

تأثیر تنظیم دبی جرمی انژکتور هوا در یک محفظه احتراق توربین گاز با سوخت کروسین بر روی یکنواختی پروفیل دمای گازهای خروجی از آگزوز دود و میزان تولید دوده و اکسیدهای کربنی

مجید غفوری زاده

دکتر، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

m_ghafourizadeh@ae.sharif.edu

مسعود دربندی

استاد، قطب علمی سامانه‌های هوافضایی،

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

darbandi@sharif.edu

چکیده

در پژوهش حاضر، اثر دبی جرمی انژکتور هوا بر روی یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز در یک محفظه احتراق توربین گاز (که سوخت کروسین مصرف می‌نماید) و همچنین آلاینده‌های تشکیل شده در درون آن نظیر دوده، مونوکسید کربن و دی اکسید کربن مطالعه می‌شود. جهت انجام این مطالعه عددی، در ابتدا لازم است تا از صحت و دقت محاسبات انجام شده جهت پیش بینی ساختار شعله اطمینان به عمل آمده و به اعتبارسنجی نتایج عددی بدست آمده پرداخته شود. در راستای نیل به این مهم، شعله آشفته کروسین-هوا به صورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش مقایسه می‌شود. مقایسه مزبور حاکی از دقت نتایج عددی بدست آمده در پیش بینی ساختار شعله مذکور است. در ادامه، محفظه احتراق مذکور به انژکتور هوای اولیه تجهیز شده به نحوی که هوای ورودی به محفظه احتراق به دو بخش تقسیم و هوای اولیه با انژکتور نصب شده به داخل محفظه تزریق می‌شود. بقیه هوای ورودی نیز به صورت جریان هوای ثانویه وارد محفظه احتراق می‌گردد. جهت بررسی اثر انژکتور هوای اولیه، نسبت جریان هوای اولیه و ثانویه تغییر داده شده و به مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود. مطالعات حاضر نشان می‌دهد که نصب انژکتور هوای اولیه می‌تواند به کاهش آلاینده‌های مختلف و همچنین بهبود یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز (جهت ورود به توربین گاز) کمک شایانی نماید.

کلمات کلیدی: محفظه احتراق توربین گاز، انژکتور هوا، نانوذرات دوده، یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز، کروسین

۱- مقدمه

در محفظه احتراق موتورهای توربین گاز (موتورهای هوایی)، هوای ورودی به محفظه احتراق در نواحی مختلف به نحو مناسبی توزیع می‌شود. انجام اینکار به جهت داشتن احتراق پایدار و همچنین کنترل دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق (که در ادامه وارد توربین می‌شود) می‌باشد. با این توصیف، توزیع مناسب هوای ورودی به محفظه عامل مهمی در طراحی محفظه احتراق می‌باشد.

محققین زیادی تشکیل آلاینده‌های مختلف نظیر CO، CO₂ و NO_x را در فرآیند احتراق بررسی نموده‌اند. این در حالی است که در رابطه با سایر آلاینده‌های احتراقی لازم است تا ملاحظات بیشتر و بررسی قابل توجهی صورت پذیرد. یکی از آلاینده‌های مهم دوده می‌باشد که نیاز است تا توجه بیشتری به آن در رابطه با نحوه تشکیل و کنترل این آلاینده معطوف شود. دوده یکی از گونه‌های مهم آئروسول در اتمسفر بوده که به سبب اندازه بسیار

کم قطر ذرات آن (نانومتر) نیروی جاذبه تأثیر چندانی بر روی آن ندارد و لذا می‌تواند در محیط برای هفته‌ها معلق باقی بماند. همچنین با توجه به اندازه ریز این ذرات معلق، این آئروسول نمی‌تواند توسط سیستم تنفسی انسان فیلتر شود. از سوی دیگر، نانوذرات معلق باقیمانده در اتمسفر اثرات شدیدی بر روی انتقال حرارت تشعشعی در جو دارند. بنابراین، این نانوذرات مضر، که دارای اثرات منفی شدیدی بر روی محیط و سلامت انسان‌هاست، بایستی از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.

