

تأثیر تعداد فلیملت‌ها و نرخ استهلاك اسکالر آرام آنها بر مشخصه‌های احتراقی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز

فرزاد بازیدی طهرانی^۱، سجاد میرزایی^۱، محمدصادق عابدی‌نژاد^۳

۱ استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، bazdid@iust.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناس ارشد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳ دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷

چکیده

در این مقاله تأثیر نحوه شکل‌گیری شعله آشفته بر مشخصه‌های احتراقی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز با استفاده از مدل فلیملت آرام بررسی شده است. تأثیر تعداد فلیملت‌ها و نرخ استهلاك اسکالر آرام آنها بر مشخصات جریان واکنشی همچون دما، نرخ استهلاك اسکالر آشفته شعله، غلظت گونه‌ها و آلاینده نیتروژن مونوکسید در مقاطع مختلف محفظه احتراق از نتایج این مقاله است. برای حل معادلات حاکم بر احتراق غیرپیش‌آمیخته کروسین مایع در محفظه احتراق مدل از شبکه‌بندی منظم حجم محدود استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز واکنشی این محفظه احتراق، از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ Realizable، مدل احتراقی فلیملت پایا و سازوکار شیمیایی ۲۶ واکنشی با ۱۷ گونه مستقل استفاده شده است. این مقاله در سه حالت گوناگون فلیملت انجام و نتایج آنها با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر تعداد فلیملت‌های آرام و ماکزیمم نرخ استهلاك اسکالر شعله بر سرعت جریان ناچیز است. با این حال این دو پارامتر بر دمای شعله تأثیرگذارند. در حالتی که شعله از تعداد فلیملت آرام و ماکزیمم نرخ استهلاك اسکالر بزرگتری تشکیل شده باشد، اختلاف کمتری بین دمای شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. با کاهش تعداد فلیملت‌های آرام و ماکزیمم نرخ استهلاك اسکالر از کشیدگی شعله کاسته و دما و آلاینده نیتروژن مونوکسید بیشتری پیش‌بینی می‌شود.

واژگان کلیدی

محفظه احتراق مدل، فلیملت، سوخت مایع، جریان واکنشی، انتشار آلاینده‌ها

۱. مقدمه

محفظه احتراق توربین گاز با سوخت مایع شامل مفاهیم پیچیده‌ای چون جریان واکنشی، پاشش، جریان آشفته، جریان چندفاز، فرایندهای انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش به‌همراه برهم‌کنش هر یک با دیگری می‌باشد. دستیابی به توزیع دما و گونه‌های واکنشی مطلوب در مدلسازی یک جریان واکنشی منوط به شکل‌گیری شعله منطبق با واقعیت است. تیلیژاک و همکاران (۲۰۱۶) محفظه احتراق یک توربین گاز صنعتی را با استفاده از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ Realizable و LES در دو حالت جریان سرد و جریان واکنشی به‌صورت عددی بررسی کردند [۱]. به‌منظور مدلسازی احتراق، از مدل فلیمات پایا با دو نوع سازوکار شیمیایی مختلف استفاده شده است. یک سازوکار ۲۵ واکنشی با ۱۶ گونه مستقل و متمرکز بر تشکیل دوده، دیگری سازوکار $GRI-2.11$ با ۴۹ گونه و ۲۷۷ واکنش که بر تشکیل نیتروژن مونوکسید متمرکز دارد. نتایج آنها نشان می‌دهد که هر دو سازوکار دقت قابل قبولی در پیش‌بینی مشخصه‌های جریان، به‌خصوص در بحث پیش‌بینی غلظت گونه‌ها داشته‌اند. همچنین سازوکار شیمیایی احتراق نسبت به مدل آشفتگی اثر بیشتری بر دقت شبیه‌سازی دارد. ترک‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) با هدف بهینه‌سازی فرآیند طراحی، شعله غیر پیش‌آمیخته درون یک محفظه احتراق توربین گاز را شبیه‌سازی کرده‌اند. بدین منظور با در نظر گرفتن هزینه‌های محاسباتی، دو مدل فلیمات پایا و $SST k-\omega$ برای شبیه‌سازی جریان احتراقی درون محفظه احتراق در نظر گرفته شده‌اند [۲]. این مدل در یک بهینه‌سازی چندمتغیره شامل بازده احتراق، فاکتور الگوی جریان، کاهش میزان آلاینده‌های کربن مونو اکسید و اکسیدهای نیتروژن و حداقل تولید آنتروپی کار گرفته شده است. بولات و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از رهیافت LES و مدل فلیمات به بررسی تولید آلاینده‌ها در محفظه احتراق توربین گاز پرداختند [۳]. همه محاسبات در یک ساختار بلوکی شبکه‌بندی شده با تمام جزئیات (همه ویژگی‌های عملکرد احتراق توربین گاز $SGT-100$ در فشار ۳ بار) انجام شده است. در این پژوهش تأثیر تلفات حرارتی تابشی، همچنین تأثیر یک سازوکار شیمیایی جایگزین چهار مرحله‌ای مورد بحث قرار گرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و پارامترهای شبیه‌سازی وجود دارد. همچنین نشان داده است که در نرخ تولید ناکس^۱، سازوکار ناکس فوری بر سازوکار ناکس حرارتی و شکست ناکس غلبه دارد.

