

بررسی عملکرد حرارتی مشعل اکسی-کروسین به منظور دستیابی به دماهای احتراق بالاتر در مصرف اکسیژن کمتر

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

محمدحسن سعیدی
استاد، قطب علمی تبدیل انرژی،
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
saman@sharif.edu

مجید غفوری‌زاده
دکتر، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
m_ghafourizadeh@ae.sharif.edu

محمدباقر بارزبان

دانشجوی دکتری، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
barezban@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر، یک شعله آشفته کروسین که در یک محفظه محصور شده است شبیه‌سازی شده و به بررسی رفتار حرارتی و دوده در آن پرداخته می‌شود. برای انجام این کار، یک برنر که با اکسیدکننده‌های هوا و اکسیژن کار می‌کند در نظر گرفته می‌شود. در ادامه با تغییر مقدار کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده به بررسی اثر غنی‌سازی اکسیژن بر روی رفتار حرارتی برنر پرداخته می‌شود. همچنین به بررسی اثر تغییر سرعت اکسیژن خالص ورودی (به عنوان اکسیدکننده) پرداخته می‌شود. در ابتدا لازم است تا از صحت عملکرد ابزار عددی (مورد استفاده برای شبیه‌سازی) جهت پیش بینی ساختار شعله و مشخصه‌های حرارتی شعله اطمینان حاصل شود. بدین منظور، شعله آشفته کروسین-هوا شبیه‌سازی و به مقایسه نتایج عددی بدست آمده با داده‌های تجربی اقدام می‌شود. نتایج بدست آمده حاکی از اعتبار جواب عددی بدست آمده برای پیش بینی ساختار شعله آشفته فوق-الذکر است. سپس، با تغییر کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده به مقایسه نتایج احتراق اکسی-سوخت با نتایج احتراق کروسین-هوا پرداخته می‌شود. با انجام این روند، اثر غنی‌سازی اکسیژن آشکار می‌شود. همچنین سرعت اکسیژن خالص ورودی (به عنوان اکسیدکننده) تغییر داده شده و به بررسی اثر آن پرداخته می‌شود. مطالعات حاضر نشان می‌دهد که با طراحی مناسب برنر اکسی-سوخت می‌توان علیرغم اکسیژن مصرفی کمتر به دماهای بالای شعله دست یافت.

کلمات کلیدی: اکسی-کروسین برنر، نانوذرات دوده، غنی‌سازی اکسیژن، سرعت اکسیدکننده، تشعشع

۱-مقدمه

استفاده از اکسیژن به عنوان اکسیدکننده در احتراق (احتراق اکسی-سوخت) مزایای متعددی به همراه دارد. یک مزیت مهم این نوع احتراق، انتشار کم اکسیدهای نیتروژن گازی شکل NO_x می‌باشد. مزیت دیگر این نوع احتراق، دستیابی به دمای بالا به سبب حذف گاز نیتروژن (موجود در هوا که به عنوان اکسیدکننده در ادوات احتراقی استفاده می‌شود) که دارای ظرفیت گرمایی بالایی است، می‌باشد. مزایای فوق الذکر، این نوع احتراق را گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع مختلف نظیر شیشه، آلومینیوم، فولاد، مشعل و کوره نموده است. برخی صنایع نظیر ساخت و تولید شیشه

[۱]، شکل دهی و نورد فلزات که نیاز به مقدار زیادی از گرما و حرارت دارند، این نوع احتراق را در کوره‌های موجود به کار گرفته اند. لیکن، موانع عمده در بکارگیری این نوع احتراق، هزینه‌های اقتصادی بالا، ملاحظات فنی خاص و نیاز به مقادیر قابل توجهی از اکسیژن است. مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که محققین زیادی به مطالعات مربوط به تامین اکسیژن مورد نیاز برای این نوع احتراق همت گماشته‌اند [۲-۱۰]. لیکن، انجام مطالعات بیشتر بر روی این نوع احتراق به جهت شناخت و یا ارائه راهکارهایی برای افزایش راندمان حرارتی، همواره از ضروریات امر است.

محققین زیادی تشکیل گونه‌های شیمیایی گازی شکل در فرآیند احتراق را بررسی نموده‌اند. این در حالی است که در رابطه با سایر گونه‌های شیمیایی (غیرگازی شکل) لازم است تا ملاحظات بیشتر و بررسی قابل توجهی صورت پذیرد. یکی از این گونه‌های مهم دوده می‌باشد که نیاز است تا توجه بیشتری به آن در رابطه با نحوه تشکیل و کنترل آن معطوف شود. دوده یکی از گونه‌های مهم آئروسول و دارای اندازه بسیار کم (قطر ذرات نانومیکرومتری) بوده که به صورت معلق در هوا (و یا محصولات گازی شکل احتراق) وجود دارد. این نانوذرات معلق در اتمسفر و یا محصولات احتراقی اثرات شدیدی بر روی انتقال حرارت تشعشعی دارند. بنابراین، این نانوذرات بایستی از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.

دینامیک سیالات محاسباتی CFD به عنوان یک وسیله محاسباتی برای پیش بینی گونه‌های شیمیایی در برنرهای مختلف و همچنین بهبود طرح‌ها از دیدگاه‌های مختلف کاربرد فراوانی داشته است. با مروری بر ادبیات موضوع می‌توان دریافت که در دهه‌های اخیر مدل‌سازی آئروسول دوده غالباً در شعله‌های آرام و عمدتاً برای سوخت‌های هیدروکربنی ساده صورت گرفته است [۱۱-۱۵]. این در حالی است که برای سوخت‌های هیدروکربنی ساده، مدل‌سازی نانو آئروسول دوده در شعله‌های آشفته کمتر مورد بررسی و عنایت قرار گرفته است [۱۶-۱۹]. این مساله برای سوخت‌های رایج نظیر کروسین [۲۰، ۲۱]، بنزین [۲۲] و دیزل [۲۳، ۲۴] به شدت حادتر هم می‌شود. لذا با توجه به اهمیت این موضوع لازم است تا احتراق آشفته سوخت‌های رایج همانند کروسین مورد توجه بیشتری قرار گرفته و نحوه تشکیل دوده در این شعله‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، هدف بررسی رفتار حرارتی برنر اکسی-کروسین تحت شرایط مختلفی نظیر غنی‌سازی اکسیژن در اکسیدکننده و همچنین سرعت‌های مختلف اکسیژن ورودی است. برای انجام اینکار، مدل دومعدله‌ای دوده، مدل دومعدله‌ای آشفته‌گی $K-\epsilon$ ، مدل احتراقی فلیمیت و مکانیزم

