

ارزیابی مدل‌های احتراقی مختلف به منظور دستیابی به دقت بیشتر در شبیه‌سازی جریان احتراقی سوخت مازوت

مسعود دربندی

استاد، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
darbandi@sharif.edu

علی فطین

کارشناس ارشد، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
fatin_ali@ae.sharif.edu

چکیده

در پژوهش حاضر، مدل‌های احتراقی مختلف برای شبیه‌سازی جریان احتراقی سوخت مازوت مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به دقت آنها در پیش‌بینی کسر مولی گونه‌های مختلف، مدل احتراقی معتبر از میان آنها استخراج می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک نمونه آزمایش تجربی که به احتراق سوخت مازوت در یک کوره آزمایشگاهی می‌پردازد را انتخاب کرده و سپس اقدام به شبیه‌سازی عددی این کوره در شرایط آزمایشگاهی می‌شود. در این راستا، فرآیند احتراق مازوت با استفاده از روش عددی و با به‌کارگیری مدل‌های احتراقی مختلف شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با داده‌های جمع‌آوری شده از تست تجربی مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مدل احتراقی تعادلی که با تعریف متغیر کسر مخلوط غلظت گونه‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند نسبت به مدل‌هایی که بر پایه‌ی ساختارهای گردابه‌ای جریان آشفته و سینتیک شیمیایی واکنش اقدام به پیش‌بینی غلظت گونه‌های شیمیایی می‌نمایند، دارای دقت بیشتری می‌باشد.

کلمات کلیدی: مازوت، دینامیک سیالات محاسباتی، احتراق، کوره، مدل احتراقی

۱-مقدمه

مازوت یا سوخت مایع سنگین یکی از سوخت‌های مورد استفاده در کوره‌های صنعتی و نیروگاهی است. خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی این سوخت به گونه‌ای است که میزان تولید آلاینده‌ها و بخصوص NO_x در احتراق آن اغلب بالا است. از این رو، شناسایی فرآیند احتراق و بررسی راه‌کارهای کاهش NO_x در این سوخت حائز اهمیت می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از روش‌های مورد استفاده دانشمندان در مطالعه پدیده احتراق می‌باشد. لذا، شبیه‌سازی عددی احتراق مازوت مورد توجه محققین متعددی بوده است [۱-۹]. برای مدل‌سازی احتراق آشفته و غیر پیش‌آمیخته مازوت روش‌های متفاوتی وجود دارند که با توجه به فیزیک حاکم بر فرآیند احتراق می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. دو دیدگاه متفاوت یکی با فرض واکنش تعادلی و دیگری با فرض واکنش با نرخ محدود وجود دارند. در واکنش‌های تعادلی فرض می‌شود که سرعت وقوع واکنش بسیار بالا است و سوخت و اکسیدکننده بلافاصله پس از رسیدن به حد اشتعال‌پذیری، به محصولات احتراقی تبدیل می‌شوند. کسر مولی محصولات احتراق نیز با استفاده از تعادل شیمیایی گونه‌ها تعیین می‌شوند.

اما در واکنش‌های با نرخ محدود فرض می‌شود که سرعت واکنش شیمیایی توسط دو عامل سینتیک شیمیایی واکنش و نرخ اختلاط آشفته کنترل می‌شود. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی احتراق مازوت مورد استفاده قرار گرفته است. در بین پژوهش‌های انجام‌شده، مراجع [۱-۴] با فرض سریع بودن واکنش شیمیایی و کنترل آن توسط فرآیند اختلاط، احتراق را مدل‌سازی کرده‌اند. در پژوهش‌های مذکور، احتراق مازوت به صورت واکنش شیمیایی تک-مرحله‌ای فرض شده است. از طرفی مراجع [۵-۷] علاوه بر شاخص زمانی اختلاط، سینتیک شیمیایی واکنش را نیز در محاسبات احتراق وارد نموده‌اند. نهایتاً، مراجع [۸] و [۹] با استفاده از تعریف متغیر کسر مخلوط و تابع چگالی احتمال فرآیند احتراق را مدل‌سازی کرده‌اند. در پژوهش آنها محاسبات احتراقی با فرض تعادل شیمیایی گونه‌های واکنشی انجام شده است و برهم‌کنش احتراق با آشفتنگی با تعریف تابع چگالی احتمال مدل‌سازی شده است.

مدل‌های احتراقی مورد بررسی در پژوهش حاضر شامل مدل کسر مخلوط و pdf^۱، مدل ED^۲ و مدل EDC^۳ می‌باشند. مدل‌های ED و EDC در دو حالت شامل واکنش تک-مرحله‌ای و واکنش دو-مرحله‌ای بررسی می‌شوند. به منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها به ازای مدل‌های احتراقی یادشده، آزمایش تجربی مرجع [۴] که داده‌های آن در دسترس است انتخاب شده و شرایط آزمایش به کمک نرم‌افزار fluent شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور پدیده‌ی آشفتنگی با استفاده از مدل $k-\epsilon$ realizible پیش‌بینی می‌شود [۱۰]. همچنین، مسیر حرکت قطره‌های سوخت با استفاده از رویکرد لاگرانژی و با حل معادله مومنتوم برای قطره‌ها پیش‌بینی می‌شود. تبادل جرم و انرژی قطره با فاز پیوسته نیز در حل عددی شبیه‌سازی می‌شود. برای پیش‌بینی شار تشعشع حرارتی از مدل تشعشع DO استفاده می‌شود [۱۱]. ضریب جذب تشعشعی محیط به صورت حاصل جمع ضریب جذب تشعشعی محصولات احتراق و دوده محاسبه می‌شود. برای تعیین ضریب جذب محصولات احتراق و دوده به ترتیب از مدل WSGGM در مرجع [۱۲] و مدل ارائه شده در مرجع [۱۳] استفاده می‌شود. تشکیل دوده با استفاده از مدل تک-مرحله‌ای ارائه شده در مرجع [۱۴] پیش‌بینی می‌شود. از میان گونه‌های مختلف NO_x تنها غلظت گونه NO و با استفاده از مکانیزم‌های حرارتی، سوختی و فوری مدل‌سازی می‌شود. در ادامه، نتایج

¹ Probability density function

² Eddy dissipation

³ Eddy dissipation concept

۰/۰۳۴	خاکستر (wt%)
۴۲/۱	ارزش حرارتی کل (MJ/kg)

۳- معادلات حاکم

برای تحلیل جریان احتراقی آشفته در دامنه دوبعدی با تقارن محوری پیچشی و با سوخت مازوت پدیده‌های فیزیکی مختلف شامل آشفستگی، حرکت قطره، انتقال جرم و گرما بین فازها، احتراق آشفته، تشعشع حرارتی، تشکیل دوده و تولید NO_x باید مدل‌سازی شوند. تا کنون مدل‌های متنوعی برای شبیه‌سازی احتراق آشفته توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد دقت مدل‌های مختلف احتراق آشفته در پژوهش حاضر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بخش مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی، با تمرکز بر مدل‌های احتراق آشفته، ارائه می‌شوند.

