

شبیه‌سازی عددی شعله غیر پیش‌آمیخته و بر خاسته هیدروژن با هدف بررسی اثر دمای جریان هم‌سو بر ارتفاع بر خاستگی شعله

جاماسب پیرکندی
استادیار- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
jamasb_p@yahoo.com

مهدی جهرمی
استادیار- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mjahromi@mut.ac.ir

محمد هادی دهقان
دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mhd_71@mut.ac.ir

مصطفی محمودی
استادیار- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

سیستم احتراقی وارد شده و با سوخت سرد مخلوط و در نهایت واکنش می‌دهد. وجود عمل اختلاط بین اکسیدکننده و فواره (Jet) سوخت و همچنین وقوع خود اشتعالی، در این وضعیت، سبب ایجاد شعله‌های بر خاسته می‌شود. چالش اصلی در این نوع شعله پیش‌بینی فاصله اشتعال بوده و از دیدگاه عددی، پیش‌بینی آن از طریق مدل‌سازی احتراق، به دلیل ارتباط شدید احتراق با خصوصیات سینتیکی، موضوعی بسیار دشوار است. مدل‌سازی جریان‌های فوق یکی از موضوعات چالش برانگیز در بحث احتراق بوده و همین امر سبب شده تاکنون تئوری‌های مختلفی در ارتباط با سازوکارهای شعله‌های بر خاسته مطرح شود. مقالات متعددی در خصوص مطالعه سازوکارهای پایدارسازی در شعله‌های بر خاسته فواره نفوذی و همچنین در زمینه خود اشتعالی مطرح شده است [۱-۳]. ضمن اینکه روابط تجربی مختلفی برای پیش‌بینی ارتفاع بر خاستگی ارائه شده که توسعه این روابط صرفاً بر مبنای پارامترهای کلی در سیستم‌های احتراقی است. تاکنون دیدگاه‌های مدل‌سازی مختلفی مانند روش ممان شرطی (CMC) [۴]، فلیملت [۵]، مفهوم اتلاف گردابه (EDC) [۶،۷] و تابع دانسیته احتمال (PDF) [۸] برای پیش‌بینی رفتار شعله‌های نفوذی بر خاسته آشفته استفاده شده است. در کار حاضر، یک شعله بر خاسته فواره نفوذی در جریان هم‌سوی گرم با استفاده از داده‌های تجربی کابرا و همکارانشان [۹] بررسی می‌شود. به دلیل آن‌که در فرایند خوداشتعالی پدیده اشتعال نقش مهمی را در تعیین ارتفاع بر خاستگی شعله ایفا می‌کند، استفاده از دیدگاه‌های پیشرفته با توانایی پیش‌بینی اشتعال و خاموشی موضعی امری ضروری است. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، دو دیدگاه مفهوم اتلاف گردابه [۷] و تابع دانسیته احتمال [۸] نتایج مناسبی را برای رفتار و محل بر خاستگی این شعله در مقایسه با داده‌های تجربی ارائه می‌کنند. مهرولد و همکارانش [۷] نشان دادند، در مدل EDC انتخاب مدل آشفستگی در تعیین محلی بر خاستگی و پیش‌بینی میدان‌های دما و اجزا بسیار مهم است. مصری و همکارانش [۸] مطالعه وسیعی را با استفاده از دیدگاه PDF توأم با کمیات اسکالر و مدل آشفستگی $k - \epsilon$ استاندارد بر روی شعله مذکور و محل بر خاستگی آن انجام دادند و یکی از دلایل انحراف مقادیر عددی از داده‌های تجربی را ناشی از مدل آشفستگی $k - \epsilon$ استاندارد عنوان کردند. شایان ذکر است مدل آشفستگی $k - \epsilon$ استاندارد در فواره‌های مدور، مقادیر نرخ گسترش فواره را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده و این مشکل با تغییر $C_{1\epsilon}$ از ۱/۴۴ به ۱/۶ در معادله نرخ اتلاف بر طرف می‌شود. مصری و همکارانش [۸] نشان دادند اصلاح ضرایب مدل $k - \epsilon$ استاندارد بهبودی در نتایج میدان دما و اجزا در این شعله ایجاد نکرده و دلیل این امر تغییرات شدید دانسیته در جریان احتراقی است که مدل آشفستگی $k - \epsilon$ عاری