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} \kappa) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \vec{\nabla} \kappa \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_\kappa} \frac{1}{r} \frac{\partial \kappa}{\partial r} + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} \varepsilon) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 G_\kappa - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

در معادلات فوق، جمله تولید G_κ می‌تواند از رابطه

$$G_\kappa = \mu_e \left[2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

شود. با در نظر گرفتن جت محصور و مدور، ثوابت مدل آشفتگی در روابط فوق به صورت $C_1 = 1.44$ ، $\sigma_\varepsilon = 1.22$ ، $\sigma_\kappa = 0.9$ و $C_2 = 1.84$ خواهند بود [۲۶]. همچنین نیاز است تا در نزدیکی دیواره از توابع دیواره مناسب استفاده شود. به بیان دیگر، از مقادیر κ و ε بدست آمده از این روابط جهت اعمال شرط مرزی آشفتگی در نزدیکی دیواره استفاده می‌شود [۲۷].

۲-۳- انرژی و معادله انتقال حرارت

چنانچه عدد لویس برابر واحد فرض شود، معادله انرژی می‌تواند به صورت زیر (معادله انتقال انتالپی کل) خلاصه شود:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} h) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \vec{\nabla} h \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + q_{rad} \quad (6)$$

در مطالعه حاضر، تابش حرارتی با فرض گازهای اپتیک ضخیم حساب می‌گردند. لذا جمله چشمه در معادله بقای انرژی تنها به صورت تابش گونه‌های شیمیایی تابنده لحاظ شده و از رابطه $q_{rad} = -4\sigma \sum_{m=1}^n p_m \alpha_{p,m} (T^4 - T_\infty^4) - \alpha_{soot} T^5 \rho m^* / \rho_{soot}$ بدست می‌آید. تابش دوده نیز با فرض اینکه در محدوده اپتیک ضخیم قرار دارد، مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

۲-۴- احتراق و معادلات آن

برای مدل سازی احتراق در شعله غیر پیش آمیخته آشفته از مدل فلیملت استفاده شده است [۲۸]. مفهوم فلیملت، به شعله آشفته به صورت مجموعه ای از ساختارهای فلیملت در میدان جریان سیال می‌نگرد. این فلیملت‌ها به صورت ثابت، محلی، تک بعدی، آرام و نازک در نظر گرفته می‌شوند. به بیان دیگر، مجموعه فلیملت‌های آرام به وسیله جریان سیال آشفته اطراف مورد کشش و تغییر شکل قرار می‌گیرند. با در نظر گرفتن مدل احتراقی فلیملت گونه‌های شیمیایی مختلف با مکانیزم سینتیک شیمیایی جزئی وارد محاسبات می‌شوند. برای تسخیر فرایند تحولی دوده به صورت دقیق، از یک مکانیزم شیمیایی شامل ۱۲۱ گونه و ۲۶۱۳ واکنش شیمیایی استفاده می‌شود. جدول ۱ لیست این گونه‌های شیمیایی را نشان می‌دهد. جهت اعمال مدل احتراقی فلیملت، بایستی دو معادله انتقال برای کسر مخلوط و پراکنش کسر مخلوط بر روی دامنه حل به صورت عددی حل شود. معادلات انتقال برای دو ممان اول کسر مخلوط به صورت زیر است:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} f) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_f} \vec{\nabla} f \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_f} \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} \quad (7)$$

شیمیایی متشکل از ۱۲۱ گونه شیمیایی و ۲۶۱۳ واکنش شیمیایی بنیادین بکار گرفته می‌شوند. در ابتدا لازم است تا طبق روال مرسوم در هر شبیه‌سازی عددی نتایج بدست آمده اعتبار سنجی شوند. لذا در اینجا نیز لازم است تا از دقت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در پیش بینی ساختار شعله اطمینان حاصل شود. لذا یک مساله معیار که دارای نتایج تجربی است جهت اعتبارسنجی حل عددی حاضر انتخاب می‌شود. بدین منظور یک شعله غیر پیش آمیخته کروسین-هوا انتخاب شده و نتایج بدست آمده از حل عددی در پیش بینی ساختار شعله با داده‌های تجربی موجود مقایسه می‌شوند. به بیان بهتر، نتایج بدست آمده از حل عددی برای توزیع کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده در داخل شعله با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش با هم مقایسه می‌شوند. با انجام مقایسه مزبور، از توانایی و دقت حل عددی حاضر در پیش بینی ساختار شعله اطمینان حاصل می‌شود. در ادامه، مقدار کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده افزایش داده شده، به نحوی که اکسیدکننده منتشکل از اکسیژن خالص شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده با هم مقایسه شده تا روند و شدت تاثیر حاکم بر آن شناسایی شود. همچنین با در نظر گرفتن اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده، سرعت اکسیدکننده را افزایش داده، رفتار حرارتی برنر و دوده تولید شده در برنر اکسی-کروسین مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با شناسایی روند و شدت تاثیر هر یک از دو پارامتر فوق (غنی سازی اکسیژن و سرعت اکسیژن خالص ورودی) بر روی رفتار حرارتی برنر، پیشنهادهای ارائه می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

برای تحلیل جریان احتراقی آشفته پایای تقارن محور، می‌توان معادلات نویر-استوکس به همراه معادلات انتقال برای انرژی، ممان‌های کسر مخلوط، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن را حل عددی نمود.

