه مدل آشفتگی دیگر، همانند پروفایل سرعت پایین دست که بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده بود، ساختار گردابه‌های داخلی نیز نامتقارن مدل شده است. در حالی که در مدل SAS ابعاد متفاوت گردابه‌های داخلی نیز محاسبه شده و مدل  $Realizable - k - \epsilon$  نیز با تقریب خوبی ساختار گردابه‌های داخلی را مدل می‌کند. با توجه به این که در مدل رینولدز میانگین نسبت به زمان متوسط گیری می‌شود، اثر ترم‌های نوسانی کم‌تر دیده شده در حالی که، اندازه‌ی گردابه‌ها در مدل SAS ریزتر از ساختار گردابه‌ها در مدل‌های آشفتگی رینولدز متوسط است. خصوصیات آیرودینامیکی محفظه هم در ساختار شعله تأثیرگذار است. میله‌ی مرکزی



شکل ۵. خطوط جریان.



الف) نرخ محدود/اتلاف گردابه بی دو گامی؛ ب) مفهوم اتلاف گردابه بی دو گامی؛ ج) مفهوم اتلاف گردابه بی با ساز و کار کاهش یافته کمکین.

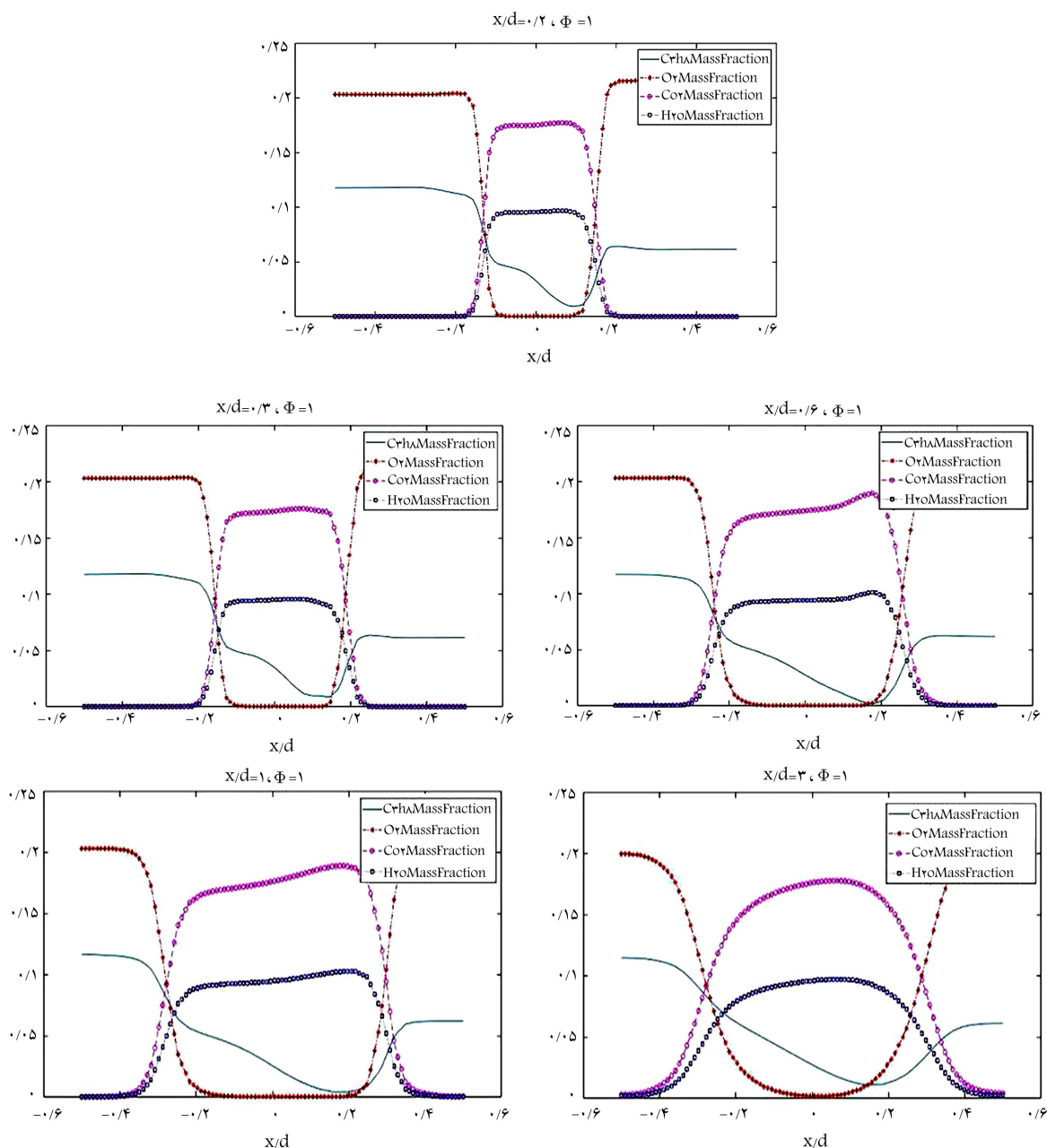
شکل ۶. ساختار شعله در  $\phi = 1$  با استفاده از مدل احتراقی.