موریای و همکاران (۲۰۱۳) جریان پاششی - واکنشی درون محفظه احتراق یک موتور جت مجهز به سوخت‌پاش هوا انفجاری^۲ را با مقیاس نیم شبیه‌سازی نمودند [۴]. هدف از این مقاله پیش‌بینی مقدار تولید آلاینده نیتروژن مونوکسید و غلظت دوده در شرایط محفظه مذکور بوده است. در این مقاله شبیه‌سازی در نسبت‌های تعادلی ۰/۹۱ تا ۱/۲۹ انجام شده است. پارامترهای سرعت و سایز قطره، دمای گاز، غلظت گونه نیتروژن مونوکسید و انتشار دوده با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده مقایسه شده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی جریان با رهیافت LES و مدل فلیمات قادر به نمایش مشخصه‌های اسپری و احتراق، در آن مقیاس از محفظه احتراق با یک هندسه پیچیده خواهد بود. ون‌جی و گوت‌هیل (۲۰۰۸) به بررسی پاشش متانول با استفاده از مدل فلیمات و تابع چگالی احتمال فرضی بهبودیافته (βPDF) و تابع چگالی احتمال انتقالی^۳ برحسب روش مونت کارلو پرداختند [۵]. در این بررسی، از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استفاده شده و متانول با سازوکار شیمیایی شامل ۲۳ گونه و ۱۶۸ واکنش شیمیایی مدلسازی شده است. طبق این بررسی، مدل فلیمات به‌همراه تابع بهبودیافته βPDF نتایج بسیار دقیق و منطبق با حل انتقالی تابع PDF ارائه می‌دهد. آنها بیان کردند که با در نظر گرفتن جزئیات شیمیایی در مدلسازی احتراق، آلاینده‌ها و گونه‌های رادیکالی دقیق‌تر محاسبه می‌شوند. زینی‌وند و بازدیدی طهرانی (۲۰۱۲) در یک محفظه احتراق استوانه‌ای اثر تعداد و محل سوراخ‌های فواره هوا را روی احتراق و آلاینده ناکس بررسی کردند [۶]. در این مقاله از مدل احتراقی نرخ محدود اضمحلال گردابه با سوخت کروسین، دیدگاه اوایلر - لاگرانژ و مدل جهت‌های مجزا برای جریان دوفاز و تابش استفاده شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش فاصله محوری سوراخ‌های هوا از سوخت‌پاش، آلاینده ناکس کاهش پیدا می‌کند و به‌طور معکوس توان حرارتی آن افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد سوراخ‌های هوا هر دو پارامتر توان حرارتی و آلاینده ناکس افزایش می‌یابند. بازدیدی طهرانی و زینی‌وند (۲۰۱۰) طی مقاله‌ای دیگر نشان دادند که مدل غیر پیش‌آمیخته تعادلی به‌همراه تابع چگالی احتمال فرضی بتا، توزیع دما را بهتر از مدل اضمحلال گردابه، مخصوصاً در نزدیکی دیوار پیش‌بینی می‌کند [۷]. گروه تحقیقاتی سامولتسن و همکاران [۸-۱۰] از سال ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۳ م