۲-۱- جریان سیال و معادلات آن

در مختصات استوانه‌ای (r, z) معادلات حاکم جریان به شرح زیر می‌باشند:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) + \rho \frac{u}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} u) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \vec{\nabla} \cdot (\mu_e \vec{\nabla} u) + \mu_e \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \mu_e \frac{u}{r^2} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} v) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \vec{\nabla} \cdot (\mu_e \vec{\nabla} v) + \mu_e \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \vec{B}_z \quad (3)$$

که در روابط فوق، نیروی بویانسی برابر $\vec{B}_z = -\rho \vec{g}$ و ضریب لزجت موثر برابر $\mu_e = \mu_1 + \mu_t$ می‌باشند. در مطالعه حاضر، μ_1 به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

۲-۲- آشفتگی و معادلات آن

با استفاده از مدل آشفتگی $\kappa - \varepsilon$ استاندارد، به حل کمیات آشفتگی-انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن-پرداخته شده و سپس از روی آن ضریب لزجت آشفته جریان از رابطه $\mu_t = c_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon$ -که در آن $c_\mu = 0.09$ می‌باشد- محاسبه می‌گردد. معادلات انتقال برای این کمیات آشفتگی به شرح زیر می‌باشند:

C ₄ H ₆	HCCO	NC ₁₆ H ₃₃
RC ₉ H ₁₁	C ₆ H ₄ CH ₃	IC ₄ H ₉ T
CH ₃ COCH ₂	CH ₃ OCO	CH ₃
IC ₁₆ H ₃₄	C ₁₀ H ₈	NC ₇ H ₁₄
C ₃ H ₈	CH ₃ COCH ₃	CH ₂ CO
H ₂		

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} f''^2) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_f} \vec{\nabla} f''^2 \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_f} \frac{1}{r} \frac{\partial f''^2}{\partial r} + \quad (8)$$

$$c_g \mu_e (\vec{\nabla} f)^2 - \rho c_\chi \frac{\varepsilon}{\kappa} f''^2$$

در معادلات فوق، $c_\chi = 2.0$ و $c_g = 2.86$. اندرکنش آشفتهگی-شیمی به وسیله توابع چگالی احتمال مرسوم مورد محاسبه قرار می‌گیرد. پس از انجام محاسبات مربوطه، نتایج بدست آمده به صورت جداول مراجعه تهیه شده به نحوی که با رجوع به این جداول، کمیات ترموشیمیایی در کل دامنه حل بدست می‌آیند.

جدول ۱- گونه‌های شیمیایی موجود در مکانیزم شیمیایی مورد استفاده

AR	N ₂	O ₂
CH ₄	CH ₃ OH	C ₂ H ₂
PC ₃ H ₄	C ₂ H ₃ CHO	C ₃ H ₆
IC ₄ H ₈	NC ₄ H ₈	CYC ₅ H ₆
C ₇ H ₈	C ₆ H ₅ CH ₂ OH	CRESOL
INDENE	NPBENZ	TMBENZ
NC ₁₂ H ₂₆	C ₁₆ H ₁₀	NC ₁₆ H ₃₄
HCO	CH ₂ S	CH ₂
C ₂ H ₃	CH ₂ CHO	CH ₃ CO
CHCHCH ₃	CH ₂ CHCH ₂	CH ₂ CCH ₃
CH ₂ C ₃ H ₅	SC ₄ H ₇	NC ₄ H ₉ P
C ₆ H ₅	C ₆ H ₅ O	C ₇ H ₇
RXYLENE	IC ₈ H ₁₇	INDENYL
NC ₁₀ H ₂₁	NC ₁₂ H ₂₅	IC ₁₆ H ₃₃
IC ₈ H ₁₈	NC ₁₀ H ₂₂	CH
NC ₁₀ H ₁₉	CO ₂	C ₃ H ₂
HO ₂	C ₂ H	C ₂ H ₅ OO
C ₆ H ₅ CHO	NC ₇ H ₁₅	CH ₂ O
H ₂ O	H ₂ O ₂	CO
C ₂ H ₄	CH ₃ CHO	C ₂ H ₆
C ₃ H ₅ OH	C ₄ H ₂	C ₄ H ₄
NC ₅ H ₁₀	C ₆ H ₄ O ₂	C ₆ H ₆
MCYC ₆	C ₆ H ₅ C ₂ H	XYLENE
C ₁₀ H ₇ OH	TETRALIN	DECALIN
O	H	OH
CH ₃ O	CH ₂ OH	CH ₃ OO
C ₂ H ₅	C ₂ H ₄ OH	C ₂ -QOOH
NC ₃ H ₇	IC ₃ H ₇	C ₄ H ₃
C ₃ H ₃	IC ₄ H ₇	NEOC ₅ H ₁₁
C ₆ H ₅ OH	IC ₈ H ₁₆	NC ₁₀ H ₂₀
NC ₅ H ₁₁	NC ₇ H ₁₃	RDECALIN
CYC ₅ H ₅	NC ₅ H ₉₋₃	IC ₄ H ₉ P
RMCYC ₆	RCRESOLC	RCRESOLO
RTETRALIN	C ₁₀ H ₇ O	C ₁₀ H ₇
IC ₃ H ₅ CHO	AC ₃ H ₄	C ₄ H ₅

۲-۵- آئروسول دوده و معادلات آن

جهت در نظر گرفتن شیمی و دینامیک آئروسول دوده، مدل دو معادله‌ای دوده - که در آن دو معادله انتقال برای کسر جرمی و چگالی تعداد دوده حل می‌شود- انتخاب می‌شود. این معادلات انتقال در زیر آمده است:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} m^*) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_{soot}} \vec{\nabla} m^* \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_{soot} r} \frac{\partial m^*}{\partial r} + S_m^* \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} n^*) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_e}{\sigma_{nuc}} \vec{\nabla} n^* \right) + \frac{\mu_e}{\sigma_{nuc} r} \frac{\partial n^*}{\partial r} + S_n^* \quad (10)$$

با فرض انعقاد دوده از فاز گازی شکل و همچنین انباشتگی در رژیم مولکولی آزاد، جملات چشمه در معادلات بقای کسر جرمی و عدد چگالی دوده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$S_m^* = C_1 \rho^2 \left(\frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5} W_{H_2}}{W_{C_6H_5} Y_{H_2}} e^{-4378/T} +$$

$$C_2 \rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-6390/T} +$$

$$C_3 \rho \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} e^{-12100/T} (\pi \rho N_A n^*)^{1/3} \left(\frac{6 \rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{2/3} -$$

$$C_4 \rho \frac{Y_{OH}}{W_{OH}} \sqrt{T} (\pi \rho N_A n^*)^{1/3} \left(\frac{6 \rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$S_n^* = \frac{C_1}{M_p} \rho^2 \left(\frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5} W_{H_2}}{W_{C_6H_5} Y_{H_2}} e^{-4378/T} +$$

$$\frac{C_2}{M_p} \rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-6390/T} -$$