۳-۱- جریان سیال و معادلات آن

در این بخش، معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر پایا در مختصات استوانه‌ای (X-Y) با تقارن محوری پیچشی (در راستای θ) ارائه می‌شود. معادله (۱) و (۲) به ترتیب معادله پیوستگی و معادله مومنوم در راستای تقارن می‌باشند:

$$\frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (y v_y) + \frac{\partial}{\partial x} (v_x) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} (y \rho v_x v_y) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} (y \rho v_x v_y) = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} \left[y \mu \frac{\partial v_\theta}{\partial x} \right] + \frac{1}{y^2} \frac{\partial}{\partial y} \left[y^3 \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right] - \rho \frac{v_y v_\theta}{y} \quad (2)$$

که در روابط فوق، ضریب لزجت برابر $\mu = \mu_l + \mu_t$ می‌باشند [۱۵].

۳-۲- آشفستگی و معادلات آن

پژوهش‌های پیشین با استفاده از هر دو مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ realizable جریان آشفته را پیش‌بینی کرده‌اند [۹-۱۱]. اما، مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ realizable به دلیل محاسبه ضریب لزجت بر اساس مقدار کرنش میانگین، نرخ چرخش و مقادیر k و ε پیش‌بینی بهتری در جریان‌های چرخشی ارائه می‌کند [۱۶]. از این رو، در پژوهش حاضر پارامترهای میدان جریان آشفته-انرژی جنبشی آشفستگی و نرخ اضمحلال آن- با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ realizable تعیین شده و با استفاده از نتایج آن ضریب لزجت آشفته جریان از رابطه $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ - که در آن C_μ متغیر می‌باشد- محاسبه می‌گردد. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفستگی و نرخ اضمحلال به ترتیب زیر می‌باشند [۱۰]:

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

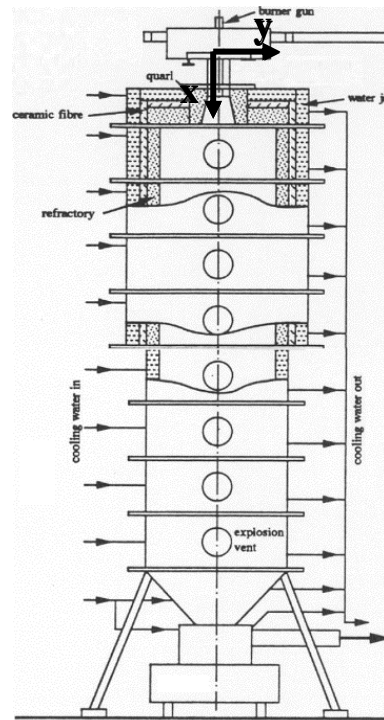
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (4)$$

که در معادله فوق G_b ، G_k عبارت‌های تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از به ترتیب گرادیان سرعت میانگین و بویانسی و $\sigma_k = 1.0$ عدد پراوتل آشفته برای k می‌باشند. همچنین، $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ ، $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ و $C_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right\}$ ، همچنین، $\sigma_\varepsilon = 1.2$ عدد پراوتل آشفته برای ε و $C_{1\varepsilon} = 1.44$ و $C_{2\varepsilon} = 1.9$ ثوابت مدل هستند [۱۰].

حاصل از شبیه‌سازی میدان جریان احتراقی با مدل‌های مختلف احتراقی با داده‌های تست تجربی مقایسه می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان میزان دقت هر یک از مدل‌های احتراقی را ارزیابی نموده و میزان خطا در هر یک از آنها را سنجید.

۲- معرفی کوره تحت شبیه‌سازی

ساربو و همکاران [۴] طی آزمایشی، احتراق سوخت مایع سنگین در یک کوره نیمه‌صنعتی قائم با مشعل مازوت‌سوز را بررسی کرده‌اند. آنها طی آزمایش خود، پروفیل غلظت گونه‌های O₂، CO₂، CO و NO را در سه فاصله مختلف از دهانه مشعل شامل فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر سنجیده‌اند. مطابق شکل (۱)، کوره تحت آزمایش به صورت استوانه‌ای است که مشعل در سقف آن و به سمت پایین قرار گرفته است. سوخت مازوت با دبی ۱۲ kg/h و دمای ۱۰۰ °C از طریق انژکتور پاشش می‌شود. احتراق با ۱۵٪ هوای اضافه صورت می‌پذیرد. دمای هوای احتراق ۲۰ °C و سرعت ورود آن برابر با ۱۷/۹ m/s می‌باشد. عدد چرخش (نسبت سرعت هوای مماسی به سرعت محوری) در هوای اولیه مشعل برابر با ۱/۱ می‌باشد.



شکل ۱: شماتیک کلی از بویلر تحت شبیه‌سازی

مشخصات فیزیکی مازوت شامل چگالی، ضریب لزجت سینماتیکی و کشش سطحی به ترتیب برابر با ۹۹۰ kg/m³، ۳۶/۰۶ cSt و ۰/۰۲۸۴ N/m می‌باشند. نتیجه آنالیز گونه‌های سوخت به شرح جدول (۱) می‌باشد. جزئیات بیشتر از شرایط آزمایش در مرجع [۴] ارائه شده است.