کلی معادلات در مختصات دکارتی، پایا و غیرقابل تراکم به صورت معادله ۱ است؛ به طوری که در این رابطه ψ بیانگر متغیرهای وابسته شامل جرم، ممتوم، انرژی جنبشی آشفته، نرخ اضمحلال انرژی آشفته، آنتالپی و کسر جرمی گونه‌ها می‌باشد. پارامترهای S_{ψ_1} و S_{ψ_2} نیز به ترتیب عبارت‌های چشمه و چاه برای فاز گازی و فاز قطرات می‌باشند.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X}(\rho U \psi) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho V \psi) + \frac{\partial}{\partial Z}(\rho W \psi) \\ &= \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma_{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial Y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) + S_{\psi_1} + S_{\psi_2} \end{aligned} \quad (1)$$

۲-۲. فاز گسسته

جریان گاز به‌عنوان فاز پیوسته است و به‌صورت اویلری مدل می‌شود. در ناحیه نزدیک به سوخت‌پاش، به‌دلیل پاشش قطرات در محدوده میکرومتر، کسر حجمی آنها کمتر از ۱۰ درصد کسر حجمی فاز گازی می‌شود. لذا در این ناحیه فاز گسسته‌ای ایجاد می‌شود که برای مدل کردن آن از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود. مسیر حرکت قطرات از معادله حرکت به‌دست می‌آید [۱۱].

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) \quad (2)$$

عبارت سمت چپ اینرسی یک قطره است که معرف مقاومت جرم برای تغییر سرعت و جهت آن است. عبارت سمت دوم معرف نیروی پسی اصطکاکی است. مدل دمای یکنواخت (تعادلی) برای مدل کردن دمای قطره استفاده شده است. همچنین فرض شده است که تغییر دما درون قطره وجود ندارد و دمای داخل قطره همگن است [۱۱-۱۲]. بنابراین، قطرات گسسته‌سازی نمی‌شوند و هزینه محاسبات کاهش می‌یابد. نرخ تبخیر dm_p/dt از طریق رابطه انتقال جرم اطراف قطره محاسبه می‌شود [۱۳-۱۴].

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_{\infty} D_{i,m} Sh_{AB} \times \ln(1 + B_m) \quad (3)$$

d_p قطر قطره، ρ_{∞} چگالی فاز گازی و $D_{i,m}$ ثابت نفوذ بخار در فاز گاز است. همچنین Sh_{AB} و B_m به ترتیب اعداد شروود^۷ و جرم اسپالدینگ^۸ هستند. دمای قطره براساس معادله تعادل حرارتی قطره (معادله ۴) به‌روزرسانی می‌شود. در این معادله dm_p/dt ، C_p ، T_p ، h ، T_{∞} ، h_{fg} به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه

تحقیقات تجربی روی یک محفظه احتراق استوانه‌ای مدل انجام دادند. این گروه یکی از شناخته‌شده‌ترین مجموعه‌های تحقیقاتی طی دهه اخیر بوده است. کارهای آنها اغلب به سفارش صنایع معتبر و بین‌المللی توربین گاز هوایی و صنعتی بوده است. طی این سال‌ها، محل و نحوه توزیع سوراخ‌های اولیه و ثانویه، بازشدگی ورودی محفظه، سوخت‌های مختلف، دوده و ناکس به‌همراه توزیع سرعت، دما و قطرات بررسی شده‌اند. با توجه به وجود اطلاعات هندسی و تجربی که از این تحقیقات موجود است، شبیه‌سازی و تحلیل این هندسه می‌تواند راه‌گشای دیگر مسائل احتراق و پاشش سوخت مایع باشد. در کارهای گذشته از مدل‌های احتراقی مختلفی نظیر اضمحلال گردابه^۴، غیرپیش‌آمیخته تعادلی و فلیملت جهت شبیه‌سازی جریان واکنشی استفاده شده است. در هیچ‌کدام از کارهای پیشین به بررسی تأثیر تعداد فلیملت‌ها و نرخ استهلاک اسکالر آرام آنها بر مدلسازی شعله جریان واکنشی سوخت کروسین در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز پرداخته نشده است. در کار حاضر، تأثیر نحوه مدلسازی فلیملت بر مشخصه‌های احتراقی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز بررسی شده است. فلیملت شعله آشفته از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقادیر پیش‌بینی شده برای مشخصه‌های جریان طی شبیه‌سازی می‌باشد. در این مقاله اثر هر یک از دو متغیر مذکور بر توزیع سرعت و دمای جریان واکنشی دوفاز، کسر مخلوط^۵ و نرخ استهلاک اسکالر آشفته شعله، غلظت گونه‌ها و آلاینده نیتروژن مونوکسید بررسی می‌شود. در این تحقیق از هندسه محفظه احتراق مدل کامرون^۶ (۱۹۸۹) استفاده شده است که همه اجزای محفظه‌های احتراق اعم از چرخاننده، سوخت‌پاش هوا انفجاری، سوراخ‌های اولیه و ثانویه را شامل می‌شود [۸]. مقاله حاضر در سه حالت فلیملت مدلسازی شده و در هر حالت شرایط مرزی منطبق بر شرایط آزمایشگاهی است. اعتبارسنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی از طریق مقایسه سرعت و دما در مقاطع مختلف محفظه احتراق انجام شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج حل عددی سایر مشخصه‌های جریان احتراقی در سه حالت فلیملت مقایسه شده‌اند.

۲. معادلات حاکم

۲-۱. فاز پیوسته

معادلات حاکم بر جریان واکنشی آشفته شامل معادله بقای جرم، بقای تکانه، بقای انرژی و بقای جرم اجزای واکنشی است. شکل

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{\rho}}} \quad (6)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2 S_{i,j} S_{i,j} \mu_i} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

۲-۴. مدل احتراقی

در مقاله حاضر، از مدل احتراقی فیلیمت پایا برای مدلسازی واکنش‌های شیمیایی محفظه احتراق مدل توربین گاز استفاده شده است. جریان آشفته و جریان احتراقی غیرپیش‌آمیخته با استفاده از تابع چگالی احتمال فرضی بتا^۱ مرتبط می‌شوند. در مدل احتراقی فیلیمت، شعله نفوذی آشفته به صورت یک مجموع آماری از شعله‌های کوچک (فیلیمت‌های) آرام فرض می‌شود [۲۰]. معادلات فیلیمت در قالب دو معادله دما و کسر جرمی اجزاء و انتقال داده شده به دستگاه کسر مخلوط، به صورت معادله ۷ و ۸ به دست می‌آیند. در این معادلات Y_i نسبت جرمی گونه i ام، $c_{p,i}$ گرمای ویژه گونه i و c_p گرمای ویژه میانگین ترکیب است. S_i نیز نرخ واکنش، H_i آنتالپی ویژه گونه i و پارامتر χ نرخ استهلاک اسکالر است.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i H_i S_i \quad (8)$$

برای به دست آوردن توزیع نرخ استهلاک اسکالر در شعله و معادله بقای کسر مخلوط در شعله‌های نفوذی جریان مخالف از روش تشابهی استفاده می‌شود. نرخ استهلاک اسکالر برحسب کسر مخلوط و نرخ واکنش در هر نقطه به صورت بسط ۹ با چگالی متغیر قابل محاسبه است. در این معادلات، دما و کسر جرمی گونه‌ها در حالت پایا، تابعی از کسر مخلوط و کمیت غیرتعدالی نرخ استهلاک اسکالر بوده که بیانگر اثر میدان جریان روی ساختار فیلیمت است.