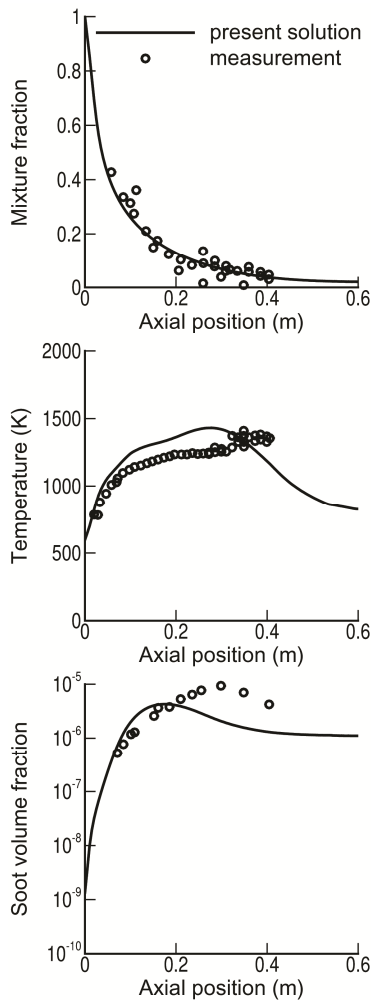
$$\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{24RT}{\rho_{soot} N_A}} \left(\frac{6 \rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{1/6} (\rho N_A n^*)^{11/6} \quad (12)$$

که در روابط فوق $\rho_{soot} = 2000 \text{ kg/m}^3$ ، $M_p = 144 \text{ kg/kgm ol}$ ، $C_1 = 1016 \times 10^{8.88} \text{ s}^{-1}$ ، $N_A = 6.022045 \times 10^{26} \text{ km ol}^{-1}$ ، $C_2 = 1424 \times 10^{9.50} \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ و $C_3 = 11700 \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ و $C_4 = 4.2325 \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ K}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که معادله حالت گاز (معادله گاز کامل) به صورت $p = \rho R T \sum_{m=1}^n Y_m / W_m$ در نظر گرفته می‌شود که در آن m شمارنده تعداد گونه‌های شیمیایی در مخلوط می‌باشد.

۳-نتایج و بحث بر روی آن

۳-۱- اعتبارسنجی حل عددی

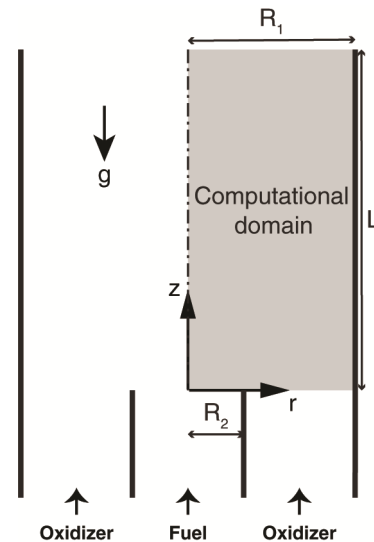
است. جهت صحت‌سنجی حل عددی حاضر ساختار پیش‌بینی شده برای شعله مزبور با مقادیر تجربی آن مقایسه شده است. شکل ۲ توزیع‌های کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده بدست آمده در امتداد خط مرکزی شعله و مقایسه آنها با داده‌های تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ساختار شعله بدست آمده از حل عددی حاضر و مقایسه آن با داده‌های تجربی

شکل ۲ نشان می‌دهد که حل عددی بدست آمده در کار حاضر از تطابق بالایی با داده‌های تجربی [۳۰] برخوردار است. چنانچه طول شعله را مکان کسر مخلوط استوکیومتری بر روی محور محفظه در نظر بگیریم، طول شعله تقریباً برابر $0.3m$ بدست می‌آید. مقدار کسر مخلوط استوکیومتری برای سوخت نرمال-دکان برابر 0.0615 می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود این طول با مکان مقدار بیشینه دما بر روی محور محفظه احتراق تطابق دارد. همچنین دیده می‌شود که در پایین دست محفظه احتراق، مقدار کسر مخلوط بر روی محور مرکزی محفظه کمتر از میزان استوکیومتری آن است. این مطلب بیانگر این است که این مناطق رقیق از سوخت بوده و لذا کروسین به نحو مناسبی سوخته و طول محفظه احتراق جهت سوختن کروسین ورودی به محفظه کفایت می‌کند. در شکل ۲ دیده می‌شود که مقدار بیشینه دمای شعله بر روی محور محفظه احتراق کمتر از دمای آدیاباتیک شعله کروسین-هواس. دمای آدیاباتیک شعله کروسین-هوا برابر $2366K$ می‌باشد. چنانچه در شکل ۲ دیده می‌شود مقداری اختلاف بین نتایج عددی بدست آمده با داده‌های آزمایش [۳۰] وجود دارد. اختلاف

در اینجا یک شعله آشفته غیر پیش آمیخته بخار کروسین-هوا که یک مساله معیار می‌باشد جهت اعتبارسنجی حل عددی انجام شده در کار حاضر انتخاب می‌شود. این مساله قبلاً توسط یانگ و همکاران [۳۰] مطالعه تجربی شده است. لذا به حل عددی این مساله با اعمال نمودن شرایط آزمایش تجربی صورت گرفته پرداخته می‌شود. شکل ۱ هندسه و مشخصات این مساله را نمایش می‌دهد.