جدول ۱: درصد جرمی گونه‌های اتمی موجود در سوخت

۸۵/۰	کربن (wt%)
۱۱/۲	هیدروژن (wt%)
۰/۴	نیتروژن (wt%)
۳/۴	گوگرد (wt%)
۰/۰	اکسیژن (wt%)

۳-۴-۱- مدل احتراقی کسر مخلوط و pdf

احتراق آشفته با فرض سریع بودن واکنش شیمیایی و برقراری تعادل شیمیایی بین ۲۰ گونه مختلف شامل O, N, S, H, C و O به عنوان محتویات سوخت مازوت، N₂ و O₂ به عنوان هوا، CO₂, H₂O, CO, H₂ به عنوان محصولات احتراق و گونه‌های CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₄H₂, C₄H₆، OH و HCN به عنوان گونه‌های میانی مدل‌سازی می‌شود. برای این منظور متغیر بقایی کسر مخلوط (f) تعریف و برای غلظت گونه‌ها، دما و چگالی گاز توابع چگالی احتمال (pdf) تشکیل می‌شود. معادله انتقال برای کسر مخلوط و پراکنش آن به ترتیب زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}^2) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}^2) &= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_g \mu_t \cdot (\nabla \bar{f})^2 \\ &- C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

که در معادلات (۱۱) و (۱۲)، σ_t ، C_g و C_d ثوابت معادله با مقدار به ترتیب ۰/۱۸۵، ۲/۸۶ و ۲/۰ می‌باشند [۲۱]. در ادامه پژوهش حاضر مدل احتراقی فوق به اختصار مدل pdf نامیده می‌شود.

۳-۴-۲- مدل احتراقی ED

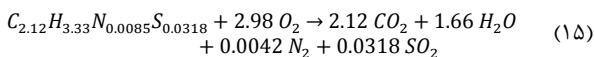
فرم کلی معادله بقای گونه‌های شیمیایی به صورت معادله (۱۳) است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (13)$$

در معادله فوق R_i و S_i نرخ تولید گونه i طی به ترتیب واکنش شیمیایی و تبخیر سوخت می‌باشند. همچنین، J_i نفوذ جرمی گونه i در جریان آشفته است. در مدل احتراقی ED فرض می‌شود که نرخ پیشرفت واکنش توسط فرآیند اختلاط کنترل می‌شود. نرخ تولید گونه i در واکنش r ($R_{i,r}$) از معادله (۱۴) قابل محاسبه می‌باشد:

$$R_{i,r} = \text{Min} \left\{ v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left[\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}, \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \right], v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \right\} \quad (14)$$

که در آن، A و B ثوابت تجربی با مقدار به ترتیب ۴ و ۰/۵ و ε/k شاخص زمانی گردابه می‌باشند [۲۲]. واکنش تک-مرحله‌ای احتراق مازوت با توجه به ترکیب سوخت که در جدول ۱ ارائه شده است به صورت معادله (۱۵) می‌باشد:



اما، واکنش اکسید شدن گونه CO در مقایسه با فرآیند احتراق کندتر است و فرض واکنش سریع فرض مناسبی برای آن نمی‌باشد. از این رو، مدل ED علاوه بر واکنش تک-مرحله‌ای ارائه شده در معادله (۱۵) با استفاده از مکانیزم واکنش دو-مرحله‌ای نیز بررسی می‌شود. در مکانیزم واکنش دو-مرحله‌ای واکنش اکسید شدن CO که به شکل معادله (۱۶) می‌باشد در نظر گرفته می‌شود:



در نتیجه معادله (۱۳) برای انتقال گونه CO نیز حل شده و کسر مولی آن در مکانیزم دو-مرحله‌ای پیش‌بینی می‌شود.

همچنین نیاز است تا در نزدیکی دیواره از توابع دیواره مناسب استفاده شود. به بیان دیگر، از مقادیر k و ε به دست آمده از این روابط جهت اعمال شرط مرزی آشفته‌گی در نزدیکی دیواره استفاده می‌شود.

۳-۳- مدل‌سازی حرکت قطره و تبادل جرم و انرژی با فاز گازی

برای پیش‌بینی مسیر حرکت قطره از رویکرد لاگرانژی استفاده می‌شود. برای این منظور معادله حرکت قطره‌ها با در نظر گرفتن نیروی پسا و گرانش به صورت معادله (۵) در نظر گرفته می‌شود. برای برآورد ضریب پسا (C_d) فرض می‌شود که قطره دارای شکل کروی است و با استفاده از مدل مرجع [۱۷] ضریب پسا برآورد می‌شود. همچنین برای پیش‌بینی اثر آشفته‌گی بر مسیر قطره‌ها از روش ردیابی تصادفی^۱ [۱۸] استفاده می‌شود.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

معادله (۶) بالانس حرارتی قطره می‌باشد. مطابق این معادله دمای قطره تحت تأثیر انتقال حرارت همرفتی، انتقال جرم (تبخیر و جوش) و تشعشع می‌باشد. فرض بر این است که مقاومت حرارتی قطره ناچیز است و دمای قطره یکنواخت می‌باشد.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (6)$$

در معادله (۶) h با استفاده از معادله (۷) برای عدد ناسلت که در مرجع [۱۹] ارائه شده است محاسبه می‌شود:

$$Nu = \frac{h d_p}{K_\infty} = \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} (2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (7)$$

همچنین، نرخ تبخیر در معادله (۶) با استفاده از رابطه ارائه شده در معادله (۸) برآورد می‌شود:

$$\frac{dm_p}{dt} = k_c A_p \rho_\infty \ln(1 + B_m) \quad (8)$$

در معادله (۸) ضریب انتقال جرم (k_c) با استفاده از عدد شروود که توسط رنز و مارشال [۲۰] ارائه شده است محاسبه می‌شود:

$$Sh_{AB} = \frac{h_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (9)$$

عبارت سوم در معادله (۶) اثر تشعشع بر دمای قطره را مدل‌سازی می‌کند. در این عبارت ε_p ضریب نشر قطره، σ ثابت استفان-بولتزمان و $\theta_R = (G/4\sigma)^{1/4}$ می‌باشد. G شار تشعشع فرودی کل بر سطح قطره است. آنگاه که قطره به دمای جوشش می‌رسد دمای آن ثابت می‌ماند. از این رو عبارت سمت چپ در معادله (۶) حذف شده و نرخ انتقال جرم در حالت جوشش از معادله (۱۰) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\rho_p h_{fg}} \left[\frac{2k_\infty [1 + 0.23 \sqrt{Re_d}]}{d_p} (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \right] \quad (10)$$

سوخت تبخیر شده به صورت عبارت چشمه در معادلات انتقال گونه در فاز گازی ظاهر می‌شود.

۳-۴-۱- احتراق و معادلات آن

در این بخش مدل‌های احتراقی مورد بررسی در پژوهش حاضر معرفی می‌شوند. ابتدا مدل احتراقی کسر مخلوط و pdf معرفی می‌شود. سپس مدل‌های احتراقی ED و EDC ارائه می‌شوند.