کردن ۲۸ گونه و ۱۱۴ واکنش احتراق پروپان و هوا با استفاده از سازوکار کاهش یافته کمکین در مدل مفهوم اتلاف گردابه بی، واکنش های میانی در نظر گرفته شده است. عدم توزیع یکنواخت سوخت و هوا باعث می شود که نرخ زیرواکنش ها در نواحی مختلف متفاوت بوده و ساختار شعله را بیش از پیش تحت تأثیر قرار دهد که اعوجاج های سطح شعله بیانگر این اثر است و ساختار آن به ساختار شعله ی تجربی نزدیک تر است.

اجزای اصلی احتراق در فاصله های مختلف محوری از سر مشعل برای نسبت هم ارزی ۱ با مدل احتراق مفهوم گردابه بی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور

لحاظ کردن اثر گردابه ها بر فرایند احتراق تغییر می کند. همچنین به دلیل عدم اختلاط کامل سوخت و هوا در طول مسیر، توزیع دمایی و همچنین ساختار شعله نامتقارن است.

توزیع دمایی مدل های احتراقی دوگامی تقریباً نزدیک به هم است. از آن جا که مدل اتلاف گردابه بی نرخ واکنش شیمیایی را در داخل ادی ها با روش آرنهوس محاسبه می کند دمای متوسط شعله را با تقریب خوبی پیش بینی می کند. ولی دمای بیشینه کمی بالاتر از دمای آدیاباتیک مدل شده است که علت آن لحاظ نکردن رادیکال های میانی حاصل از فرایندهای گرماگیر در مدل های دوگامی است. با لحاظ



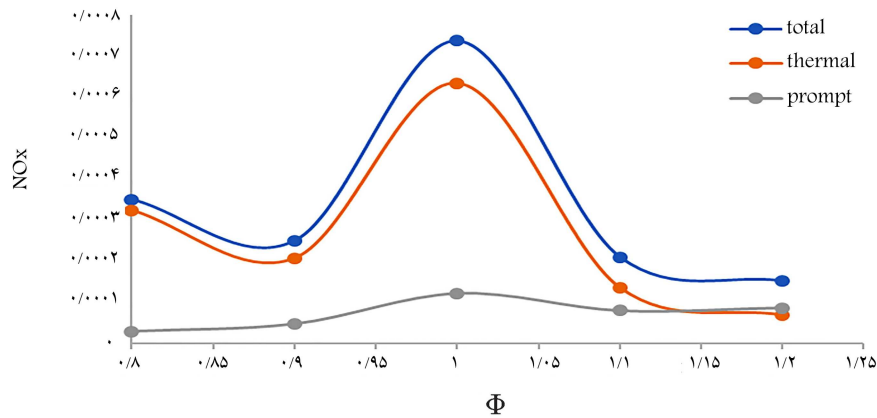
شکل ۷. نمودار غلظت اجزای اصلی احتراق در فواصل مختلف محوری برای  $\varphi = 1$ .