خود اشتعالی یکی از روش‌های پایدارسازی بوده که در آن جریان اکسیدکننده در دمای بالا به سیستم احتراقی وارد و با سوخت سرد مخلوط شده و در نهایت واکنش می‌دهد. وجود عمل اختلاط بین اکسیدکننده و فواره سوخت و همچنین وقوع خود اشتعالی، در این وضعیت، سبب ایجاد شعله‌های بر خاسته می‌شود. چالش اصلی در این نوع شعله پیش‌بینی فاصله اشتعال و ارتفاع بر خاستگی بوده که از دیدگاه عددی، پیش‌بینی آن از طریق مدل‌سازی احتراق، به دلیل ارتباط شدید اشتعال با خصوصیات سینتیکی، موضوعی بسیار دشوار است. در این مطالعه به بررسی مدل مرجع کابرا پرداخته شده است. مدل آشفستگی مورد استفاده مدل کلاسیکون بهبود یافته بوده و مکانیزم شیمیایی احتراق هیدروژن استفاده شده شامل ۱۰ گونه و ۲۱ واکنش بوده است. مدل احتراقی مدل مفهومی اتلاف ادی انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی مطابقت مناسبی با میدان دمای نتایج آزمایشگاهی داشته به طوری که حداکثر خطای محاسبه شده بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برای میدان دما ۵/۸ درصد بوده است. ارتفاع بر خاستگی شعله با افزایش دمای جریان هم‌سو کاهش می‌یابد. نتایج ارتفاع بر خاستگی شعله برای دمای ۱۰۳۰ و ۱۰۴۵ کلوین مطابقت کامل با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با گردابه‌های بزرگ داشته و برای دمای ۱۰۶۰ کلوین مقدار ارتفاع بر خاستگی ۲/۳ برابر قطر نازل، کمتر از نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پیش‌بینی شده است.

کلمات کلیدی: احتراق هیدروژن، ارتفاع بر خاستگی، شعله غیر پیش-آمیخته، شعله بر خاسته، مدل مفهومی اتلاف ادی

مقدمه

احتراق اولین فناوری انسان، به عنوان یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های طبیعت شناخته شده که علی‌رغم ارتباط دیرینه بشر با آن، همچنان زمینه‌های ناشناخته بسیاری دارد. مشعل‌های غیر پیش‌آمیخته، به دلیل طراحی ساده و عملکرد ایمن، به طور گسترده در سیستم‌های صنعتی استفاده می‌شوند. نیاز به توان بالای حرارتی در سیستم‌های صنعتی مستلزم به کارگیری دبی جریان در مشعل‌های غیر پیش‌آمیخته است. افزایش دبی جریان فراتر از حد معینی معمولاً منجر به خاموشی شعله می‌شود. از این رو، در سیستم‌های احتراقی با توان حرارتی بالا، به منظور جلوگیری از خاموشی شعله، روش‌های پایدارسازی مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان یک معیار اصلی در طراحی در نظر گرفته می‌شوند [۱]. انتخاب این روش‌ها وابسته به مقدار دبی جریان ورودی و یا به صورت معادل وابسته به توان حرارتی مشعل است. خود اشتعالی یکی از روش‌های پایدارسازی بوده که در آن جریان اکسیدکننده در دمای بالا به

استفاده شده که در هر یک از آن ها، از معادلات انتقال با معادلات جبری برای محاسبه خواص فیزیکی مانند انرژی جنبشی استفاده می‌شود. بنابر تحقیقات گذشته [۱۵، ۲]، در پژوهش حاضر از مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی جریان استفاده می‌شود. معادلات انتقال در مدل $k - \epsilon$ استاندارد به وسیله لاندر و اسپالدینگ ارائه شده که به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (۶)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (۷)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۸)$$

ثابت‌های مدل آشفتگی در جدول شماره ۱ به نمایش درآمده‌است.

جدول شماره ۱. ثابت های مدل آشفتگی کا اسیلون بهبودیافته

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ϵ
۱/۶	۱/۹۲	۰/۹۲	۱	۱/۳

مدل احتراقی

از مهم‌ترین عوامل موثر در شبیه‌سازی دقیق جریان‌های واکنشی، مدل احتراق است. مدل‌سازی واکنش شیمیایی یکی از پیچیده‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی احتراق است، زیرا، علاوه بر تعیین مقدار گونه‌ها و محصولات احتراق، بایستی آهنگ آزاد شدن انرژی حاصل از ترکیب سوخت و اکسیدکننده نیز تعیین‌شود. آهنگ آزاد شدن انرژی در اثر پیشرفت واکنش‌های احتراقی بر مقدار و توزیع دما در نقاط مختلف موثر بوده و دمای هر نقطه بر رفتار جریان از جمله مؤلفه‌های سرعت، فشار و مشخصات سیال در آن نقطه تاثیر می‌گذارد. سرعت پیشرفت واکنش‌های شیمیایی و آزاد شدن گرما به سرعت ترکیب سوخت و اکسیدکننده بستگی دارد. آهنگ ترکیب سوخت و اکسیدکننده تابع عوامل مختلف از جمله اختلاط سوخت و هوا، غلظت واکنش دهنده‌ها، دمای محفظه احتراق و غیره است. بنابراین، مدلی مناسب است که اثر تمام این عوامل را منظور کند. وقتی گونه‌ها به صورت گازی می‌باشند مدل Species Transport یک معادله انتقال را برای هر گونه به صورت معادله شماره ۳ حل می‌شود

$$Y_i \text{ نسبت جرمی گونه آم، } \lambda \text{ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه، } C_{p,i}$$

ظرفیت گرمایی فشار ثابت گونه آم، Le عدد لوئیس، h آنتالپی، T دما، ω نرخ تولید جزء i توسط واکنش شیمیایی است که به عنوان منبع در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه از مکانیزم یترا [۱۰] برای هیدروژن