قطره در فشار ثابت، دمای قطره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، دمای فاز پیوسته، نرخ تبخیر و حرارت تغییر فاز می‌باشند. با وصول دمای قطره به نقطه جوش، معادله‌ای مبنی بر نرخ جوشش قطره در معادلات لحاظ می‌شود که در معادله ۴ ارائه شده است. در این معادله $C_{p,\infty}$ ، ρ_p و k_∞ به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه گاز، چگالی قطره و ضریب انتقال حرارت رسانشی می‌باشند.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (4)$$

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p C_{p,\infty} d_p} \left(1 + 0.23 \sqrt{\text{Re}_d} \right) \times \ln \left[1 + \frac{C_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right]$$

سوخت در دمای ۳۰۰ کلوین با سرعت نسبی ۱۱۰ متر بر ثانیه و زاویه ۳۰ درجه از یک سوخت‌پاش هوا انفجاری به درون محفظه پاشیده می‌شود. با توجه به اینکه کسر حجمی قطرات کوچکتر از ۰/۰۰۱ است، نیازی به محاسبه برخورد قطرات با یکدیگر نیست و به عبارت دیگر تأثیر یک قطره از دیگر قطرات ناچیز است [۱۷-۱۵]. در عین حال وجود فاز گسسته روی فاز اصلی تأثیرگذار است و باید این تأثیرگذاری در معادلات فاز پیوسته به صورت یک ترم چشمه لحاظ شوند. اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه مدلسازی فاز گسسته و معادلات حاکم بر آن در مراجع [۱۱] و [۱۵] ذکر شده است.

۲-۳. مدل آشفستگی

براساس تحقیقات گذشته [۶] و [۱۸]، در این مقاله از مدل $k-\varepsilon$ Realizable برای مدلسازی آشفستگی جریان در محفظه احتراق مدل توربین گاز استفاده می‌شود. معادلات انتقال در مدل $k-\varepsilon$ Realizable توسط شیخ^۹ و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شده است [۱۹] که به صورت روابط ۸ و ۹ است. پارامتر η بیان‌کننده نسبت زمان مشخصه آشفستگی به زمان مشخصه میدان جریان، k انرژی جنبشی و ε نرخ اضمحلال است.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + B - \rho \varepsilon$$

می‌شود. با توجه به تغییرات دائمی دما، فشار، غلظت گونه‌ها در احتراق و گازهای حاصل از آن، ثابت‌گرفتن ضریب جذب باعث کاهش دقت محاسبات می‌شود. لذا در این تحقیق از مدل توزیع وزنی مجموع گازهای خاکستری، که توسط اسمیت^{۱۱} و همکاران [۲۵] پیشنهاد شده، برای به‌دست آوردن ضریب جذب گازهای حاصل از احتراق استفاده شده است. در مراجع [۱۱] و [۲۳] توضیحات بیشتری در این خصوص ارائه شده است.

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(r,s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \phi(s,s') d\Omega' \quad (13)$$