به  $0.8 - 1.2$  کاهش می‌یابد. علت این تفاوت در کاهش نوسانات مدل رینولدز متوسط  $Realizable-k-\epsilon$  است که باعث می‌شود شعله تا نسبت هم‌ارزی کم‌تری همچنان پایدار بماند و علت خاموشی شعله کم‌تر بودن میزان حرارت آزاد شده واکنش در مقایسه با حرارت اتلافی است. در حالی که در شبیه‌سازی با مدل آشفستگی SAS، به دلیل عدم تقارن گردابه‌ها، جاری شدن گردابه‌ها باعث جدایش شعله از لبه‌ی شعله‌نگهدار و خاموشی آن می‌شود؛ اگرچه هنوز سوخت و هوا حرارت کافی برای اشتعال شعله را دارد. بازه پایداری برای مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه‌یی با سازوکار چندگامی کاهش‌یافته‌ی کم‌کین برای احتراق پروپان و هوا و مدل آشفستگی SAS،  $0.55 - 1.2$ ، محاسبه شد. از آن‌جا که زیرواکنش‌های مختلف گرماده و گرماگیر فعال می‌شود، شعله در نسبت هم‌ارزی‌های کم‌تر همچنان پایدار است و احتراق رقیق‌تر امکان‌پذیر است.

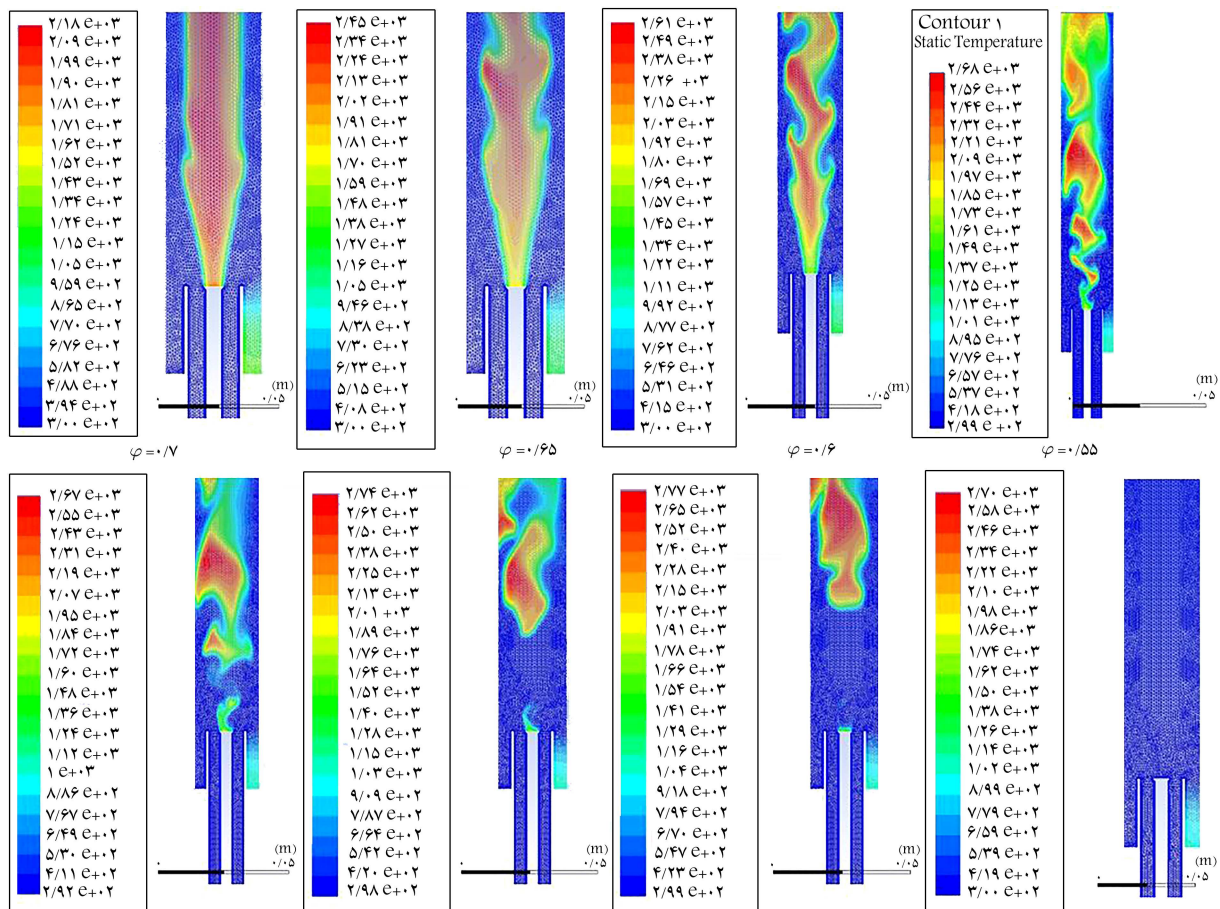
که در نمودارها پیداست، مقدار پروپان نسوخته در ناحیه‌ی گردابه‌یی، حاکی از توزیع غیریکنواخت سوخت است. هرچند که غلظت هوا در داخل ناحیه‌ی واکنشی نزدیک صفر است. در فواصل محوری دورتر از سر شعله‌نگهدار با باز شدن شعله‌ی سوخت و هوا از کنارها به دلیل وجود گردابه‌ها به داخل ناحیه‌ی چرخشی کشیده شده و محترق می‌شود که ایجاد نواحی دمابالا در سمت راست شعله‌نگهدار می‌کند. این امر موجب می‌شود توزیع شعاعی غلظت اجزا از حالت متقارن خارج شود؛ کنترل دمایی مؤید همین مطلب است.