دینامیک سیالات محاسباتی CFD به عنوان یک وسیله محاسباتی برای پیش بینی آلاینده‌های گازی شکل در برنهای مختلف و همچنین بهبود طرح‌ها از دیدگاه کاهش آلاینده‌های مضر 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 [۱-۵]. این در حالی است که برای سوخت‌های هیدروکربنی ساده، مدل‌سازی نانو آئروسول دوده در شعله‌های آشفته کمتر مورد بررسی و عنایت قرار گرفته است [۶-۹]. این مساله برای سوخت‌های رایج نظیر کروسین [۱۰، ۱۱]، بنزین [۱۲] و دیزل [۱۳، ۱۴] به شدت حادث‌تر 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.

مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که محققین و طراحان محفظه‌های احتراق موتورهای هوایی عمدتاً بر روی کاهش سایر آلاینده‌های احتراقی نظیر اکسیدهای نیتروژن متمرکز بوده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع ذکر شده نیاز است تا بررسی و کاهش نانوآئروسول دوده به عنوان یک آلاینده مهم احتراقی نیز در محفظه‌های احتراق نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، هدف بررسی تأثیر انژکتور هوای ورودی به محفظه احتراق توربین گاز بر روی تولید آلاینده‌های مختلف نظیر دوده، اکسیدهای گازی شکل کربن و همچنین یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز خروجی از محفظه است. برای انجام اینکار، مدل دومعادله‌ای دوده، مدل دومعادله‌ای آشفته‌گی $\epsilon - k$ ، مدل احتراقی فلیم‌ت و مکانیزم شیمیایی متشکل از ۱۲۱ گونه شیمیایی و ۲۶۱۳ واکنش شیمیایی بنیادین بکار گرفته می‌شوند. در آغاز کار و به صورت مرسوم نتایج عددی بدست آمده از شبیه‌سازی اعتبارسنجی می‌شوند. به عبارت دیگر، یک نمونه مساله معیار که نتایج تجربی آن نیز موجود است انتخاب و حل عددی می‌شود. جهت اعتبارسنجی نیز، جوابهای عددی بدست آمده با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش مقایسه می‌شود. اعتبارسنجی فوق به صورت ارزیابی ساختار شعله پیش‌بینی شده توسط حلگر عددی در قیاس با داده‌های تجربی آن است. مساله معیار انتخاب شده، یک شعله آشفته غیر پیش مخلوط کروسین-هوا بوده که

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

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

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 [۱۶]. 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 [۱۷].

۳-۲- 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

$$q_{rad} = -4\sigma \sum_{m=1}^n P_m \alpha_{p,m} (T^4 - T_{bg}^4) - \alpha_{soot} T^5 \rho m^* / \rho_{soot}$$

بدست می‌آید. تابش دوده نیز با فرض اینکه در محدوده اپتیک ضخیم قرار دارد، مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

۴-۲- احتراق و معادلات آن

برای مدل سازی احتراق در شعله غیر پیش آمیخته آشفته از مدل فلیملت استفاده شده است [۱۸]. 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 شیمیایی و ۲۶۱۳ واکنش شیمیایی بنیادین (رفت و برگشتی) استفاده می‌شود. جدول ۱ لیست این گونه‌های شیمیایی را نشان می‌دهد.