۲-۶. حلگر محاسباتی

شبیه‌سازی جریان در بسته نرم‌افزاری انسیس فلونت^{۱۲} [۱۱] انجام می‌شود. برای حل معادله بقای پیوستگی، انرژی، تکانه، معادلات مدل‌های احتراقی، فاز گسسته و تابش گرمایی از روش حجم محدود در سه بعد استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان به‌صورت ضمنی خطی‌سازی و به‌صورت مرتبه دو گسسته‌سازی می‌شوند. معیار همگرایی حل معادلات 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود. جملات نفوذی در معادلات، با استفاده از روش اختلاف مرکزی^{۱۳} و عبارات جابه‌جایی به‌صورت مرتبه دو بالادست^{۱۴} گسسته می‌شوند. الگوریتم سیمپل C [۱۱] عبارت فشار و سرعت را به هم متصل می‌کند. برای پیش‌بینی مشخصه‌های دینامیکی گاز و قطرات، دیدگاه اوپلری برای فاز پیوسته اتخاذ می‌شود و دیدگاه لاگرانژی برای پیگیری حرکت و رفتار ترمودینامیکی فاز گسسته اعمال می‌شود. همچنین برای محاسبه گرمای ویژه گونه‌ها از توابع چندجمله‌ای وابسته به دما استفاده می‌شود. در کار حاضر، دو نوع NO_x حرارتی و فوری محاسبه می‌شوند. برای محاسبه NO_x حرارتی از سازوکار توسعه‌یافته زلدوویچ^{۱۵} [۲۶] و برای محاسبه رادیکال‌های O و OH ، از فرض تعادل جزئی استفاده می‌گردد [۲۷]. نرخ تشکیل NO_x فوری^{۱۶}، از رابطه ارائه‌شده توسط دسویت^{۱۷} [۲۸] به‌دست می‌آید. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه محاسبه NO_x ، مراجع [۶]، [۱۱] و [۲۷] مفید خواهند بود.

۳. هندسه و شرایط مرزی

محفظه‌های احتراق توربین گاز طی چهل سال اخیر توسعه پیوسته‌ای در تکامل ساختار اصلی محفظه داشته‌اند. محفظه‌های

$$\chi(f) = \frac{\alpha_s}{4\pi} \frac{3(\sqrt{\rho_\infty/\rho} + 1)^2}{2\sqrt{\rho_\infty/\rho} + 1} e^{(-2[erfc^{-1}(2f)])^2} \quad (9)$$

معادلات ۷ و ۸ همراه با شرایط مرزی تعریف شده در فضای کسر مخلوط و داشتن یک سازوکار شیمیایی برای مقادیر مختلف نرخ استهلاک اسکالر قابل انتگرال‌گیری است. مقادیر کسر مخلوط و واریانس آن از حل معادلات انتقال آنها به‌دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho f}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j f}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{l_t} \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho f'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j f'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{l_t} \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x_j} \right] + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \overline{f}}{\partial x_j} \right)^2 - C_\chi \overline{\rho \chi} \quad (11)$$

نرخ استهلاک اسکالر متوسط با در نظرگیری آثار آشفته‌گی جریان براساس روابط ۱۲ محاسبه می‌شود [۱۱]. در این روابط k انرژی جنبشی آشفته، ε استهلاک آشفته و ضریب C_χ معمولاً برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

$$\overline{\chi_{st}} = \overline{\chi}, \overline{\chi} = C_\chi \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (12)$$

در این مقاله شبیه‌سازی‌ها طی سه حالت مختلف (مطابق جدول ۱) برای سوخت کروسین با سازوکار شیمیایی ۲۶ واکنشی و ۱۷ گونه مستقل انجام شده است [۲۲]. در حالت اول، شعله با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر آرام کمتری نسبت به دو حالت دیگر شبیه‌سازی شده است (تعداد ۹ فلیلمت آرام با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر ۹). در حالت‌های دوم و سوم، شبیه‌سازی شعله با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر ممکن (نرخ استهلاک اسکالر ۱۳) انجام شده است. با این تفاوت که تعداد فلیلمت‌های آرام تشکیل‌دهنده شعله در این دو حالت متفاوت است. در حالت دوم شعله با ۹ فلیلمت آرام تشکیل شده و در حالت سوم، شبیه‌سازی شعله با ۲۸ فلیلمت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیلمت آرام در شعله، ساختار کلی و کشیدگی شعله آشفته با دقت بیشتری شکل می‌گیرد. در عین حال، افزایش تعداد فلیلمت آرام، سبب افزایش زمان و هزینه محاسبات نیز می‌گردد.