بازه پایداری شبیه‌سازی شده برای شعله‌ی V شکل با استفاده از مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه‌یی با سازوکار دوگامی با مدل آشفستگی  $Realizable-k-\epsilon$ ،  $0.7 - 1.2$  است. در حالی که بازه پایداری با همان مدل احتراق و مدل آشفستگی SAS





شکل ۸. غلظت مونو اکسید نیتروژن حاصل از روش‌های حرارتی و سریع.



شکل ۹. ساختار شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف (بالا) رفتار گذرای شعله در نسبت هم‌ارزی  $\varphi = 0.75$  با گذر زمان (پایین).

روش حرارتی را در تولید میزان مونواکسید نیتروژن نشان می‌دهد (شکل ۸). در احتراق رقیق، میزان مونواکسید نیتروژن منتشره کمی بیشتر از احتراق غلیظ است. علت این امر عدم اختلاط کامل سوخت و هوا در حالت رقیق است. در نسبت هم‌ارزی ۱، به دلیل احتراق کامل، دمای شعله افزایش یافته که منجر به افزایش غلظت مونو اکسید نیتروژن تولیدی می‌شود. همچنین ناپایداری شعله در نسبت هم‌ارزی  $\varphi = 0.8$  باعث ایجاد نواحی گرم در بخش‌هایی از شعله می‌شود که افزایش میزان مونو اکسید نیتروژن محاسبه شده در خروجی نیز تأیید کننده آن است.