توزیع‌های کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده در داخل شعله مورد بررسی و قیاس قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده بیانگر اعتبار نتایج عددی بدست آمده برای پیش بینی ساختار ضلع فوق است. در ادامه، یک انژکتور هوا بر روی محفظه احتراق توربین گاز نصب شده، به نحویکه با تقسیم نمودن هوای ورودی به محفظه به دو بخش، به تزریق بخشی از هوای ورودی به داخل محفظه (جریان هوای اولیه) می‌پردازد. بقیه جریان هوای ورودی به محفظه (جریان هوای ثانویه) نیز همانند قبل وارد محفظه احتراق می‌شود. نتایج بدست آمده برای دو محفظه احتراق در حالت‌های با و بدون تعبیه نمودن انژکتور هوای اولیه با هم مقایسه شده تا تاثیر انژکتور هوای اولیه بر روی رفتار جریان محترق داخل محفظه احتراق توربین گاز شناسایی شود. در ادامه، نسبت هوا بین دو جریان هوای اولیه و ثانویه تغییر داده شده و نتایج بدست آمده با هم مقایسه می‌شوند. با انجام اینکار، اثر دبی گرمی انژکتور هوای اولیه بر روی غلظت دوده و اکسیدهای کربن و همچنین یکنواختی پروفیل دمای گازهای اگزوز خروجی از محفظه احتراق شناسایی و مطالعه شود.

۲- معادلات حاکم

برای تحلیل جریان احتراقی آشفته پایای تقارن محور، باید به حل معادلات حاکم بر آن پرداخت. به بیان دیگر، باید معادلات نویر-استوکس به همراه معادلات انتقال برای انرژی، ممان‌های کسر مخلوط، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن را حل عددی نمود. با حل معادلات فوق، می‌توان رفتار جریان محترق در داخل محفظه احتراق را توصیف نمود. همچنین با حل معادلات حاکم بر شیمی و دینامیک آئروسول دوده، می‌توان رفتار دوده را در داخل محفظه احتراق توربین گاز توصیف نمود. در این بخش، معادلات حاکم بر جریان آشفته محترق و دوده به صورت خلاصه بیان می‌شوند. این معادلات در ادامه آمده است.

۱-۲- جریان سیال و معادلات آن

در مختصات استوانه‌ای (r, z) معادلات حاکم جریان شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم‌ها 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 $\mu_e = \mu_t + \mu_l$ می‌باشند. در مطالعه حاضر، μ_l به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

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 آشفتگی 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 (انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آن) به شرح زیر می‌باشند:

مخلوط) بر روی دامنه حل به صورت عددی حل شود. معادلات انتقال برای دو ممان اول کسر مخلوط به صورت زیر است:

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

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

در معادلات فوق، $c_g = 2.86$ و $c_\chi = 2.0$. 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.

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:

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

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

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:

$$S_m^* = C_1 \rho^2 \left(\frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-4378/T} + C_2 \rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-6390/T} + C_3 \rho \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} e^{-12100/T} (\pi \rho N_A n^*)^{1/3} \left(\frac{6\rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{2/3} - C_4 \rho \frac{Y_{OH}}{W_{OH}} \sqrt{T} (\pi \rho N_A n^*)^{1/3} \left(\frac{6\rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$S_n^* = \frac{C_1}{M_P} \rho^2 \left(\frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-4378/T} + \frac{C_2}{M_P} \rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} e^{-6390/T} - \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{24RT}{\rho_{soot} N_A}} \left(\frac{6\rho m^*}{\rho_{soot}} \right)^{1/6} (\rho N_A n^*)^{11/6} \quad (12)$$

که در روابط فوق $\rho_{soot} = 2000 \text{ kg/m}^3$ ، $M_P = 144 \text{ kg/kgm ol}$ ، $C_1 = 1016 \times 10^{8.88} \text{ s}^{-1}$ ، $N_A = 6.022045 \times 10^{26} \text{ km ol}^{-1}$ ، $C_2 = 1424 \times 10^{9.50} \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ s}^{-1}$