از در نظر گرفتن آن است. سنتیک شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه از سازوکار یترا [۱۰] استفاده شده که دربرگیرنده ۲۱ واکنش است. در ادامه به بررسی معادلات حاکم جریان واکنشی پرداخته خواهد شد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان واکنشی آشفته شامل معادله بقای جرم، بقای تکانه، بقای انرژی و بقای جرم اجزای واکنشی بوده که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F \quad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} = \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\lambda}{Le_i c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + \omega$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \quad (۴)$$

$$\left[\frac{\lambda}{Le_i c_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_s} \left(\frac{1}{Le_i} - 1 \right) h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right]$$

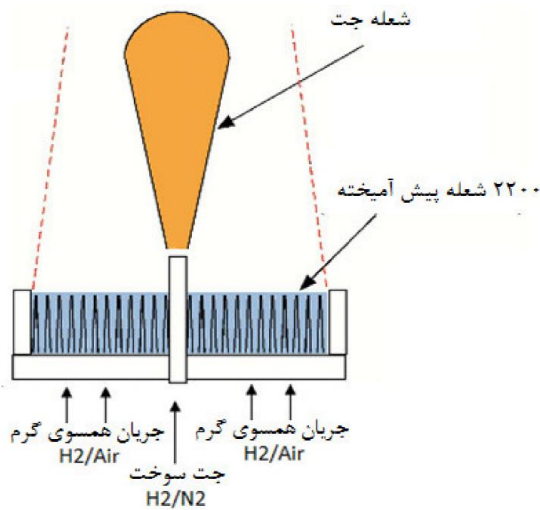
$$h = \sum Y_i h_i \quad (۵)$$

$$h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT + h_i^0(T_{ref}, i)$$

که u مولفه سرعت، τ_{ij} تنشهای رینولدز، p فشار، ρ چگالی، Y_i نسبت جرمی گونه آم، λ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه، $C_{p,i}$ ظرفیت گرمایی فشار ثابت گونه آم، Le عدد لوئیس، h آنتالپی، T دما، ω نرخ تولید جزء i توسط واکنش شیمیایی است که به عنوان منبع در نظر گرفته می‌شود.

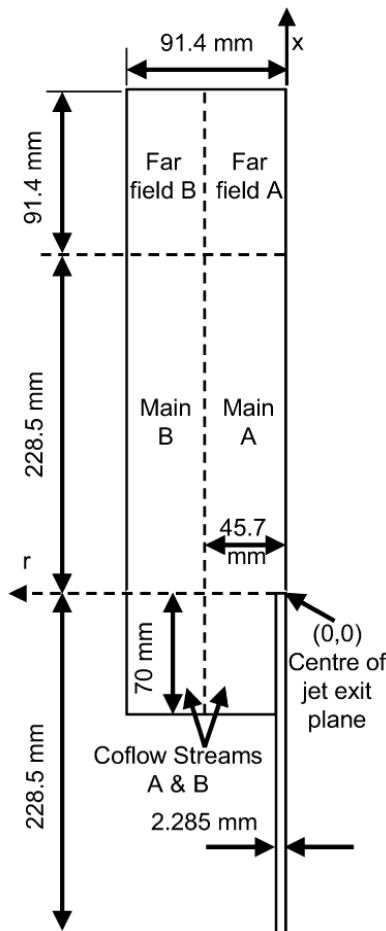
مدل آشفتگی

عبارت τ_{ij} تنش رینولدز نامیده می‌شود که به دلیل غیرخطی بودن جمله جایجایی در معادله (۲) ایجاد شده‌است. مسئله با مشکل بسته بودن روبه‌رو است. به عبارت دیگر، تعداد معادلات و مجهولات حاکم بر جریان برابر نیست و برای برطرف کردن این مشکل، جمله مورد نظر مدل خواهد- شد. برای این کار، از مدل‌های رایجی چون $k - \epsilon$ یا $k - \omega$



شکل ۱. هندسه جت هیدروژن [۱۱]

طرحواره مشعل مورد نظر و دامنه محاسباتی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در این مطالعه از شبکه‌بندی مطابق شبکه مورد استفاده در مرجع [۱۱] استفاده شد.