۲-۵. مدل‌سازی انتقال حرارت تابش

معادله انتقال حرارت تابشی در محیط‌های گازی یک معادله انتگرال-دیفرانسیلی (معادله ۱۳) است [۲۳]. در این مقاله، به‌دلیل دقت و هزینه محاسباتی معقول از مدل جهات مجزا [۲۴] استفاده

احتراق کنونی به طور کلی به سه دسته محفظه های استوانه ای شکل، استوانه - حلقوی و حلقوی تقسیم می شوند [۲۹]. استفاده از محفظه احتراق مدل استوانه ای برای بررسی جریان واکنشی مرسوم است و در سال های اخیر از این نوع محفظه احتراق مدل به وفور در کارهای پژوهشی استفاده شده است [۳۰-۳۲-۶]. در مقاله حاضر، از هندسه محفظه احتراق استوانه ای مدل کامرون و همکاران [۸] جهت بررسی مشخصه های جریان و انتقال حرارت استفاده شده است. دلیل انتخاب این محفظه احتراق مدل جهت شبیه سازی های عددی، وجود اطلاعات کافی در خصوص جزئیات هندسه محفظه، نوع و هندسه سوخت پاش، جزئیات سوئیچرلر و

مشخصه های جریان واکنشی از قبیل سرعت متوسط جریان سرد، سرعت و دمای متوسط جریان واکنشی، قطر متوسط ساتر، سرعت محوری قطرات پاشش سوخت و غلظت گونه های CO ، CO_2 و NO بوده است. هدف نویسندگان از انتخاب این محفظه احتراق مدل، پدیده شناسی و ساختارشناسی جریان آشفته اسپری واکنشی و تعمیم آن به محفظه های احتراق صنعتی می باشد. همچنین، با توجه به اینکه استفاده از رهیافت شبیه سازی گردابه های بزرگ جهت مدلسازی آشفته گی جریان در برنامه آتی نویسندگان قرار دارد، لذا استفاده از یک هندسه واقعی محفظه احتراق توربین گاز هزینه محاسباتی بسیار بالایی خواهد داشت.

جدول ۱. اطلاعات وضعیت فیلمت در حالت های مورد مطالعه

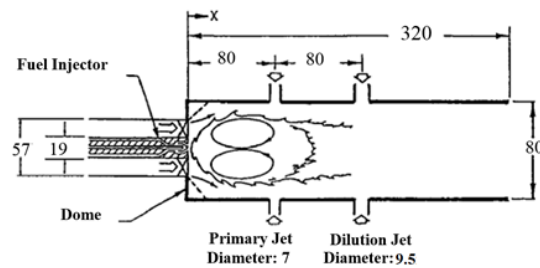
حالت های مورد مطالعه	تعداد فیلمت	ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر در فیلمت آرام
Case - A	۹	۹
Case - B	۹	۱۳
Case - C	۲۸	۱۳

درصد سهم فواره های اولیه و ۴۰ درصد مابقی صرف رقیق سازی جریان درون محفظه می شود. شرایط مرزی در ورودی و خروجی دامنه محاسباتی به ترتیب جریان جرمی ورودی و فشار خروجی لحاظ شده اند. در مسئله حاضر شرایط مرزی گرمایی و سرعت دیوار به ترتیب بی دررو و عدم لغزش فرض شده اند.

۴. شبکه بندی هندسه

برای شبکه بندی محفظه احتراق، از بسته نرم افزاری انسیس^{۱۸} [۳۳] استفاده شده است. شبکه ایجاد شده از نوع سازمان یافته بوده و با توجه به اینکه در نواحی اولیه محفظه احتراق، پدیده احتراق رخ می دهد و فواره های اولیه و رقیق سازی نیز تأثیر زیادی بر جریان می گذارند، در این نواحی از سلول های متراکم برای شبکه بندی استفاده شده است. جهت رسیدن به نتایج پایدار و مستقل از شبکه، از چهار سایز شبکه مختلف برای شبیه سازی جریان درون محفظه استفاده شده است که شبکه های "الف"، "ب"، "ج" و "د" به ترتیب دارای ۲۵۰ هزار، ۵۰۰ هزار، ۸۷۰ هزار و یک میلیون و سیصد هزار سلول محاسباتی هستند. شکل ۲ توزیع سرعت محوری را در این چهار شبکه نشان می دهد. براساس شکل ۲، با توجه به دقت مناسب و هزینه کمتر شبکه