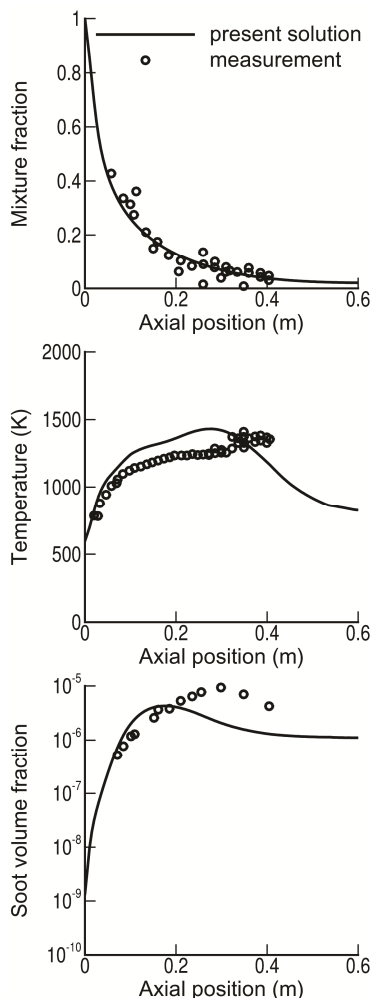
و $C_3 = 11700 \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ، $C_4 = 4.2325 \text{ kgm km ol}^{-1} \text{ K}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ در نظر گرفته می‌-

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
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		

جهت اعمال مدل احتراقی فلیملت، بایستی دو معادله انتقال برای دو ممان اول کسر مخلوط یعنی کسر مخلوط و پراکنش کسر مخلوط (واریانس کسر

های کسر مخلوط، دما و کسر حجمی دوده با داده‌های تجربی [۲۰] 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 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 [۲۰]

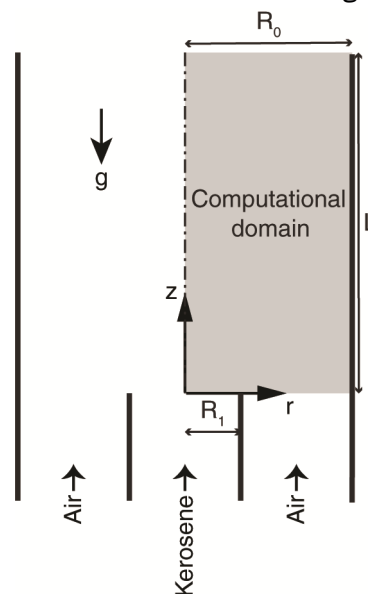
شکل ۲ نشان می‌دهد که حل عددی بدست آمده در کار حاضر از تطابق بالایی با داده‌های تجربی [۲۰] برخوردار است. چنانچه طول شعله را مکان کسر مخلوط استوکیومتری بر روی محور محفظه در نظر بگیریم، طول شعله تقریباً برابر $0.3m$ بدست می‌آید. مقدار کسر مخلوط استوکیومتری برای سوخت نرمال-دکان برابر 0.0615 می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود این طول با مکان مقدار بیشینه دما بر روی محور محفظه احتراق تطابق دارد.

شود. 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

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 [۲۰] 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.

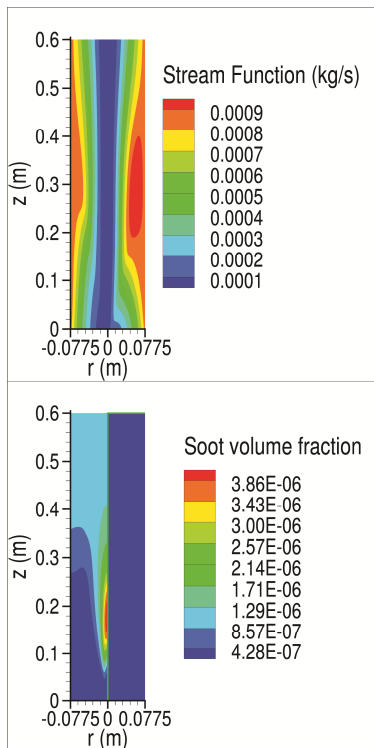


شکل ۱- شماتیک کلی محفظه احتراق توربین گاز و شعله آشفته غیر پیش آمیخته بخار کروسین-هوا [۲۰].