شکل ۲. شرایط مرزی، طرحواره مشعل مورد نظر و دامنه محاسباتی مورد استفاده [۱۱]

استفاده می‌شود. به طور کلی برای مدل سازی احتراق، در مدل اتلاف ادی (Eddy Dissipation) آشفته‌گی کنترل کننده نرخ واکنش می‌باشد، در حالی که در مدل نرخ محدود (Finite Rate) نرخ واکنش به وسیله رابطه آرنیوس (Arrhenius) محاسبه و تأثیر آشفته‌گی در تبدیل گونه‌ها نادیده گرفته می‌شود. در مدل اتلاف ادی / نرخ محدود (Eddy Dissipation Finite Rate) نرخ واکنش از تلفیق دو روش ذکر شده و در نظر گرفتن کم‌ترین نرخ واکنش به دست آمده از دو مدل به عنوان نرخ واکنش در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه مدل اتلاف ادی / نرخ محدود فقط می‌تواند برای یک یا دو واکنش در مکانیزم شیمیایی در نظر گرفته شده، به خوبی عمل کند. مدل مفهومی اتلاف ادی Eddy Dissipation Concept (EDC) گسترش یافته مدل اتلاف ادی (ED) می‌باشد که اثرات واکنش‌های شیمیایی را در آشفته‌گی در نظر می‌گیرد. مدل حل احتراق برای مسئله حاضر مدل مفهومی اتلاف ادی است. از آنجایی که خواص مخلوط مانند گرمای ویژه در فشار ثابت، پخش مولکولی و خواص دیگر وابستگی شدیدی به نوع ترکیب مخلوط، دما و فشار دارند، گرمای ویژه مخلوط از طریق قانون مخلوط، چگالی مخلوط با استفاده از گاز ایده‌ال و ویسکوزیته و رسانایی حرارتی از روش میانگین وزنی قانون مخلوط محاسبه می‌شوند.

حلگر محاسباتی

شبیه سازی جریان در بسته نرم‌افزاری انسیس فلونت ۱۷/۲ با معیار همگرایی 10^{-4} برای معادله پیوستگی و 10^{-5} برای معادله انرژی، تکانه، اجزاء، معادلات مدل احتراقی انجام شده است. معادلات بصورت مرتبه دو جداسازی شده‌اند. الگوریتم سیمپل عبارت فشار و سرعت را به یکدیگر متصل می‌کند.

هندسه و شبکه بندی

هندسه و طرحواره مشعل مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. فواره سوخت دارای قطر داخلی ۴/۵۷ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۰/۸۹ میلی‌متر بوده و در مرکز یک دیسک سوراخ‌دار با قطر ۲۱۰ قرار دارد. این دیسک دارای ۲۲۰۰ سوراخ به قطر ۱/۵۸ میلی‌متر است که با استفاده از آن شعله‌های پیش‌آمیخته بر روی دیسک ایجاد شده و انرژی لازم برای پایدارسازی شعله با استفاده از سازوکار خوداشتعالی از طریق شعله‌های پیش‌آمیخته فراهم می‌شود. دما و ترکیب این جریان همسو در جدول ۱ نشان داده شده است. فاصله سطح خروجی فواره سوخت نسبت به دیسک سوراخ‌دار ۷۰ میلی‌متر بوده و بدین ترتیب می‌توان ترکیب مخلوط جریان همسو را به صورت یکنواخت در نظر گرفت. کل چیدمان آزمایش در جریان هوای ساکن قرار داشته و هوای محیط نمی‌تواند تا ناحیه محوری Z/D برابر با ۲۶ بر روی شعله تأثیر داشته باشد. اطلاعات تجربی مربوط به مشعل فوق در مرجع [۹] موجود است.

شرایط مرزی

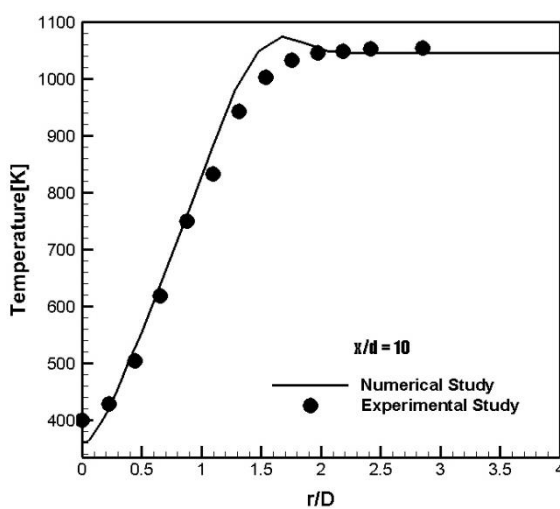
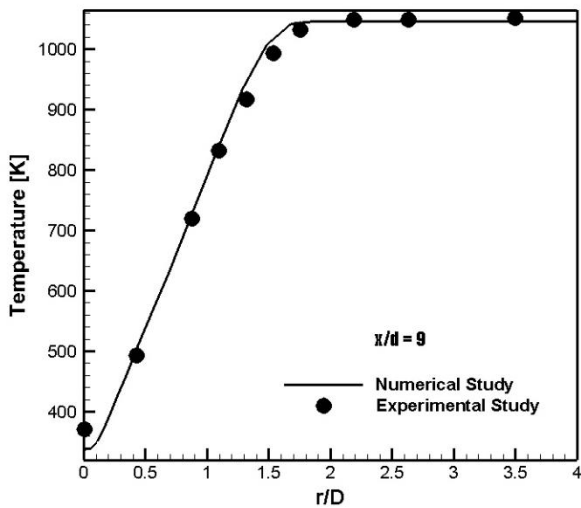
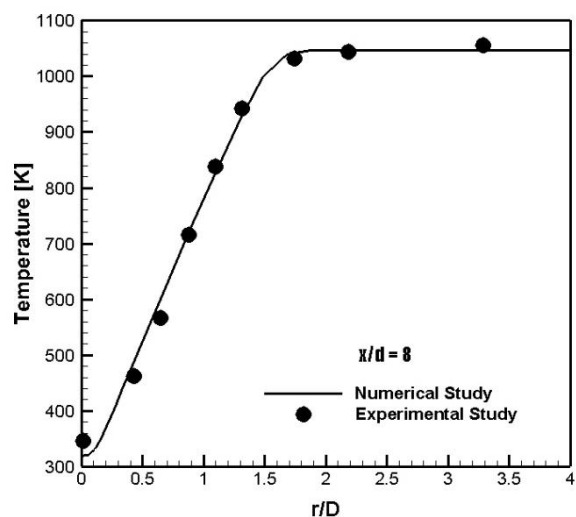
شرایط مرزی سرعت و کسر مولی گونه‌های مختلف جت سوخت و جریان همسوی گرم در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود.