هرچند که بازه پایداری محاسبه شده از مدل احتراق مفهوم اتلاف گرانبه‌ی دوگامی با مدل آشفستگی SAS تطابق کامل با نتایج تجربی دارد اما ساختار شعله متفاوت است. این در حالی است که بازه پایداری مدل احتراقی اتلاف گرانبه‌ی چندگامی با مدل SAS، بازه پایداری وسیع‌تری از نتایج تجربی را پوشش می‌دهد، ولی دینامیک شعله در آستانه خاموشی رفتار مشابهی با نتایج تجربی دارد. علت پیش‌بینی نسبت هم‌ارزی پایین‌تر در این مدل، آشفستگی کم‌جرایان در مقایسه با شعله‌ی تجربی است. میزان مونواکسید نیتروژن حاصل از روش‌های حرارتی و سریع، نقش غالب

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، احتراق شعله‌ی پیش مخلوط V شکل پروپان و هوا با استفاده از مدل‌های آشفستگی و احتراقی مختلف در نرم‌افزار فلوئنت بررسی و نتایج مقایسه شده است. همچنین بازه پایداری و رفتار گذرای شعله در آستانه‌ی خاموشی مطالعه شده است. نتایج کار پژوهشی حاضر به اختصار بیان شده است.

۱. ابتدا شبیه‌سازی جریان سرد برای انتخاب مدل آشفستگی صورت گرفته و مدل  $Realizable - k - \epsilon$  برای بررسی پایا و مدل SAS برای بررسی دینامیک شعله انتخاب شده است؛

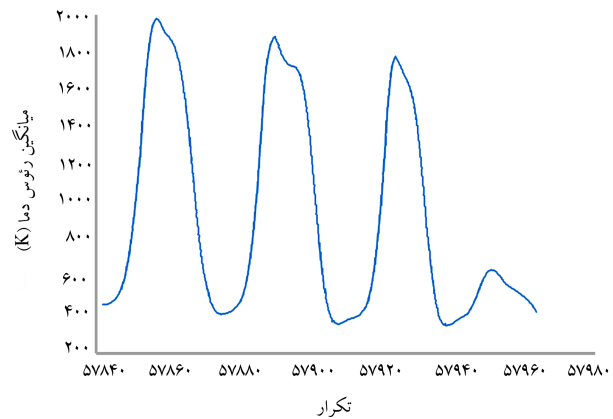
۲. سپس برای شبیه‌سازی احتراق، مدل‌های مختلف احتراقی استفاده و نتایج مقایسه شده است. بازه پایداری شعله‌ی V شکل با مدل آشفستگی SAS و مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه‌ی دوگامی با نتایج تجربی تطابق کامل دارد، با این وجود بازه پایداری مدل SAS با مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه‌ی چندگامی  $\varphi = 0.55 - 1.2$  محاسبه شده که بازه پایداری تجربی را پوشش می‌دهد و مرز خاموشی شعله در نسبت هم‌ارزی پایین‌تری اتفاق می‌افتد و علت آن وجود زیروکنش‌های گرماده است. این مدل، رفتار دینامیکی ساختار شعله را در آستانه‌ی خاموشی با در نظر گرفتن ترم‌های نوسانی بهتر محاسبه می‌کند. اختلاف موجود در نسبت هم‌ارزی مرزی نتایج تجربی با مدل مفهوم اتلاف گردابه‌ی چندگامی را در کم بودن شدت آشفستگی شبیه‌سازی نسبت به مدل تجربی می‌توان دانست؛

۳. میزان اکسیدهای نیتروژن با دمای متوسط شعله تغییر می‌کند. مقدار این آلاینده‌ها در احتراق رقیق، در مقایسه با احتراق غلیظ کمی بیشتر است که به دلیل عدم اختلاط کامل سوخت و هوا، لنگر انداختن بیشتر شعله در یک طرف شعله‌نگهدار، ایجاد ناحیه‌ی گرم محلی و همچنین ناپایداری‌های شعله در نسبت هم‌ارزی‌های کم‌تر از ۱ است. با افزایش میزان سوخت به دلیل انجام احتراق کامل در نسبت هم‌ارزی ۱، دمای متوسط و در ادامه میزان آلاینده‌های نیتروژن افزایش می‌یابد. اگرچه در احتراق غلیظ میزان سوخت افزایش می‌یابد ولی به دلیل اختلاط بهتر سوخت و هوا که ناشی از نزدیکی سرعت جریان آنهاست، دمای متوسط کم‌تر شده و از میزان مونواکسید نیتروژن کاسته می‌شود؛