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 $R_0 = 0.0775m$ و $L = 0.6m$ می‌باشد. قطر نازل سوخت برابر $1.5mm$ یعنی $R_1 = 0.75mm$ 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 [۲۰] و مقایسه ساختار پیش بینی شده برای شعله با داده‌های آزمایش [۲۰] اقدام می‌شود. برای انجام اینکار توزیع-

شکل ۴ توزیع تابع (خطوط) جریان و کسر حجمی دوده در داخل محفظه احتراق توربین گاز و تاثیر انژکتور هوای اولیه را نشان می‌دهد. هر زیرشکل دارای دو نیمه چپ و راست می‌باشد. نیمه سمت چپ بیانگر توزیع کمیت مزبور در داخل محفظه احتراق بدون تعبیه نمودن انژکتور هوای اولیه است. نیمه سمت راست نیز بیانگر توزیع کمیت مزبور در داخل محفظه احتراق تجهیز شده به انژکتور هوای اولیه است. چنانچه دیده می‌شود در محفظه احتراق تجهیز شده به انژکتور هوای اولیه، خطوط جریان متاثر از جریان هوای ورودی است و در پایین دست جریان ناحیه جریان بازگشتی ایجاد می‌شود. ناحیه جریان بازگشتی، با بازگرداندن محصولات احتراقی (گازهای حاصل از احتراق) به داخل شعله باعث اختلاط بهتر مخلوط گازهای موجود می‌شود. از سوی دیگر محصولات احتراقی دما بالا با جریان‌های واکنش-دهنده ورودی به محفظه (سوخت و اکسیدکننده ورودی به محفظه احتراق توربین گاز) که دمای پایینی دارند مختلط شده و به بهبود پایداری شعله در داخل محفظه احتراق کمک بسزایی می‌نماید. این پدیده Exhaust gas recirculation (EGR) نام دارد. اختلاط بهتر پدید آمده در داخل محفظه احتراق ناشی از انژکتور هوای اولیه بوده و سبب یکنواخت شدن بیشتر توزیع دمای محصولات احتراقی در داخل محفظه احتراق می‌شود. این پدیده، بخصوص برای گازهای آگزوز خروجی از دهانه محفظه احتراق حائز اهمیت است. چرا که منجر به یکنواخت شدن پروفیل دمای گازهای آگزوز در دهانه خروجی از محفظه می‌شود. گازهای حاصل از احتراق با پروفیل دمای یکنواخت وارد توربین شده و لذا سبب افزایش طول عمر کاری توربین می‌شود.

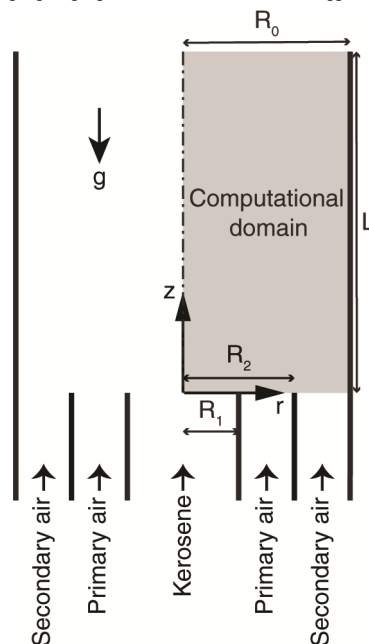


شکل ۴- توزیع تابع (خطوط) جریان و کسر حجمی دوده در داخل محفظه احتراق توربین گاز و تاثیر انژکتور هوای اولیه

چنانچه در شکل ۴ دیده می‌شود تعبیه نمودن انژکتور هوای اولیه همچنین باعث کاهش عمده در کسر حجمی دوده تشکیل شده در داخل محفظه احتراق توربین گاز می‌شود. این امر نیز ناشی از جریان بازگشتی تشکیل شده در داخل محفظه احتراق و اختلاط بهتر گازهای درون آن می‌باشد. به

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-هواست. دمای آدیاباتیک شعله کروسین-هوا برابر 2366K می‌باشد. چنانچه در شکل ۲ دیده می‌شود مقداری اختلاف بین نتایج عددی بدست آمده با داده‌های آزمایش [۲۰] وجود دارد. اختلاف مذکور می‌تواند به (۱) مدل‌های نسبتاً ساده استفاده شده در انجام محاسبات و (۲) فرضیات استفاده شده جهت ساده‌سازی مساله نسبت داده شود.