جدول شماره ۲. مقادیر ورودی سوخت و جریان همسو
جت سوخت جریان همسو

۱۸۲/۸	۴/۵۷	قطر (میلی‌متر)
۳/۵	۱۰۷	سرعت (متر بر ثانیه)
۱۰۴۵	۳۰۵	دما (کلوین)
۰/۰۰۰۵	۰/۲۵۳۷	کسر مولی هیدروژن
۰/۱۴۷۴	۰/۰۰۲۱	کسر مولی اکسیژن
۰/۷۵۳۴	۰/۷۴۲۷	کسر مولی نیتروژن
۰/۰۹۸۹	۰/۰۰۱۵	کسر مولی آب

بررسی میدان دما

در شکل ۳ نتایج برای توزیع دما در میدان جریان ۸ الی ۱۰ برابر قطر جت نشان داده شده‌است. نتایج حاکی از دقت مناسب شبیه‌سازی است. تنها نکته حائز اهمیت بیش‌تر پیش‌بینی شدن دما در موقعیت ۱۰ و در موقعیت شعاعی حدود ۱/۵ برابر قطر جت است.

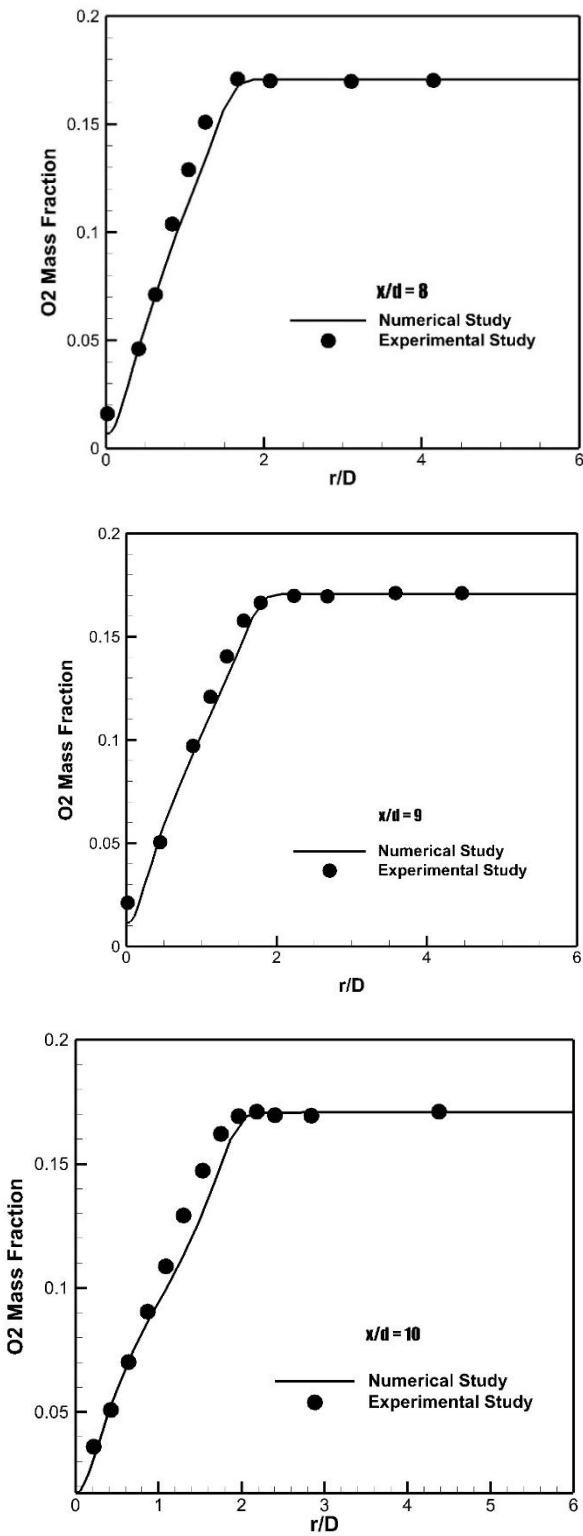


شکل ۳. بالا: توزیع دما در محل $x=8dj$ ، وسط: توزیع دما در محل $x=10dj$ ، پایین: توزیع دما در محل $x=9dj$.