¹ Stochastic tracking

$R_{soot,comb} = \min\{R_1, R_2\}$ تعیین می‌شود که R_1 و R_2 در آن به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

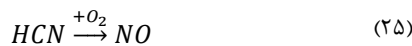
$$R_{soot,comb 1} = A\rho Y_{soot} \frac{\varepsilon}{k} \quad (23)$$

$$R_{soot,comb 2} = A\rho \left(\frac{Y_{ox}}{Y_{soot}}\right) \left(\frac{Y_{soot} v_{soot}}{Y_{soot} v_{soot} + Y_{fuel} v_{fuel}}\right) \frac{\varepsilon}{k} \quad (24)$$

که در معادلات (23) و (24) A ثابت مدل با مقدار $4/0$ می‌باشد.

۳-۷- تشکیل NO

در میان مشتقات مختلف NO_x تنها گونه NO مدل‌سازی می‌شود. در احتراق مازوت NO از طریق سه مکانیزم عمده شامل مکانیزم حرارتی^۱، سوختی^۲ و فوری^۳ تولید می‌شود. برای پیش‌بینی نرخ تولید NO حرارتی از مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته به همراه فرض شبه پایا برای غلظت گونه N و فرض تعادل جزئی برای غلظت گونه‌های O و OH استفاده شده است [24]. سوخت مازوت مورد استفاده در کوره معرفی شده دارای ۰/۴ درصد وزنی نیتروژن است که فرض می‌شود تمام این نیتروژن با همان نرخ تبخیر سوخت و به صورت گونه HCN وارد میدان جریان می‌شود. HCN آزاد شده در طی دو واکنش رقابتی زیر با گونه O_2 و یا NO واکنش می‌دهد.



نرخ انجام این دو واکنش شیمیایی بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دی سوئت اتخاذ می‌شود [25]. از طرفی، واکنش رادیکال‌های هیدروکربنی (CH_i) با مولکول‌های نیتروژن (N_2) باعث تولید HCN می‌شود. مشابه NO حاصل از نیتروژن موجود در سوخت، HCN طی واکنش‌های رقابتی معرفی شده در بالا موجب تولید NO فوری می‌شود. نرخ تولید HCN از واکنش بین CH_i و N_2 نیز بر اساس نتایج مرجع [25] محاسبه می‌شود.

۴- نتایج و بحث بر روی آن

در این بخش، ابتدا شبیه‌سازی عددی کوره و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی کوره با مدل‌های احتراقی مختلف ارائه می‌شود.

۴-۱- شبیه‌سازی کوره آزمایش

کوره آزمایشگاهی مورد استفاده در پژوهش ساریو و همکاران [4] مدل‌سازی می‌شود و میدان جریان احتراقی با استفاده از چارچوب عددی معرفی شده در بخش ۲ شبیه‌سازی می‌شود. هندسه و میدان جریان دارای تقارن محوری است و از شبکه دو بعدی با سازمان و غیریکنواخت برای شبکه‌بندی میدان جریان احتراقی استفاده می‌شود. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، میدان جریان با سه شبکه محاسباتی مختلف با ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ سلول شبیه‌سازی می‌شود و نهایتاً شبکه با ۲۰۰۰۰ سلول برای انجام شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. شبکه تولیدشده به همراه شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی مطابق شکل (۲) می‌باشند.

۳-۴-۳- مدل احتراقی EDC

این مدل با هدف در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی پیچیده در احتراق آشفته توسعه داده شده است. در این مدل فرض می‌شود که واکنش در واحدهای کوچک آشفته رخ می‌دهد. محاسبات احتراقی در این واحدهای کوچک آشفته مشابه راکتورهای فشار-ثابت و بر اساس سینتیک شیمیایی انجام می‌شود. شاخص طولی واحدهای آشفته و شاخص زمانی وقوع واکنش شیمیایی به ترتیب با استفاده از معادله (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌شوند [23]:

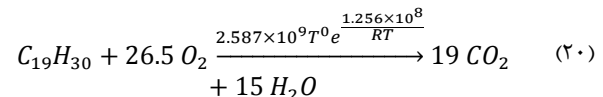
$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{v\varepsilon}{k^2}\right)^{1/4} \quad (17)$$

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (18)$$

در مدل EDC، نرخ تولید گونه i در معادله (۱۳) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^*[1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \quad (19)$$

مشابه، مدل EDC نیز در دو حالت شامل واکنش تک-مرحله‌ای و مکانیزم واکنش دو-مرحله‌ای بررسی می‌شود. واکنش تک-مرحله‌ای و ضرایب آرنیوس آن به صورت معادله (۲۰) است [6]:



با اضافه کردن واکنش اکسید شدن CO (معادله (۱۶)) مکانیزم دو-مرحله‌ای نیز تشکیل و در مدل احتراقی بکار می‌رود.

۳-۵- انتقال حرارت تشعشع

مشابه پژوهش‌های [4-7] انتقال حرارت تشعشع با استفاده از مدل DO شبیه‌سازی می‌شود [۱۱]. برای محاسبه ضریب جذب فاز گازی (k_g) از مدل WSGGM استفاده می‌شود [۱۲]. با توجه به تولید حجم بالای دوده در احتراق مازوت، تأثیر آن در بر میدان تشعشعی دیده شده است. برای این منظور ضریب جذب دوده (k_s) مطابق مدل ارائه شده در مرجع [۱۳] تعیین می‌شود و ضریب جذب کلی به صورت $k_{tot} = k_g + k_s$ محاسبه می‌شود.

۳-۶- مدل‌سازی تشکیل دوده

معادله انتقال زیر برای دوده حل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{soot}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \nabla Y_{soot} \right) + R_{soot,net} \quad (21)$$

که در آن Y_{soot} ، σ_{soot} و $R_{soot,net}$ به ترتیب کسر جرمی دوده، عدد پرانتل آشفته برای انتقال دوده و نرخ کلی تشکیل دوده می‌باشند. نرخ کلی تشکیل دوده بر اساس $R_{soot,net} = R_{soot,form} - R_{soot,comb}$ محاسبه می‌شود. نرخ تشکیل دوده با استفاده از مدل تک-مرحله‌ای که به صورت تجربی به دست آمده است از معادله (۲۲) محاسبه می‌شود [22].