۲-۳- بررسی تاثیر انژکتور هوای اولیه بر رفتار جریان محترق در داخل محفظه احتراق توربین گاز و دوده تشکیل شده درون آن در این بخش، به بررسی نحوه تاثیر انژکتور هوای اولیه بر روی عملکرد جریان محترق در داخل محفظه احتراق توربین گاز و همچنین دوده تشکیل شده درون آن پرداخته می‌شود. در صدد انجام اینکار، ابتدا محفظه احتراق مزبور را به یک انژکتور هوا تجهیز می‌نماییم. سپس هوای ورودی به محفظه احتراق را به دو بخش تقسیم می‌نماییم. بخشی از جریان هوا (که جریان هوای اولیه نامیده می‌شود) را با استفاده از انژکتور هوای تعبیه شده بر روی محفظه احتراق به داخل تزریق می‌نماییم. بخش دیگر هوا (که جریان هوای ثانویه نامیده می‌شود) نیز همانند قبل وارد محفظه احتراق می‌شود. قطر انژکتور هوای نصب شده بر روی محفظه احتراق 4.5mm یعنی $R_2 = 2.25m$ می‌باشد. شکل ۳ هندسه و مشخصات این انژکتور و محفظه احتراق توربین گاز تجهیز شده به انژکتور هوای اولیه را نمایش می‌دهد. همچنین با در نظر گرفتن نسبت بین جریان هوای اولیه به ثانویه به صورت 10:90 تنها 10% کل هوای ورودی به محفظه را از طریق انژکتور هوای اولیه به داخل تزریق می‌نماییم و 90% باقیمانده از کل هوای ورودی همانند قبل وارد محفظه می‌شود. سایر پارامترها (مشخصات هندسی و شرایط مرزی مساله) مشابه مساله معیار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- شماتیک کلی محفظه احتراق توربین گاز تجهیز شده به انژکتور هوای اولیه

با افزایش دبی جرمی انژکتور هوای اولیه، غلظت و انتشار آلاینده‌های دوده و مونوکسید کربن در دهانه خروجی از محفظه احتراق کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جرمی انژکتور هوای اولیه، انتشار آلاینده دی اکسید کربن در گازهای خروجی از محفظه تغییر چندانی نمی‌کند. به بیان بهتر، با افزایش دبی جرمی انژکتور هوای اولیه در محفظه احتراق توربین گاز، می‌توان علاوه بر بهبود یکنواختی دمای گازهای آگزوز خروجی، به کاهش آلاینده‌های مختلف کمک شایانی نمود. چنانچه قبلاً نیز بیان شد، علت این امر در رخدادهای EGR با نصب انژکتور هوای اولیه می‌باشد. با نصب انژکتور هوای اولیه در محفظه احتراق توربین گاز، گازهای آگزوز خروجی با پروفیل دمای یکنواخت و سطح آلاینده خیلی کم، آماده ورود به توربین (و سایر قسمت‌های موتور هوایی) هستند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر دبی جرمی انژکتور هوای اولیه در یک محفظه احتراق توربین گاز، بر روی یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز و همچنین تشکیل و انتشار آلاینده‌های دوده، مونوکسید کربن و دی اکسید کربن از دهانه خروجی، به صورت عددی مطالعه شد. ابتدا، یک نمونه مساله معیار (شعله آشفته غیر پیش مخلوط کروسین-هوا) انتخاب، شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی شد. انطباق بالای نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش، دال بر توانایی و دقت حلگر عددی در پیش‌بینی ساختار شعله بود. در ادامه، محفظه احتراق مساله معیار به یک انژکتور هوا تجهیز شد و هوای ورودی به محفظه احتراق به دو بخش تقسیم شد به نحویکه که بخشی از آن (هوای اولیه) با انژکتور طراحی شده به داخل محفظه تزریق و بخش دیگر آن (هوای ثانویه) مشابه قبل وارد محفظه احتراق می‌شد. توزیع خطوط جریان و کسر حجمی دوده در داخل محفظه احتراق در حالت‌های با و بدون انژکتور هوا با هم مقایسه گردید تا نحوه و شدت تاثیر انژکتور مزبور بر روی رفتار جریان محترق شناسایی شود. در ادامه نیز، نسبت دبی جرمی هوای اولیه به ثانویه تغییر داده شد تا اثر دبی جرمی انژکتور فوق آشکار شود. نتایج بدست آمده حاکی از این مطلب است که با نصب انژکتور هوا، پروفیل دمای گازهای آگزوز یکنواخت‌تر شده و انتشار آلاینده‌های مختلف از دهانه خروجی محفظه احتراق کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جرمی انژکتور مزبور، میزان انتشار آلاینده‌ها در گازهای آگزوز به نحو موثری کاهش و پروفیل دمای گازهای آگزوز یکنواخت‌تر می‌شود.