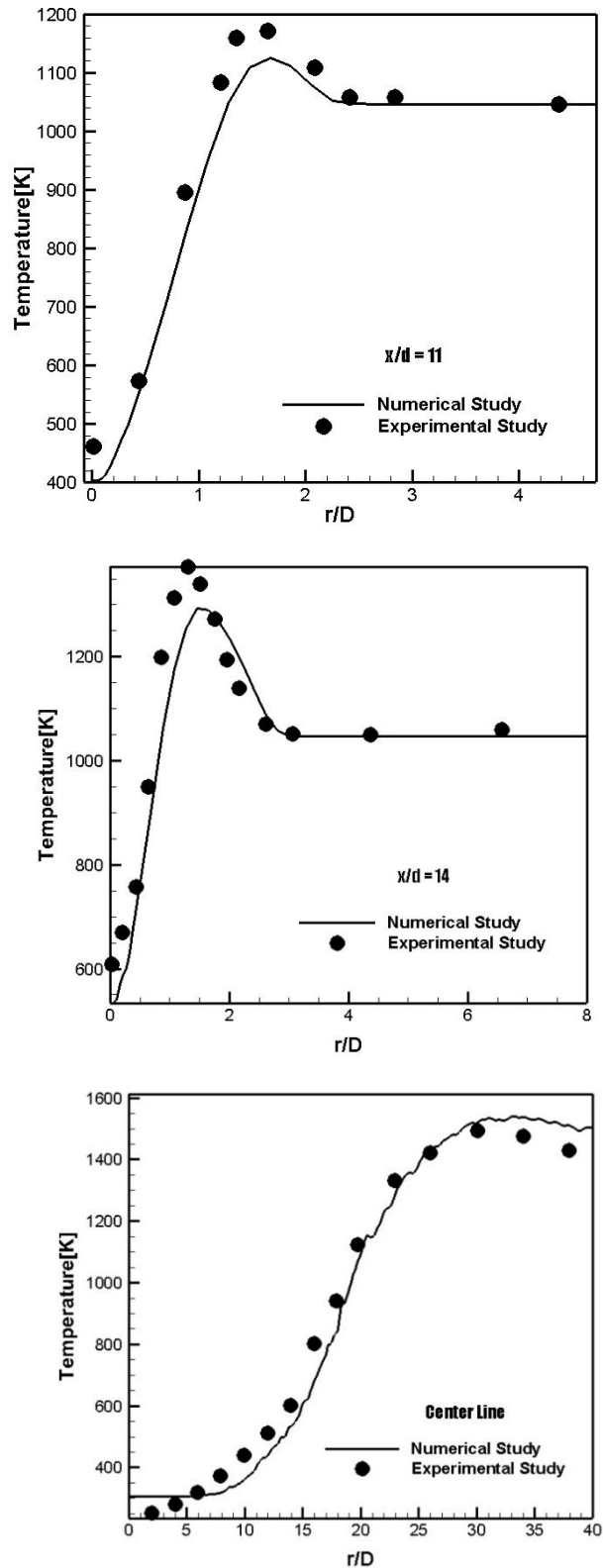
در شکل ۴ نتایج برای توزیع دما در میدان جریان ۱۱، ۱۴ و محور تقارن جت نشان داده شده‌است. نتایج حاکی از پیش‌بینی کم‌تر از مقدار واقعی در موقعیت‌های ۱۱ و ۱۴ است. برای مثال در موقعیت ۱۱ بیشترین دما باید به ۱۱۷۱ کلوین برسد که نتایج شبیه‌سازی ۱۱۲۵ کلوین را نشان می‌دهد. خطای محاسبه‌شده برای محل ۱۱ و ۱۴ به ترتیب ۳/۹ و ۵/۸ درصد بوده‌است.

بررسی میدان کسر جرمی

در شکل ۵ نتایج برای توزیع جز جرمی اکسیژن در میدان جریان ۸ الی ۱۰ برابر قطر جت نشان داده شده است. نتایج حاکی از دقت مناسب شبیه سازی است.