$$R_{soot,form} = C_s \rho_{fuel} \phi^r e^{-E/RT} \quad (22)$$

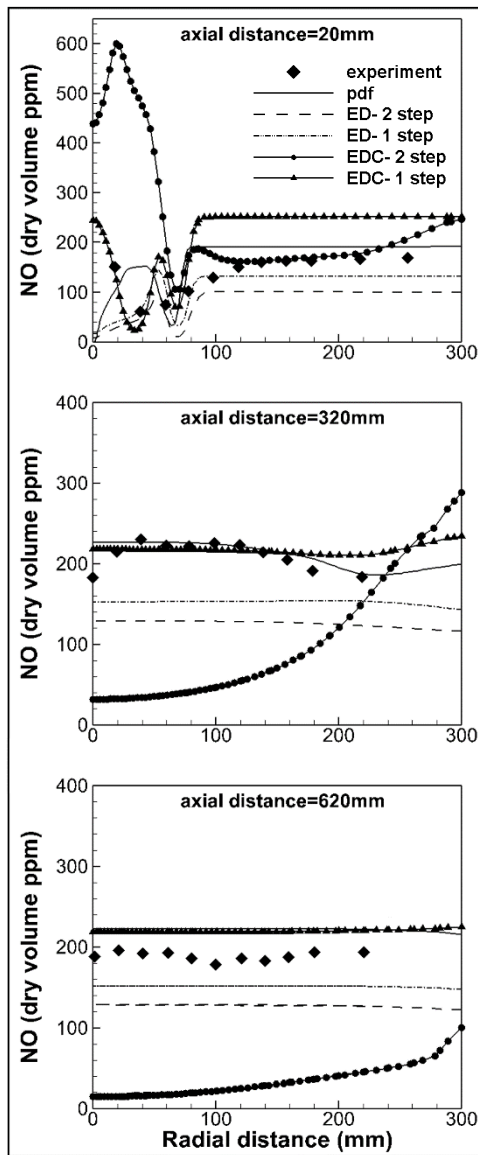
در معادله فوق C_s و r ثوابت مدل هستند که به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۳ می‌باشند. همچنین، نرخ مصرف دوده توسط دو عامل غلظت دوده و یا اکسیژن کنترل می‌شود. از این رو نرخ مصرف دوده به صورت

¹ Thermal NO_x

² Fuel NO_x

³ Prompt NO_x

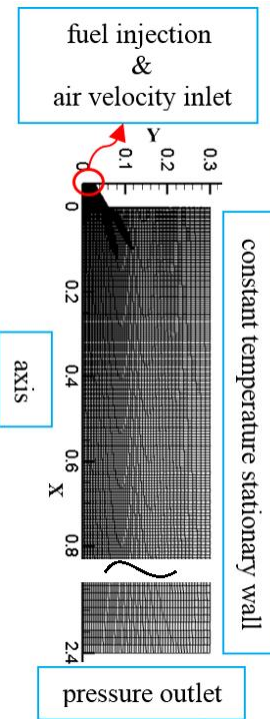
مدل‌های pdf, ED-2step, ED-1step, EDC-2step و EDC-1step را به ترتیب با حدود ۱۲، ۱۹، ۳۶، ۷۰ و ۱۲ درصد خطا پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین، مدل‌های pdf و EDC-1step دقت بیشتری در پیش‌بینی NO دارند.



شکل ۳- پروفیل شعاعی کسر مولی NO در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر

و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مرجع [۴]

شکل (۴) پروفیل شعاعی کسر مولی گونه O_2 را در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر ارائه می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های احتراقی مختلف در فاصله ۲۰ میلی‌متری نشان می‌دهد که مدل‌های احتراقی pdf و ED-1 step نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی دقیق‌تری از کسر مولی O_2 ارائه می‌کنند. از طرفی، در فاصله محوری ۳۲۰ میلی‌متر، از بین دو مدل یاد شده، مدل pdf دارای دقت بیشتری است. همچنین، در فاصله ۶۲۰ میلی‌متری نیز مدل احتراقی pdf و ED-1 step پیش‌بینی بهتری از کسر مولی O_2 ارائه می‌کنند. از طرفی، مدل احتراقی EDC اگرچه در فاصله ۲۰ و ۳۲۰ میلی‌متری و در نزدیکی محور کوره پیش‌بینی بهتری ارائه می‌کند، اما نتایج حاصل از این مدل در فواصل شعاعی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر اختلاف قابل ملاحظه‌ای نسبت به داده‌های تجربی دارند. مدل pdf به جز در فاصله ۲۰ میلی‌متری و در نزدیکی محور کوره که کسر مولی O_2 را بر



شکل ۲- شماتیک کلی از شبکه تولید شده برای کوره.

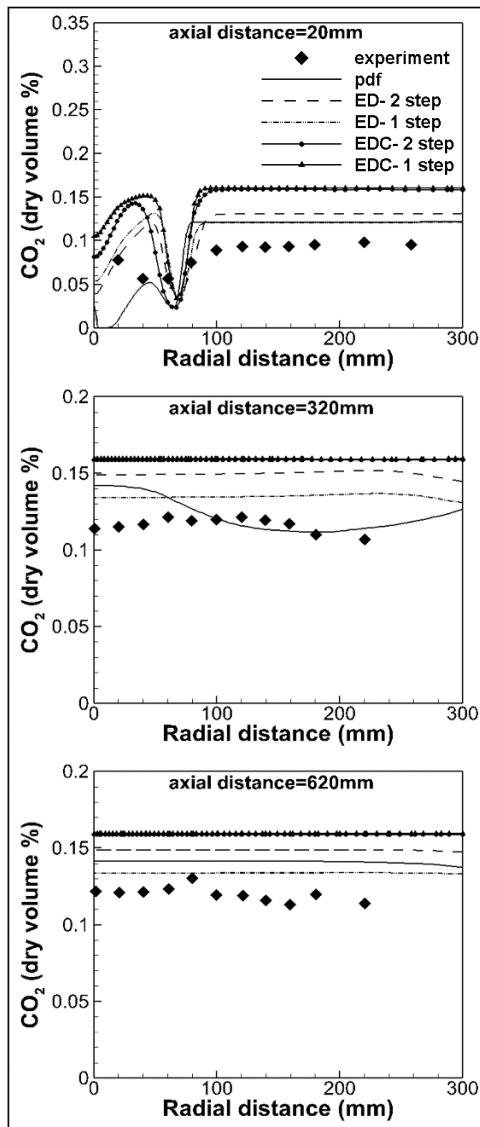
معادلات انتقال فاز گازی به صورت پایا تحلیل می‌شود و معادله حرکت قطره‌ها در بازه‌های زمانی به اندازه ۱۰ میکرو-ثانیه حل می‌شود. مدل حجم-محدود برای تحلیل معادلات استفاده می‌شود. از طرفی، معادله فشار با الگوریتم SIMPLE تحلیل می‌شود. همچنین، جملات انتقالی با استفاده از روش 2^{nd} order-upwind جداسازی می‌شوند.