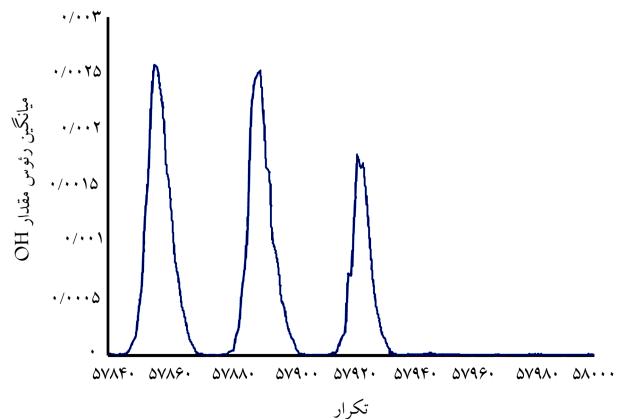
۴. رفتار گذرای شعله‌ی رقیق در مرز خاموشی ابتدا نوسانی بوده که ناشی از جدایش محلی شعله در اثر برهم‌کنش گردابه‌ها با سطح شعله و جاری شدن آنهاست. در آستانه‌ی خاموشی، بخشی از شعله روی شعله‌ی نگهدار لنگر انداخته در حالی که بخشی دیگر با سرعت جریان به صورت محلی جدا شده و به پایین دست منتقل می‌شود. سطح شعله‌ی پیش مخلوط به دلیل اعوجاج‌های ناشی از برهم‌کنش گردابه‌ها با جبهه‌ی شعله باز شده است. با کاهش میزان سوخت، حرارت انتقالی به اطراف بیشتر از حرارت آزاد شده از احتراق است و با افت ناگهانی دما و رادیکال‌های OH باقی شعله به طور کامل خاموش می‌شود.

## تقدیر و تشکر

«از حمایت مالی پژوهشگاه نیرو تقدیر می‌گردد». (شماره قرارداد ۱۷۵۲/۹۵/۱۱۳۰)



شکل ۱۰. نمودار تغییرات دما برحسب زمان در مرز خاموشی.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات رادیکال OH برحسب زمان در مرز خاموشی.

رفتار شعله از احتراق پایدار تا حد خاموشی با گام نسبت هم‌ارزی ۰/۵ شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی شعله در ابتدا در نسبت هم‌ارزی  $\varphi = 0.55$  پایدار است. با کاهش میزان سوخت مطابق شکل ۹ (بالا) برهم‌کنش آشفستگی و گردابه باعث ایجاد اعوجاج در سطح شعله می‌شود که بخشی از شعله به دلیل جاری شدن گردابه‌ها انرژی حرارتی ناشی از شعله را از ناحیه‌ی چرخشی جدا کرده و به جریان اصلی محوری منتقل می‌کند. در خاموشی محلی شعله بخشی از شعله روی شعله‌ی نگهدار لنگر انداخته در حالی که بخشی دیگر خاموش شده است.

همچنین، دینامیک گذرای شعله در نسبت هم‌ارزی  $\varphi = 0.5$  از آستانه‌ی ناپایداری تا خاموشی کامل در شکل ۹ (پایین) نشان داده شده است. با کاهش میزان سوخت، دمای شعله برای اشتعال مجدد سوخت و هوا کافی نبوده و شعله به سمت خاموشی می‌رود. میزان غلظت رادیکال OH مشخص‌کننده‌ی نرخ حرارت آزاد شده از شعله است و در اشتعال، خاموشی و سرعت شعله نقش مهمی دارد. بنابراین نمودار دما و غلظت رادیکال OH لحظه‌ی شاخصه‌ی مناسبی برای بررسی خاموشی شعله است. دمای متوسط شعله و رادیکال‌های OH مطابق شکل ۱۰ و ۱۱ به صورت نوسانی تغییر می‌کند که مؤید رفتار نوسانی ساختار شعله به دلیل جاری شدن گردابه‌ها و جدا کردن متناوب بخش‌هایی از شعله است. سپس با کاهش بیشتر میزان سوخت، دما و غلظت رادیکال OH به طور ناگهانی افت می‌کند. با رسیدن دما به دمای زیر اشتعال پروپان و هوا، بخشی از شعله که هنوز روی شعله‌نگهدار هم بود به طور کامل خاموش می‌شود.