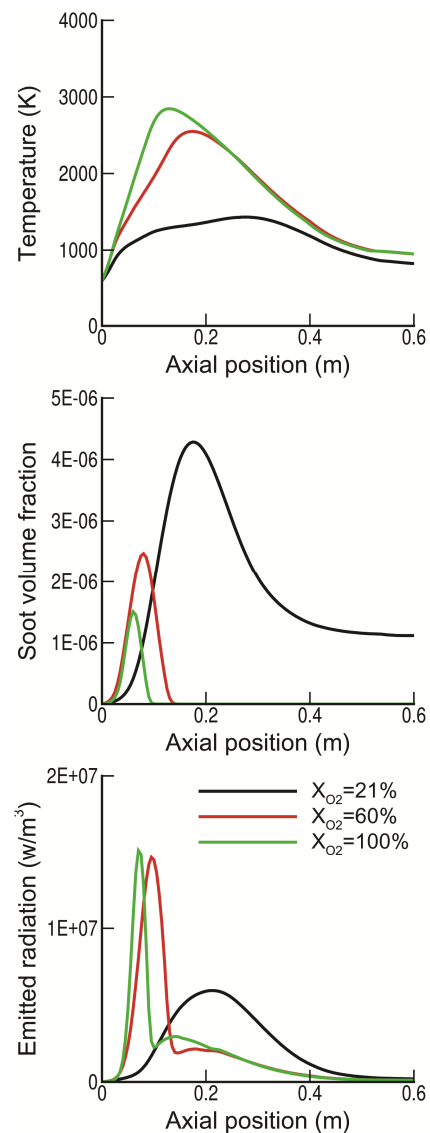
شکل ۱- شماتیک کلی محفظه احتراق و شعله آشفته غیر پیش آمیخته بخار کروسین-هوا [۳۰].

به دلیل تقارن مساله، دامنه حل به صورت مستطیل در نظر گرفته شده و شرایط مرزی تقارن محوری بر روی خط مرکزی اعمال می‌شود. در شکل ۱ دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده نمایش داده شده است. چنانچه در شکل مذکور دیده می‌شود، ابعاد دامنه محاسباتی برابر $0.0775m \times 0.6m$ یعنی $R_1 = 0.0775m$ و $L = 0.6m$ می‌باشد. قطر نازل سوخت برابر $1.5mm$ یعنی $R_2 = 0.75mm$ می‌باشد. نازل سوخت به تزریق بخار کروسین به عنوان سوخت به داخل محفظه احتراق با سرعت $22.28m/s$ می‌نماید. اکسیدکننده که هوا و متشکل از اکسیژن و نیتروژن به صورت $Y_{O_2} = 0.233$ و $Y_{N_2} = 0.767$ می‌باشد به صورت هم محور با سوخت با سرعت $0.234m/s$ وارد محفظه احتراق می‌شود. دماهای سوخت و اکسیدکننده در بدو ورود به محفظه احتراق به ترتیب برابر $598K$ و $288K$ می‌باشد. می‌توان دریافت که کروسین ورودی به محفظه قبلاً تبخیر شده و از طریق لوله گرم به داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود.

برای ارزیابی دقت حل عددی حاضر در شبیه‌سازی جریان محترق و نانو آئروسل دوده، به حل مساله معیار [۳۰] و مقایسه ساختار پیش بینی شده برای شعله با داده‌های آزمایش [۳۰] اقدام می‌شود. برای انجام اینکار توزیع‌های کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده با داده‌های تجربی [۳۰] مقایسه می‌شود. مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که محققین ترکیب‌های مختلفی از چندین سوخت هیدروکربنی ساده را به عنوان جایگزین برای سوخت کروسین (سوخت نایب) در نظر گرفته‌اند. برای نمونه می‌توان کروسین را با سوخت نایب و به صورت ترکیب $Y_{C_{10}H_{22}} = 0.8$ و $Y_{C_7H_8} = 0.2$ در نظر گرفت. ما نیز ترکیب کسرهای جرمی 80% و 20% از گونه‌های شیمیایی نرمال-دکان و تولوئن را به عنوان سوخت نایب برای کروسین فرض می‌نماییم. سوخت نایب ذکر شده دارای نسبت $C/H = 0.49$ بوده که این مقدار به داده‌های تجربی کروسین نزدیک

مذکور می‌تواند به (۱) مدل‌های نسبتاً ساده استفاده شده در انجام محاسبات و (۲) فرضیات استفاده شده جهت ساده‌سازی مساله نسبت داده شود.

۳-۲- بررسی اثر غنی‌سازی اکسیژن در اکسیدکننده بر روی رفتار حرارتی برنر و دوده تشکیل شده درون آن پس از حصول اطمینان از اعتبار حل عددی حاضر، در این بخش به بررسی نحوه رفتار حرارتی برنر اکسی-کروسین در مقایسه با برنر هوا-کروسین اقدام می‌شود. بدین منظور، با در نظر گرفتن برنر هوا-کروسین بخش قبل، به افزایش مقدار کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده (غنی‌سازی اکسیژن) می‌پردازیم و رفتار حرارتی برنر را تحت شرایط جدید ذکر شده مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در راستای نیل به این هدف، میزان کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده را به صورت تدریجی از ۲۱ درصد (هوای خشک) به ۶۰ و ۱۰۰ درصد (اکسیژن خالص) تغییر می‌دهیم. در این باب، لازم است تا شرایط مرزی برنر را متناسب با اعداد ذکر شده تغییر داده و به رسم و مقایسه نتایج بدست آمده با هم بپردازیم. شکل ۳ توزیع دما، کسر حجمی دوده و تشعشع حجمی تابشی در روی محور مرکزی شعله را با در نظر رفتن مقادیر کسر مولی ذکر شده برای اکسیژن اکسیدکننده را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- توزیع دما، کسر حجمی دوده و تشعشع حجمی تابشی بر روی محور مرکزی شعله برای مقادیر مختلف کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده

چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده دمای شعله افزایش می‌یابد. یک علت عمده در افزایش دمای شعله، کاهش میزان گاز نیتروژن در اکسیدکننده ورودی به برنر می‌باشد. گاز نیتروژن ورودی به برنر به عنوان رقیق کننده دارای ظرفیت حرارتی بالایی بوده و سبب کاهش عمده دمای شعله می‌شود. بنابراین با افزایش غنی‌سازی اکسیژن در اکسیدکننده، از مقدار گاز رقیق کننده نیتروژن کاسته شده و لذا افزایش دمای شعله را به دنبال دارد. همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد که میزان این افزایش دمای شعله در مقادیر بالای غنی‌سازی اکسیژن کاهش می‌یابد. به بیان بهتر، برای مقادیر بالای کسر مولی اکسیژن، با افزایش بیشتر غنی‌سازی اکسیژن، افزایش دمای چند درصدی در دمای شعله را به دنبال دارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که با غنی‌سازی اکسیژن، ذرات دوده به وجود آمده از احتراق بیشتر اکسید شده و لذا با افزایش میزان کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، کاهش کسر حجمی دوده را به دنبال خواهیم داشت. مجدداً ملاحظه می‌شود، که برای مقادیر بالای کسر مولی اکسیژن، با افزایش بیشتر غنی‌سازی، کاهش چندانی در مقدار دوده تشکیل شده در داخل شعله به وجود نمی‌آید. (تنها کاهش چند درصدی در کسر حجمی دوده تشکیل شده را به دنبال خواهد داشت). همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش غنی‌سازی اکسیژن در اکسیدکننده، میزان انرژی تشعشعی تابش شده از شعله افزایش می‌یابد. البته میزان این افزایش در انرژی تشعشعی تابش شده با انجام هر چه بیشتر غنی‌سازی، به نسبت قبل چندان زیاد نیست.

۳-۳- بررسی اثر سرعت اکسیژن خالص ورودی (اکسیدکننده) بر روی رفتار حرارتی برنر و دوده تشکیل شده درون آن

در این بخش، به بررسی اثر میزان سرعت اکسیدکننده (اکسیژن خالص) بر روی رفتار حرارتی برنر اکسی-کروسین اقدام می‌شود. برای انجام اینکار لازم است تا ابتدا با تغییر شرایط مرزی مناسب، اکسیدکننده ورودی به برنر را در مساله معیار به اکسیژن خالص تغییر دهیم. اینکار با افزایش کسر مولی اکسیژن از ۲۱ درصد به ۱۰۰ درصد انجام می‌شود. در ادامه به افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر اقدام می‌شود. لذا، سرعت اکسیدکننده برابر ۲۵، ۳۵ و ۴۵ متر بر ثانیه در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود و نتایج بدست آمده برای سرعت‌های ذکر شده با هم مقایسه می‌گردند. با انجام مقایسه مزبور، امکان بررسی تاثیر سرعت اکسیژن ورودی به محفظه بر روی رفتار حرارتی و دوده تشکیل شده در داخل برنر فراهم می‌شود. در اینجا نیز مطابق با بخش قبل به ترسیم نمودارهای دما، کسر حجمی دوده و تشعشع حجمی تابشی در روی محور مرکزی شعله اقدام می‌شود. شکل ۴ توزیع دما، کسر حجمی دوده و تشعشع حجمی تابشی در روی محور مرکزی شعله را با در نظر رفتن سرعت‌های ذکر شده برای اکسیدکننده (اکسیژن خالص) را نمایش می‌دهد.

چنانچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، مقدار ماکزیمم دمای بدست آمده در محور شعله تغییری بخصوصی نمی‌کند. در واقع با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، جریان‌های سوخت و اکسیدکننده (که به صورت مجزا وارد برنر شده‌اند) به طور موثری با هم مخلوط می‌شوند. اختلاط مناسب پدید آمده سبب می‌شود تا واکنشگرها (سوخت و اکسیدکننده) آماده انجام واکنش شیمیایی و انجام احتراق در نواحی نزدیک به ورودی باشند. مخلوط پدید آمده از این اختلاط در مجاورت ورودی‌های سوخت و اکسیدکننده با هم واکنش داده و میزان زیادی انرژی به صورت حرارت در این نواحی آزاد می‌کنند. لذا می‌توان

میزان غلظت دوده در داخل شعل کاهش می‌یابد، لذا میزان انرژی تشعشعی تابش شده از آن نیز کاهش می‌یابد که این خود به هموار شدن منحنی انرژی تشعشعی تابشی می‌انجامد. بنابراین، با طراحی برنر اکسی-کروسین مناسب می‌توان علیرغم اکسیژن مصرفی کمتر به انرژی تشعشعی تابشی بالا در داخل شعله دست یافت.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ابتدا به حل عددی یک برنر که با سوخت کروسین تغذیه می‌شود اقدام شد. در مقایسه با داده‌های تجربی موجود، نتایج بدست آمده حاکی از توانایی و دقت بالای حل عددی در پیش بینی توزیع‌های کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده است.

در ادامه، به بررسی نحوه و میزان تاثیر غنی‌سازی اکسیژن (در اکسیدکننده) بر روی رفتار حرارتی برنر و میزان دوده تشکیل شده در داخل آن پرداخته شد. جهت انجام اینکار، کسر مولی اکسیژن از ۲۱ درصد (هوای خشک) به مقادیر مختلفی افزایش داده شد و نتایج بدست آمده از آنها با هم مقایسه گردید. یافته‌های حاصل از این پژوهش حاکی از این است که با افزایش غنی‌سازی اکسیژن در اکسیدکننده، مقادیر بیشینه دما و تشعشع تابشی در داخل شعله افزایش و میزان دوده تشکیل شده در داخل شعله کاهش می‌یابد. یافته‌های بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که میزان تاثیر غنی‌سازی اکسیژن بر روی رفتار حرارتی برنر و میزان دوده تشکیل شده در داخل برنر کاهش می‌یابد به نحوی که با افزایش بیشتر غنی‌سازی اکسیژن تفاوت چشمگیری در روند فوق‌الذکر اتفاق نمی‌افتد. لذا با طراحی اکسی-کروسین مناسب می‌توان علاوه بر مصرف نه چندان زیاد اکسیژن جهت غنی‌سازی، می‌توان به دماهای بالای شعله دست یافت.