۲-۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی کوره با مدل‌های احتراقی مختلف

پروفیل شعاعی تغییر کسر مولی گونه‌های NO ، O_2 ، CO_2 و CO در سه فاصله محوری مختلف شامل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر در مرجع [۴] ارائه شده است. مشابهاً، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای گونه‌های یاد شده و در فواصل مذکور ارائه می‌شوند.

شکل (۳) پروفیل کسر مولی NO را در فواصل محوری ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. در شکل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های مختلف احتراقی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. مطابق شکل در فاصله ۲۰ میلی‌متری و در فواصل شعاعی زیر ۱۰۰ میلی‌متر مدل احتراقی EDC-1 step پیش‌بینی دقیق‌تری از کسر مولی NO ارائه می‌کند. اما در فواصل شعاعی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر مقدار پیش‌بینی شده در نزدیکی محور کوره بسیار بیشتر از داده‌های آزمایش می‌باشد. با مقایسه نمودارها در فاصله محوری ۲۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود که مدل احتراقی pdf با ۱۱٪ خطا در تمام فواصل شعاعی پیش‌بینی قابل قبولی ارائه می‌کند. از طرفی، نتایج حاصل از این مدل احتراقی در فواصل ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر به داده‌های تجربی نزدیک‌تر است. این در حالی است که پیش‌بینی مدل احتراقی EDC-2 step در فواصل ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر اختلاف قابل توجهی با داده‌های تجربی دارد. در فاصله ۶۲۰ میلی‌متر که نوعاً احتراق به اتمام رسیده است هر یک از

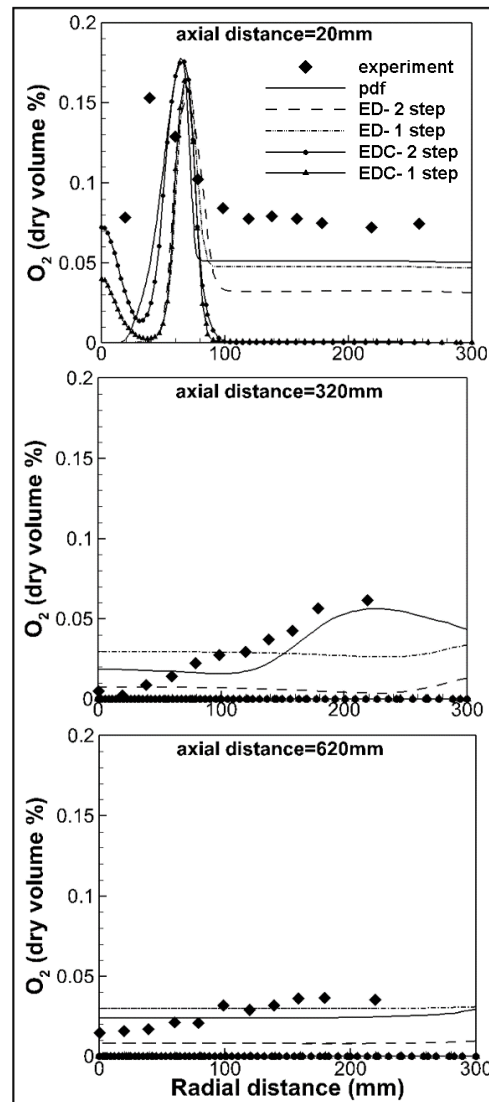
یافته است، مدل احتراقی ED-1 step با ۱۰٪ خطا پیش‌بینی دقیق‌تری از کسر مولی CO₂ ارائه می‌کند. پس از آن مدل pdf با ۱۷٪ خطا پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌های احتراقی داشته است.



شکل ۵- پروفیل شعاعی کسر مولی CO₂ در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مرجع [۴]

شکل (۶) پروفیل شعاعی کسر مولی گونه CO را در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر ارائه می‌کند. در مدل‌های احتراقی تک-مرحله‌ای که فاقد واکنش اکسید شدن CO هستند کسر مولی این گونه شیمیایی پیش‌بینی نشده است. مطابق شکل در فاصله محوری ۲۰ میلی‌متری و در فاصله شعاعی کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر مدل احتراقی ED-2 step دقت بیشتری در پیش‌بینی کسر مولی گونه CO دارد. از طرفی، در این ناحیه، نتایج حاصل از مدل احتراقی pdf اختلاف بسیار زیادی با داده‌های تجربی دارد. از طرفی در فاصله محوری ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر، مدل‌های احتراقی مورد استفاده کسر مولی CO را با دقت مناسبی پیش‌بینی نمی‌کنند. مدل ED-2step و EDC-2step در فاصله ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر کسر مولی گونه CO را برابر با صفر پیش‌بینی می‌کنند که با مقایسه با داده‌های تجربی مشخص می‌شود این پیش‌بینی نادرست است. از طرفی، مدل pdf کسر

خلاف داده‌های تجربی، برابر با صفر پیش‌بینی می‌کند، پیش‌بینی مناسبی از پروفیل کسر مولی O₂ ارائه می‌کند. مدل ED-1step اگرچه ضعف مدل pdf را در فاصله ۲۰ میلی‌متر ندارد، اما در فاصله ۳۲۰ میلی‌متر دقت آن کمتر از مدل pdf است.