فهرست علائم

B	نیروی بویانسی (شناوری)، N/m^3
F	کسر مخلوط
F^{1/2}	پراکنش کسر مخلوط
h	انتالپی کل، \bar{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
u	مولفه سرعت شعاعی، m/s
v	مولفه سرعت محوری، m/s

بیان بهتر، با اختلاط بهتر گازهای درون محفظه احتراق، دوده که یک محصول فرعی و ناخواسته احتراقی است به انجام واکنش شیمیایی بهتر با مخلوط گازها نموده و اکسید می‌شود. از سوی دیگر، جریان بازگشتی پدید آمده در درون محفظه احتراق، سبب افزایش مدت زمان حضور محصولات در داخل محفظه شده و لذا گونه‌های شیمیایی موجود زمان بیشتری را جهت انجام واکنش شیمیایی با سایر گازهای حاصله از احتراق در اختیار خواهند داشت. این مهم، خود سبب می‌شود که دوده نیز به عنوان یک گونه شیمیایی و آلاینده موجود (تشکیل شده) در درون محفظه احتراق زمان کافی جهت اکسید شدن داشته باشد و لذا غلظت این آلاینده به نحو موثری کاهش یابد. با کاهش غلظت آلاینده دوده در داخل محفظه احتراق توربین گاز، انتشار این آلاینده در دهانه خروجی محفظه نیز کاهش می‌یابد. لذا، با تعبیه نمودن انژکتور هوای اولیه در ورودی محفظه احتراق توربین گاز، می‌توان انتشار آلاینده‌های مختلف نظیر دوده و یا غیره را کاهش داد.

۳-۳- بررسی تاثیر دبی جرمی انژکتور هوای اولیه بر انتشار دوده و اکسیدهای کربن از محفظه احتراق توربین گاز و همچنین یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز خروجی

در این بخش، در صدد بررسی تاثیر دبی جرمی انژکتور هوای اولیه در محفظه احتراق توربین گاز بر روی انتشار آلاینده‌های دوده، اکسیدهای گازی شکل کربن (مونوکسید کربن و دی اکسید کربن) و همچنین یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز خروجی از محفظه احتراق هستیم. جهت انجام اینکار، نسبت دبی جرمی جریان هوای اولیه به جریان هوای ثانویه را به مقادیر متفاوتی تغییر می‌دهیم. به بیان دقیق‌تر، نسبت بین جریان هوای اولیه به ثانویه به مقادیر 5:95، 10:90، 15:85 و 20:80 تغییر داده می‌شود. سایر پارامترها (مشخصات هندسی و شرایط مرزی مساله) مشابه مساله معیار در نظر گرفته می‌شود. جدول ۲ نحوه تاثیر دبی جرمی انژکتور هوای اولیه بر روی یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز و همچنین انتشار آلاینده‌های دوده، مونوکسید کربن و دی اکسید کربن را نشان می‌دهد.