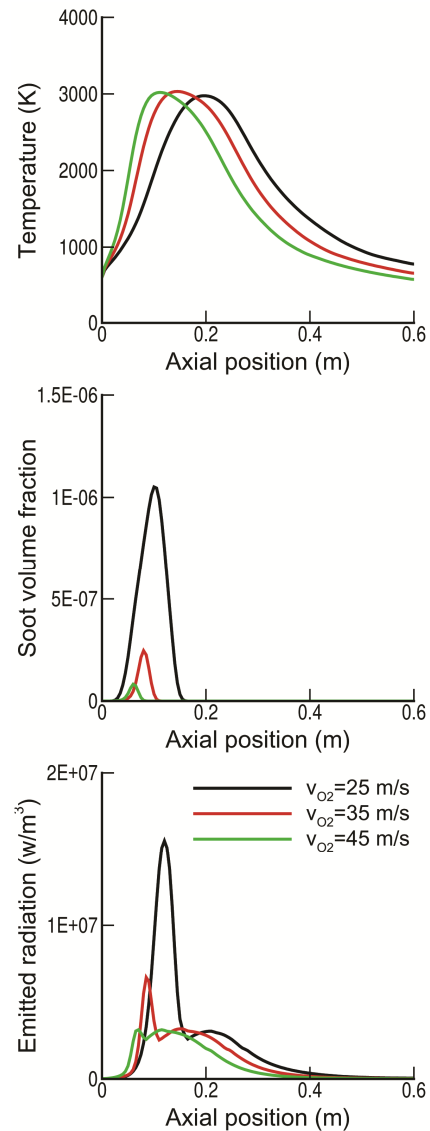
در انتها، به بررسی اثر سرعت اکسیدکننده (اکسیژن خالص) بر روی رفتار حرارتی و دوده تشکیل شده پرداخته شد. جهت انجام اینکار، سرعت اکسیدکننده به مقادیر مختلفی تغییر داده شد و نتایج بدست آمده از آنها با هم مقایسه گردید. یافته‌های حاصله دال بر این است که با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، طول شعله کاهش و میزان دوده تشکیل شده در داخل شعله کاهش می‌یابد که در نتیجه کاهش میزان تشعشع تابشی دوده (که عمده تشعشع تابشی شعله ناشی از آن است) را در پی خواهد داشت. لذا، با طراحی مناسب اکسی-کروسین می‌توان علاوه بر کاهش میزان اکسیژن مصرفی، به تشعشع تابشی بالایی از شعله دست یافت.

بنابراین، با طراحی مناسب اکسی-کروسین، نه تنها هزینه اقتصادی جهت تامین اکسیژن لازم برای این نوع احتراق را می‌توان کاهش داد، بلکه می‌توان به میزان تشعشع تابش بالا در احتراق (که در صنایع ساخت و تولید شیشه، شکل‌دهی و نورد فلزات مورد نیاز است) دستیابی نمود.

فهرست علائم

f	کسر مخلوط
$f^{1/2}$	پراکنش کسر مخلوط
h	انتالپی کل، W
m^*	کسر جرمی دوده
n	تعداد کل گونه‌های شیمیایی
n^*	چگالی تعداد دوده، $1/kg$
p	فشار، N/m^2
r	مولفه شعاعی در مختصات استوانه‌ای، m

انتظار داشت که با افزایش سرعت اکسیدکننده، انجام احتراق در نواحی بالادست برنر اتفاق بیفتد. این پدیده به وضوح در نمودار توزیع دمای رسم شده بر روی محور مرکزی شعله (شکل ۴) دیده می‌شود.



شکل ۴- توزیع دما، کسر حجمی دوده و تشعشع حجمی تابشی بر روی

محور مرکزی شعله برای سرعت‌های مختلف اکسیدکننده

همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، میزان تشکیل دوده در داخل برنر کاهش می‌یابد. به بیان بهتر، میزان ماکزیمم کسر حجمی دوده بر روی محور مرکزی شعله کاهش یافته و به صورت همزمان به مناطق بالادست برنر نقل مکان می‌نماید. این پدیده مجدداً به اختلاط بهتر سوخت و اکسیدکننده مرتبط است. چرا که با اختلاط بهتر پدید آمده از افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، غلظت دوده که به عنوان یک محصول فرعی احتراق است کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، مقدار ماکزیمم تشعشع تابشی موجود در داخل شعله کاهش یافته و به صورت ضمنی به سمت بالادست برنر نقل مکان می‌کند. به بیان بهتر با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر، نمودار تشعشع تابشی هموارتر از قبل می‌شود. جهش‌های ناگهانی مشاهده شده در نمودار تشعشع تابشی در شکل ۴ به میزان غلظت دوده تشکیل شده در داخل شعله ارتباط دارد. به بیان دیگر، از آنجا که با افزایش سرعت اکسیدکننده ورودی به برنر،

Selectivity versus N₂ by Partial Metal Substitution in Cu-BTC," *Chemistry of Materials*, 27(6), pp. 2018–2025.

[۱۰] Parkes, M. V., Gallis, D. F. S., Greathouse, J. A., and Nenoff, T. M., ۲۰۱۵, "Effect of Metal in M₃(btc)₂ and M₂(dobdc) MOFs for O₂/N₂ Separations: A Combined Density Functional Theory and Experimental Study," *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(12), pp. 6556–6567.

[۱۱] Leung, K. M., Lindstedt, R. P., and Jones, W. P., ۱۹۹۱, "A Simplified Reaction Mechanism for Soot Formation in Nonpremixed Flames," *Combustion and Flame*, 87(3–4), pp. 289–305.

[۱۲] Kennedy, I. M., Yam, C., Rapp, D. C., and Santoro, R. J., 1996, "Modeling and Measurements of Soot and Species in a Laminar Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, 107(4), pp. 368–382.

[۱۳] Mueller, M. E., Blanquart, G., and Pitsch, H., 2009, "A Joint Volume-Surface Model of Soot Aggregation with the Method of Moments," *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(1), pp. 785–۷۹۲.

[۱۴] Mueller, M. E., Blanquart, G., and Pitsch, H., 2011, "Modeling the Oxidation-Induced Fragmentation of Soot Aggregates in Laminar Flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1), pp. 667–674.

[۱۵] Xuan, Y., Blanquart, G., and Mueller, M. E., ۲۰۱۴, "Modeling Curvature Effects in Diffusion Flames Using a Laminar Flamelet Model," *Combustion and Flame*, 161(5), pp. 1294–1309.

[۱۶] Brookes, S. J., and Moss, J. B., 1999, "Predictions of Soot and Thermal Radiation Properties in Confined Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 116(4), pp. 486–503.