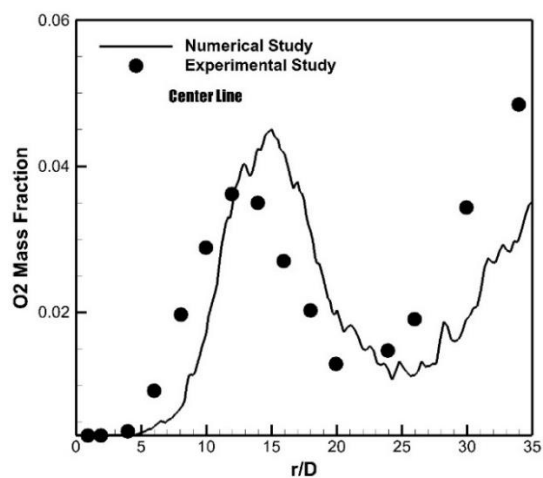
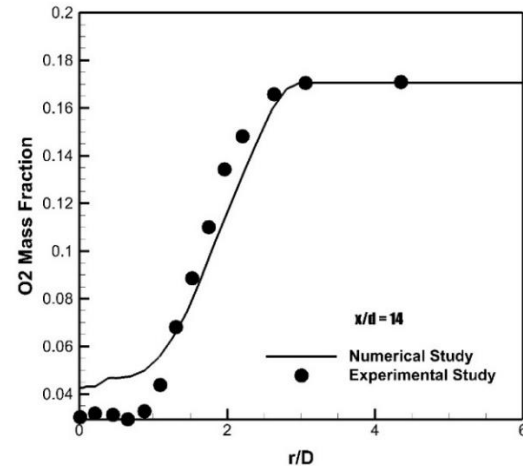
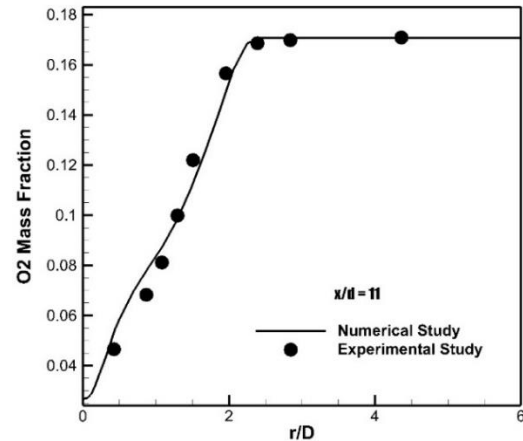


شکل ۵. بالا: توزیع جز جرمی اکسیژن در محل $x=8d$ ، وسط: توزیع دما در محل $x=10d$ ، پایین: توزیع دما در محل $x=9d$.



شکل ۴. بالا: توزیع دما در محل $x=11d$ ، وسط: توزیع دما در محل $x=14d$ ، پایین: نتایج برای توزیع دما در میدان جریان روی محور تقارن.

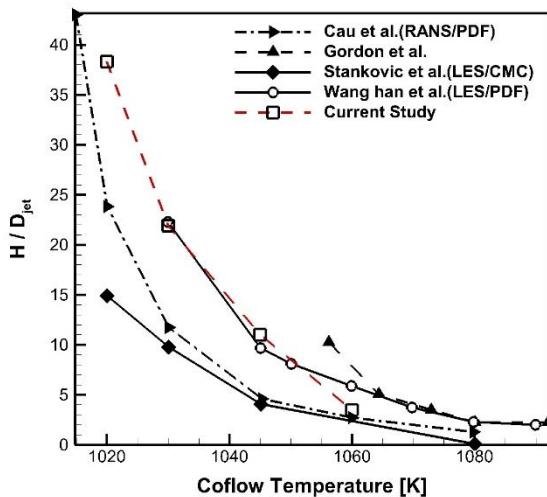
در شکل ۶ نتایج برای توزیع کسر جرمی اکسیژن در میدان جریان ۱۱ و ۱۴ برابر قطر جت و روی محور تقارن نشان داده شده است. نتایج حاکی از دقت مناسب شبیه‌سازی است. تنها نکته حائز اهمیت در این جا عدم تطابق مقدار اندازه گیری شده و مقدار نتایج شبیه‌سازی برای کسر جرمی اکسیژن روی محور تقارن است. نتایج مقدار کسر جرمی اکسیژن را بیش از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کرده و بیشترین خطا در این قسمت ۲۸/۵ درصد بوده است.



شکل ۶. بالا: توزیع جز جرمی اکسیژن در محل $x=11d_j$ ، وسط: توزیع دما در محل $Z=14d_j$ ، پایین: توزیع دما روی محور تقارن.

مطالعه اثر دمای جریان هم‌سو بر ارتفاع برخاستگی شعله

ارتفاع برخاستگی، مطابق با مرجع [۷]، نزدیک ترین فاصله‌ای تعریف می‌شود که پایه شعله نسبت به لبه نازل داشته و پایه شعله خواهد بود. در این محل مقدار کسر جرمی گونه OH برابر با ۶۰۰ ppm خواهد بود. بر اساس مطالعه تجربی [۷]، ارتفاع برخاستگی در این شرایط برابر ۱۰ قطر نازل تخمین زده شده است. در شکل شماره ۷ نتایج ارتفاع برخاستگی در مطالعه حاضر با نتایج مراجع مختلف مقایسه شده است. دمای جریان هوای هم‌سو متغیر بوده و نتایج حاکی از کاهش ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش دماست. نتایج تحقیق حاضر RANS/EDC مانند نتایج حاصل از ونگ‌هان و همکاران [۱۲] که با LES/PDF انجام شده، مطابقت خوبی دارد. نتایج برای دمای ۱۰۳۰ و ۱۰۴۵ مطابقت کامل با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با گردابه‌های بزرگ داشته و برای دمای ۱۰۶۰ کلونین مقدار ارتفاع برخاستگی ۲/۳ برابر قطر نازل کمتر از نتایج شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پیش‌بینی شده است.