جدول ۲- اثر دبی جرمی انژکتور هوای اولیه در محفظه احتراق توربین گاز بر روی یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز و همچنین انتشار آلاینده‌های مختلف در خروجی

	Primary-secondary-air ratio	Pattern factor	CO mass fraction	CO ₂ mass fraction	Soot volume fraction	Soot particles diameter (m)
-	0.121	3.60E-06	0.0577	1.13E-06	1.20E-07	
5:95	0.087	1.38E-06	0.0587	4.35E-07	8.74E-08	
10:90	0.043	1.76E-07	0.0582	2.97E-08	2.91E-08	
15:85	0.023	0	0.0584	9.50E-09	1.75E-08	
20:80	0.017	0	0.0593	2.34E-09	9.59E-09	

چنانچه جدول ۲ نشان می‌دهد با افزایش دبی جرمی انژکتور هوای اولیه در محفظه احتراق توربین گاز پروفیل دمای گازهای آگزوز خروجی از محفظه یکنواخت‌تر می‌شود. علاوه بر بهبود یکنواختی پروفیل دمای گازهای آگزوز،

[^۹]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. 12.۱۳۰۹-۹۸

[^{۱۰}]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.

[^{۱۱}]Watanabe, H., Suwa, Y., Matsushita, Y., Morozumi, Y., Aoki, H., Tanno, S., and Miura, T., 2007, "Spray Combustion Simulation Including Soot and NO Formation," *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 2077-2089.

[^{۱۲}]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.

[^{۱۳}]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.

[^{۱۴}]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.

[^{۱۵}]Baukal, C. E., Gershtein, V. Y., and Li, X., 2001, *Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion*, CRC Press, Florida.

[^{۱۶}]Myhrvold, T., Ertesvag, I. S., Gran, I. R., Cabra, R., and Chen, J.-Y., 2006, "A Numerical Investigation of a Lifted H₂/N₂ Turbulent Jet Flame in a Vitiated Coflow," *Combustion Science and Technology*, 178(6), pp. 1001-1030.

[^{۱۷}]Schlichting, H., 1979, *Boundary-Layer Theory*, McGRAW HILL, New York.

[^{۱۸}]Peters, N., 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, 10(3), pp. 319-339.

[^{۱۹}]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.

[^{۲۰}]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.

z مولفه محوری در مختصات استوانه‌ای، m
 R ثابت گاز، NM/K
 T دما، K
 \mathbf{v} بردار سرعت، m/s
 W وزن مولکولی، kg
 Y کسر جرمی

فهرست علائم یونانی

α ثابت جذب متوسط پلانک، $1/atm/m$
 ε نرخ اضمحلال آشفتنگی، m^2/s^3
 κ انرژی جنبشی آشفتنگی، m^2/s^2
 μ ضریب لزجت مولکولی، $kg/m/s$
 ρ چگالی، kg/m^3
 σ ثابت استفان-بولتزمان، $w/m^2/K^4$

زیر نویس‌ها

bg محیط اطراف
 e مقدار موثر
 m شمارنده اندیس گونه شیمیایی

مراجع

[^۱]Leung, K. M., Lindstedt, R. P., and Jones, W. P., 1991, "A Simplified Reaction Mechanism for Soot Formation in Nonpremixed Flames," *Combustion and Flame*, 87(3-4), pp. 289-305.

[^۲]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.

[^۳]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. 785-792.

[^۴]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. 667-67.۴

[^۵]Xuan, Y., Blanquart, G., and Mueller, M. E., 2014, "Modeling Curvature Effects in Diffusion Flames Using a Laminar Flamelet Model," *Combustion and Flame*, 161(5), pp. 1294-1309.

[^۶]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.

[^۷]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.

[^۸]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.