[۱۷] Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1977, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, 16(1), pp. 719–729.

[۱۸] Kronenburg, A., Bilger, R. W., and Kent, J. H., 2000, "Modeling Soot Formation in Turbulent Methane-Air Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 121(1–2), pp. 24–40.

[۱۹] Mueller, M. E., Chan, Q. N., Qamar, N. H., Dally, B. B., Pitsch, H., Alwahabi, Z. T., and Nathan, G. J., 2013, "Experimental and Computational Study of Soot Evolution in a Turbulent Nonpremixed Bluff Body Ethylene Flame," *Combustion and Flame*, 160, pp. 1298–1309.

[۲۰] Wen, Z., Yun, S., Thomson, M. J., and Lightstone, M. F., 2003, "Modeling Soot Formation in Turbulent Kerosene/Air Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 135(3), pp. 323–340.

[۲۱] Watanabe, H., Suwa, Y., Matsushita, Y., Morozumi, Y., Aoki, H., Tanno, S., and Miura, T., 2007, "Spray Combustion Simulation Including Soot

<i>u</i>	مولفه سرعت شعاعی، m/s
<i>v</i>	مولفه سرعت محوری، m/s
<i>z</i>	مولفه محوری در مختصات استوانه‌ای، m
<i>R</i>	ثابت گاز، NM/K
<i>T</i>	دما، K
<i>v</i>	بردار سرعت، m/s
<i>w</i>	وزن مولکولی، kg
<i>Y</i>	کسر جرمی
فهرست علائم یونانی	
ε	نرخ اضمحلال آشفتنگی، m^2/s^3
κ	انرژی جنبشی آشفتنگی، m^2/s^2
μ	ضریب لزجت مولکولی، $kg/m \cdot s$
ρ	چگالی، kg/m^3
زیر نویس‌ها	
<i>e</i>	مقدار موثر
<i>m</i>	شمارنده اندیس گونه شیمیایی

مراجع

[۱] Jr., C. E. B., 2013, *Oxygen-Enhanced Combustion*, CRC Press, Boca Raton, FL.

[۲] Smith, A. R., and Klosek, J., 2001, "A Review of Air Separation Technologies and their Integration with Energy Conversion Processes," *Fuel Processing Technology*, 70(2), pp. ۱۱۵–۱۳۴.

[۳] Castle, W. F., 2002, "Air Separation and Liquefaction: Recent Developments and Prospects for the Beginning of the New Millennium," *International Journal of Refrigeration*, 25(1), pp. 158–172.

[۴] Ruthven, D. M., and Farooq, S., 1990, "Air Separation by Pressure Swing Adsorption," *Gas Separation & Purification*, 4(3), pp. 141–148.

[۵] Mendes, A. M. M., Costa, C. A. V., and Rodrigues, A. E., 2001, "Oxygen Separation from Air by PSA: Modelling and Experimental Results: Part I: Isothermal Operation," *Separation and Purification Technology*, 24(1–2), pp. 173–188.

[۶] Sunarso, J., Baumann, S., Serra, J. M., Meulenberg, W. A., Liu, S., Lin, Y. S., and Costa, J. C. D. d., 2008, "Mixed Ionic–Electronic Conducting (MIEC) Ceramic-Based Membranes for Oxygen Separation," *Journal of Membrane Science*, 320(1–2), pp. 13–41.

[۷] Hashim, S. M., Mohamed, A. R., and Bhatia, S., 2010, "Current Status of Ceramic-Based Membranes for Oxygen Separation from Air," *Advances in Colloid and Interface Science*, 160(1–2), pp. ۸۸–۱۰۰.

[۸] Eddaoudi, M., Li, H., and Yaghi, O. M., 2000, "Highly Porous and Stable Metal–Organic Frameworks: Structure Design and Sorption Properties," *Journal of the American Chemical Society*, 122(7), pp. 1391–1397.

[۹] Gallis, D. F. S., Parkes, M. V., Greathouse, J. A., Zhang, X., and Nenoff, T. M., 2015, "Enhanced O₂

and NO Formation," *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 2077–2089.

[۲۲] Li, J., Yang, W. M., An, H., Zhou, D. Z., Yu, W. B., Wang, J. X., and Li, L., 2015, "Numerical Investigation on the Effect of Reactivity Gradient in an RCCI Engine Fueled with Gasoline and Diesel," *Energy Conversion and Management*, 92, pp. 342–352.

[۲۳] Cheng, X., Chen, L., Yan, F., and Dong, S., 2013, "Study on Soot Formation Characteristics in the Diesel Combustion Process based on an Improved Detailed Soot Model," *Energy Conversion and Management*, 75, pp. 1–10.

[۲۴] An, H., Yang, W. M., Li, J., and Zhou, D. Z., 2015, "Modeling Study of Oxygenated Fuels on Diesel Combustion: Effects of Oxygen Concentration, Cetane Number and C/H Ratio," *Energy Conversion and Management*, 90, pp. 261–271.

[۲۵] Baukal, C. E., Gershtein, V. Y., and Li, X., 2001, *Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion*, CRC Press, Florida.

[۲۶] Myhrvold, T., Ertesvag, I. S., Gran, I. R., Cabra, R., and Chen, J.-Y., ۲۰۰۶, "A Numerical Investigation of a Lifted H₂/N₂ Turbulent Jet Flame in a Vitiated Coflow," *Combustion Science and Technology*, 178(6), pp. 1001–1030.

[۲۷] Schlichting, H., 1979, *Boundary-Layer Theory*, McGRAW HILL, New York.

[۲۸] Peters, N., 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, 10(3), pp. 319–339.

[۲۹] Hall, R. J., Smooke, M. D., and Colket, M. B., 1997, "Predictions of Soot Dynamics in Opposed Jet Diffusion Flames", *Physical and Chemical Aspects of Combustion: A Tribute to Irvin Glassman*, I. Glassman, R. F. Sawyer, and F. L. Dryer, eds., Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 189–230.

[۳۰] Young, K. J., Stewart, C. D., and Moss, J. B., 1994, "Soot Formation in Turbulent Nonpremixed Kerosine-Air Flames Burning at Elevated Pressure: Experimental Measurement," *Proceedings of the Combustion Institute*, 25(1), pp. 609–617.