شکل ۷. مقایسه نتایج ارتفاع برخاستگی در دمای جریان هم‌سوی مختلف

نتایج

✓ در این مطالعه به بررسی مدل مرجع کابرا پرداخته شد. مدل آشفستگی مورد استفاده مدل کا-پسیلون بهبود یافته بوده و جمله همبستگی سرعت-گرادیان فشار در معادله انرژی جنبشی آشفستگی در نظر گرفته است. این جمله بر میدان کمیات اسکالر مانند دما و کسر جرمی اجزا و ارتفاع برخاستگی شعله اثر محسوسی دارد. مکانیزم شیمیایی احتراق هیدروژن شامل ۱۰ گونه و ۲۱ واکنش بوده است. مدل احتراقی مورد استفاده مدل مفهومی اتلاف ادی بوده است.

✓ نتایج شبیه‌سازی مطابقت مناسبی با میدان دمای نتایج آزمایشگاهی داشتند. نتایج حل عددی مطابقت مناسبی با میدان کسر جرمی اکسیژن نتایج آزمایشگاهی داشتند.

- 12-Wang Han., Raman, V., Chen, Z., "LES/PDF modeling of auto ignition in a lifted turbulent flame: Analysis of flame sensitivity to differential diffusion and scalar mixing"., *Combustion and Flame journal.*, 171., 2016., 69-86.
- 13-Turns, S. R., 2000., "An Introduction to Combustion", Second Edition, Mc Graw Hill.
- 14- Poinso, T., Veynante, D., 2005, "Theoretical and Numerical Combustion", Second Edition.

- ✓ ارتفاع برخاستگی شعله مکانی تعریف شده است که کسر جرمی OH به مقدار $0/0006$ برسد. ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش دمای جریان همسو کاهش یافته و اگر دمای جریان همسوی گرم از 1080 کلوین بیشتر شود، شعله به لبه مشعل متصل خواهد شد.
- ✓ نتایج برای دمای 1030 و 1045 مطالبقت کامل با نتایج حاصل از شبیه سازی با گردابه های بزرگ داشته و برای دمای 1060 کلوین مقدار ارتفاع برخاستگی $2/3$ برابر قطر نازل کمتر از نتایج شبیه سازی گردابه های بزرگ پیش بینی شده است.

مراجع

- 1- محمد میر نجفی زاده، محمد تقی صادقی، رحمت ستوده قره باغ، "مدل سازی آشفتنگی در شعله های برخاسته فواره نفوذی در جریان همسو تحت شرایط پیش گرم و رقیق سازی"، نشریه علمی پژوهشی سوخت و احتراق، سال ششم، شماره اول، ۱۳۹۲.
- 2- Mastorakos, E., "Ignition of Turbulent Non-premixed Flames", *Progress in Energy and Combustion Science.*, 35, 2009, pp. 55-97.
- 3-C. J. Lawn, "Lifted Flames on Fuel Jets in Co-Flowing Air." *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 2009, pp. 1-30.
- 4-R. W. Bilger, "Future Progress in Turbulent Combustion Research." *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, pp. 367-380.
- 5-M. Chen, M. Herrmann, N. Peters, "Flamelet Modeling of Lifted Turbulent Methane/Air and Propane Air Jet Diffusion Flames." *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, 2000, pp. 167-174.
- 6-R. Cabra, T. Myhrvold, J. Y. Chen, R. W. Dibble, A. N. Karpetis, R. S. Barlow, "Simultaneous Laser Raman-Rayleigh-Lif Measurements and Numerical Modeling Results of a Lifted Turbulent H₂/N₂ Jet Flame in a Vitiated Coflow," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, 2002, pp. 1881-1888.
- 7-T. Myhrvold, I. S. Ertesvag, I. R. Gran, R. Cabra, J. Y. Chen, "A Numerical Investigation of a lifted H/N Turbulent Jet Flame in a Vitiated Coflow," *Combustion Science and Technology*, 178, 2006, pp. 1001-1030.
- 8-A. R. Masri, R. Cao, S. B. Pope, G. M. Goldin, "PDF Calculations of Turbulent Lifted Flames of H/N Fuel Issuing into a Vitiated Co-Flow," *Combustion Theory and Modeling*, 8, 2003, pp. 1-22.
- 9-
<http://www.me.berkeley.edu/cal/vcb/data/VCHNData.html>
- 10-Yetter, R. A., Dryer, F. L., Rabitz, H., "A Comprehensive Reaction Mechanism for Carbon monoxide/Hydrogen/oxygen kinetics," *Combustion Science and technology*, 79, 1991, pp. 97-128.
- 11- Gordon, R. L., Masri, A. R., Pope, S. B., Goldin, G. M., "Transport budgets in turbulent lifted flames of methane autoignition in a vitiated co-flow" .. *Combustion and Flame journal.*, 2007.