## پانوشتها

1. Large Eddy Simulation (LES)
2. Probability Density Function (PDF)
3. Detached Eddy Simulation (DES)
4. Scale Adaptive Simulation(SAS)
5. Finite-Rate/Eddy-Dissipation (FR/ED)
6. Eddy Dissipation Concept(EDC)
7. In Situ Adaptive Tabulation (ISAT)
8. workbench

## منابع (References)

1. Birbaud, A.L., Ducruix, S., Durox, D. and et al. "The nonlinear response of inverted 'V' flames to equivalence ratio nonuniformities", *Combust. Flame*, **154**(3), (2008) doi: 10.1016/j.combustflame.2008.05.017.
2. Baej, H. "CFD predictions of Swirl burner aerodynamics with variable outlet configurations", *Int. J. Energy Technol*, pp. 31-43 (2019) doi: 10.32438/ijet.0615.
3. Liu, X., Zheng, H., Yang, J. and et al. "LES-PDF modeling of blowout analysis in slit bluff-body stabilized flames", *Int. J. Spray Combust. Dyn*, **7**(2), (2015) doi: 10.1260/1756-8277.7.2.131.
4. Andreini, A., Bianchini, C. and Innocenti, A. "Large eddy simulation of a bluff body stabilized lean premixed flame", *J. Combust*, **2014**, (2014) doi: 10.1155/2014/710254.
5. West, J.P., Groth, C.P.T. and Hu, J.T.C. "Application of detached eddy simulation to a bluff body flame stabilizer in duct flow", (Jan. 2017) doi: 10.2514/6.2017-1793.
6. Li, Y., Zheng, H. and Cai, L. "Numerical simulation on H2 rich blowout limit in bluff-body burner", *Ind. Eng. Chem. Res.* **52**(5), (2013) doi: 10.1021/ie3008874.
7. Sudarma, A.F., Al-Witry, A. and Morsy, M.H. "Rans numerical simulation of lean premixed bluff body stabilized combustor: comparison of turbulence models", *J. Therm. Eng.*, **3**(6), (2017) doi: 10.18186/journal-of-thermal-engineering.353668.
8. Wu, B., Zhao, X., Chowdhury, B.R. and et al. "A numerical investigation of the flame structure and blowoff characteristics of a bluff-body stabilized turbulent premixed flame", *Combust. Flame*, **202**, (2019) doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.026.
9. Benim, A.C. and Pfeiffelmann, B. "Comparison of combustion models for lifted hydrogen flames within RANS framework", *Energies*, **13**(1), (2019) doi: 10.3390/en13010152.
10. Jovanović, R.D., Strug, K., Swiatkowski, B. and et al. "Experimental and numerical investigation of flame characteristics during swirl burner operation under conventional and oxy-fuel conditions", *Therm. Sci*, **21**(3), (2017) doi: 10.2298/TSCI161110325J.
11. Nabatian, N. and Farschi, M. "V-Shaped premixed flame response to acoustic excitations", 3rd Combustion Conference of Iran, Feb (in persian) (2010).
12. Transport, P.D.F. and et al., *Chapter 13. Modeling Species Transport and Finite-Rate Chemistry*, Reactions (2003).
13. Bösenhofer, M., Wartha, E.M., Jordan, C. and et al. "The eddy dissipation concept-analysis of different fine structure treatments for classical combustion", *Energies*, **11**(7), (2018) doi: 10.3390/en11071902.