شکل ۴- پروفیل شعاعی کسر مولی O₂ در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مرجع [۴]

شکل (۵) پروفیل شعاعی کسر مولی گونه CO₂ را در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر ارائه می‌کند. در فاصله ۲۰ میلی‌متر و در فواصل شعاعی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر هر یک از مدل‌های pdf، ED-2step، ED-1step، EDC-2step و EDC-1step کسر مولی CO₂ را به ترتیب با ۱۵، ۳۰، ۵۸ و ۵۸ درصد خطا پیش‌بینی می‌کنند. اما، مدل pdf در فواصل شعاعی حدود ۲۰ میلی‌متر کسر مولی CO₂ را حدود صفر پیش‌بینی می‌کند که با توجه به حضور شعله در این ناحیه، این پیش‌بینی می‌تواند دور از واقعیت باشد. ضمن اینکه مدل احتراقی EDC-2step تک-مرحله‌ای و دو مرحله‌ای- نسبت به سایر مدل‌های احتراقی دقت کمتری دارند. مطابق شکل (۵) در فاصله ۳۲۰ میلی‌متر مجدداً مدل pdf نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری از پروفیل کسر مولی CO₂ ارائه می‌کند. اما، در فاصله محوری ۶۲۰ میلی‌متر که از شعله دورتر است و نوعاً فرآیند احتراق پایان

فاصله ۲۰ میلی‌متر و دور از محور کوره، مدل احتراقی pdf با ۱۱٪ خطا پیش‌بینی قابل قبولی از پروفیل کسر حجمی گونه NO ارائه می‌کند. در فاصله ۶۲۰ میلی‌متر که نوعاً احتراق به اتمام رسیده است هر یک از مدل‌های pdf، ED-1step، ED-2step، EDC-2step و EDC-1step کسر حجمی NO را به ترتیب با حدود ۱۲، ۱۹، ۳۶ و ۷۰٪ درصد خطا پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین، مدل‌های pdf و EDC-1step دقت بیشتری در پیش‌بینی کسر حجمی گونه NO دارند.

مقایسه نتایج برای کسر مولی گونه O₂ نشان داد که در فاصله ۲۰ میلی‌متری مدل‌های احتراقی pdf و ED-1 step نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی دقیق‌تری از کسر مولی O₂ ارائه می‌کنند. مدل pdf به جز در فاصله ۲۰ میلی‌متری و در نزدیکی محور کوره که کسر مولی O₂ را بر خلاف داده‌های تجربی، برابر با صفر پیش‌بینی می‌کند، در تمام نواحی پیش‌بینی مناسبی از پروفیل کسر مولی O₂ ارائه می‌کند. از طرفی، مدل ED-1step اگرچه ضعف مدل pdf را در فاصله ۲۰ میلی‌متر ندارد، اما در فاصله ۳۲۰ میلی‌متر دقت آن کمتر از مدل pdf است. سایر مدل‌های احتراقی شامل ED-2step، EDC-2step و EDC-1step بخصوص در فواصل دور از محور کوره دقت پایینی در پیش‌بینی کسر مولی O₂ دارند.

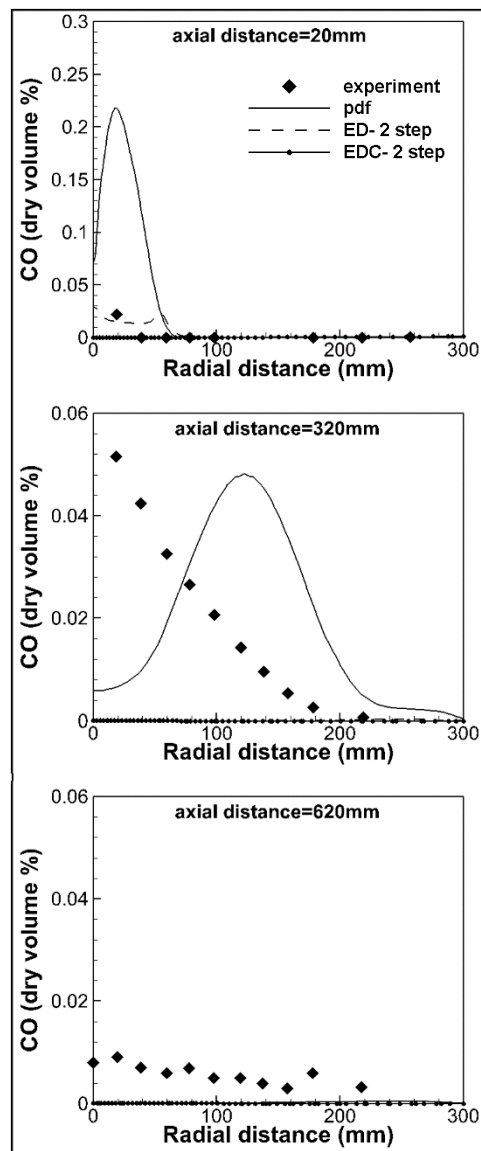
مقایسه نتایج برای کسر مولی گونه CO₂ نشان داد که در فاصله ۲۰ میلی‌متر و در فواصل شعاعی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر هر یک از مدل‌های pdf، ED-1step، ED-2step، EDC-1step و EDC-2step کسر مولی CO₂ را به ترتیب با ۱۵، ۳۰، ۱۵، ۵۸ و ۵۸ درصد خطا پیش‌بینی می‌کنند. اما، در فاصله محوری ۶۲۰ میلی‌متر که از شعله دورتر است و نوعاً فرآیند احتراق پایان یافته است، مدل احتراقی ED-1 step با ۱۰٪ خطا پیش‌بینی دقیق‌تری از کسر مولی CO₂ ارائه می‌کند. پس از آن مدل pdf با ۱۷٪ خطا پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌های احتراقی داشته است. نهایتاً، مقایسه نتایج برای کسر مولی گونه CO نشان داد که در فاصله محوری ۲۰ میلی‌متری و در فاصله شعاعی کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر مدل احتراقی ED-2 step دقت بیشتری در پیش‌بینی کسر مولی گونه CO دارد. از طرفی، در این ناحیه، نتایج حاصل از مدل احتراقی pdf اختلاف بسیار زیادی با داده‌های تجربی دارد. همچنین، در فاصله ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر، مدل‌های احتراقی مورد استفاده کسر مولی CO را بر خلاف داده‌های تجربی برابر با صفر پیش‌بینی می‌کنند.

در حالت کلی، مشاهده شد که مدل‌های pdf و ED-1 step دقت بیشتری در پیش‌بینی کسر مولی گونه‌های NO، O₂ و CO₂ دارند. در حالی که مدل pdf پیش‌بینی دقیق‌تری برای کسر مولی CO ارائه نمی‌کند.

فهرست علائم

A_p	مساحت قطره
B_m	عدد وزنی اسپالادینگ
B_T	عدد انتقال حرارت اسپالادینگ
C_p	ظرفیت حرارتی ویژه
d	قطر قطره
D	ضریب پخش بخار در فاز پیوسته
h	ضریب انتقال حرارت همرفتی
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
K_c	ضریب انتقال جرم
K_{∞}	ضریب هدایت حرارتی فاز گازی

مولی CO را در فاصله ۳۲۰ میلی‌متری، مقداری غیر از صفر پیش‌بینی می‌کند اما پیش‌بینی ارائه شده تا دو برابر بیشتر از مقدار تجربی است. همچنین، در فاصله ۶۲۰ میلی‌متری این مدل احتراقی نیز مشابه مدل‌های دیگر کسر مولی گونه CO را برابر با صفر پیش‌بینی می‌نماید.



شکل ۶- پروفیل شعاعی کسر مولی CO در فواصل ۲۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ میلی‌متر و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مرجع [۴]

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان می‌دهد که در حالت کلی، مدل‌های pdf و ED-1 step دقت بیشتری در پیش‌بینی کسر مولی گونه‌های NO، O₂ و CO₂ دارند. در حالی که مدل pdf پیش‌بینی دقیق‌تری برای کسر مولی CO ارائه نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ابتدا مدل‌های احتراقی که قابلیت شبیه‌سازی احتراق مازوت را دارند معرفی شدند. سپس، اقدام به شبیه‌سازی عددی یک کوره آزمایشگاهی مازوت‌سوز گردید. برای ارزیابی قابلیت مدل‌های احتراقی مختلف در شبیه‌سازی احتراق مازوت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود مقایسه گردید. مقایسه نتایج برای گونه NO نشان داد که در

Swirl Burner Based on Semi-Industrial Scale Experimental Tests", *Energy & Fuels*, 27 (9). pp. 5029-5035.

9- Bonefačić, I., Wolf, I., and Blečić, P., 2017, "Improvement of fuel oil spray combustion inside a 7MW industrial furnace: A numerical study", *Applied Thermal Engineering* 110: 795-804.

10- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J., 1995, "A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation". *Computers Fluids*. 24 (3). 227-238.

11- Chui, E.H., Raithby, G.D., 1993, "Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method", *Numerical Heat Transfer, Part B*. 23. 269-288.

12- Smith, T.F., Shen, Z.F., Friedman, J.N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model". *J. Heat Transfer*. 104. 602-608.

13- Wen, Z., Yun, S., Thomson, M.J., Lightstone, M.F., 2003, "Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames", *Combustion and Flame*, 135, 323-340.

14- Khan, I. M. and Greeves, G., 1974, "A method for calculating the formation and combustion of soot in diesel engines", *Heat Transfer in Flames*, Washington DC.

15- Panton, R., 1996, *Incompressible flow*. J. Wiley, New York.

16- FLUENT User's Guide, FLUENT Incorporated, Lebanon, New Hampshire, USA, 2006.

17- Morsi, S.A., Alexander, A.J., 1972 "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems", *J. Fluid Mech.* 55(2). 193-208.

18- Gosman, A.D., Ioannides, E., 1983, "Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors". *J. Energy*. 7(6). 482-490.

19- Sazhin, S.S., 2006, "Advanced Models of Fuel Droplet Heating and Evaporation", *Progress in Energy and Combustion Science* 32: 162-214.

20- Ranz, W.E., W. R. Marshall, Jr., 1952, "Evaporation from Drops, Part I and Part II". *Chem. Eng. Prog.* 48(4). 173-180.

21- Jones, W.P., Whitelaw, J.H., 1982, "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review". *Combustion and Flame*. 48. 1-26.

22- Magnussen B.F., Hjertager, B. H., 1976, "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion". In 16th Symp on Combustion.

23- Magnussen, B. F., 1981, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow", 19th AIAA Meeting, St. Louis.

24- Hanson RK, Salimian S., 1984, "Survey of rate constants in H/N/O systems", In: Gardiner WC, *Combustion chemistry*, p. 361.

25- DeSoete, G. G., 1975, "Overall Reaction Rates of NO and Formation from Fuel Nitrogen". In 15th Symp. On Combustion. The Combustion Institute. 1093-1102.

m	جرم قطره
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرائنتل
Re	عدد رینولدز
Sh	عدد شروود
Sc	عدد اسمیت
T	دما
f	کسر مخلوط
f''	پراکنش کسر مخلوط
Y_i	کسر جرمی گونه i
$R_{i,r}$	نرخ تولید گونه i در واکنش r
P_{fuel}	فشار جزئی بخار سوخت
$M_{w,i}$	وزن مولکولی گونه i
فهرست علائم یونانی	
ε	ضریب نشر تشعشع، نرخ اضمحلال آشفته
σ	ثابت استفان-بولتزمان
θ	دمای تشعشعی
v	سرعت فاز گازی
ρ	چگالی
$v_{i,r}$	ضریب استوکیومتری واکنش گر i در واکنش r
$v''_{i,r}$	ضریب استوکیومتری گونه i (محصول واکنش) در واکنش r
μ	ضریب لزجت فاز گازی
ϕ	نسبت هم‌ارزی سوخت

مراجع

1- Abbas, A.S., 1982, "The prediction of the performance of heavy oil-fired combustors", PhD Thesis, University of London, UK.

2- Carvalho, M. G. M. S., Durao, D. F. G., and Pereira, J. C. F., 1987, "Prediction of the flow, reaction and heat transfer in an Oxy-fuel glass furnace", *engineering computations* 4.1: 23-34.

3- Barreiros, A., Carvalho, M., Costa, M. & Lockwood, F., 1993, "Prediction of the near burner region and measurements of NOx and particulate emissions in heavy fuel oil spray flames", *Combustion and Flame*. 92 (3). pp. 231-240.

4- Saario, A., Rebola, A., Coelho, P., Costa, M. and Oksanen, A., 2005, "Heavy fuel oil combustion in a cylindrical laboratory furnace: measurements and modeling", *Fuel*, 84 (4). pp. 359-369.

5- مهدی پوررمضان، ۱۳۹۲، "بررسی علل سوختگی لوله‌های نگه‌دارنده در بویلر نیروگاه توس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

6- Pourramezan, M., Kahrom, M., and Passandideh-Fard, M., 2015, "Numerical investigation on the lifetime decline of burners in a wall-fired dual-fuel utility boiler", *Applied Thermal Engineering* 82: 141-151.

7- Park, J.K., Park, S., Ryu, C., Baek, S.H., Kim, Y.J. and Park, H.Y., 2017, "CFD analysis on bioliquid co-firing with heavy fuel oil in a 400 MWe power plant with a wall-firing boiler", *Appl. Therm. Eng.* 124: 1247-1256.

8- Zhou, H., Ren, T., Huang, Y., Hu, S. & Cen, K., 2013, "Low-NOx Modification of a Heavy Fuel Oil