شکل ۱ طرحواره این هندسه را نشان می دهد که از یک هشت ضلعی به طول ۳۲۰ و قطر ۸۰ میلی متر تشکیل شده است. چهار فواره اولیه عمود بر هم به قطر ۷/۵ میلی متر در فاصله ۸۰ میلی متری از صفحه ورودی محفظه احتراق قرار دارند و یک ردیف چهارتایی سوراخ دیگر نیز به قطر ۹ میلی متر در فاصله ۱۶۰ میلی متری از ورودی محفظه احتراق جهت بهبود فرایند احتراق تعبیه شده است.



شکل ۱. طرحواره محفظه احتراق مدل (ابعاد میلی متر) [۸]

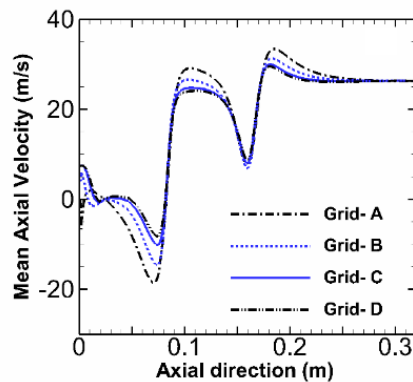
سوئیچرلر مورد استفاده در این محفظه از نوع محوری است که پره های آن زاویه ۶۰ درجه با هم دارند. هوای ورودی به محفظه احتراق ۱۶۳ کیلوگرم بر ساعت بوده که در دمای ۳۷۳ کلوین و فشار ۱ اتمسفر، ۲۵ درصد آن به سوئیچرلر و از باقی مانده آن، ۳۵

اعمال توابع دیواره باشد [۳۴]. تغییرات Y^+ روی سطح دیواره در طول محفظه احتراق مدل در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

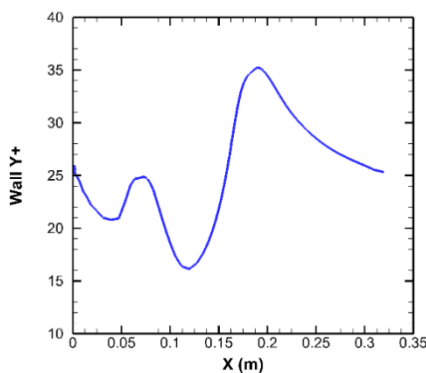
۵. بحث و نتایج

کمیت‌های سرعت، دما، نرخ استهلاک اسکالر شعله، غلظت گونه‌ها و آلایندة نیتروژن مونوکسید در مقاطع مختلف محفظه احتراق مدل توربین گاز مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۴ توزیع مؤلفه محوری سرعت در سه مقطع مختلف محفظه را نشان می‌دهد.

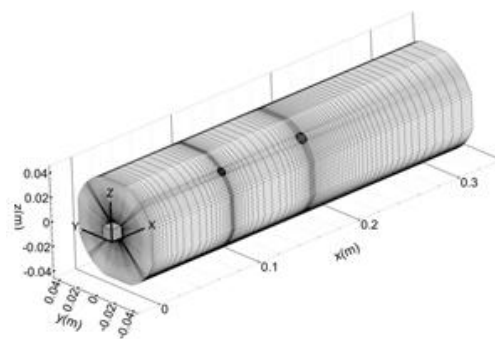
"ج" نسبت به سه شبکه دیگر، از شبکه "ج" جهت شبیه‌سازی نهایی جریان درون محفظه استفاده می‌شود. شکل (۳-الف) شبکه نهایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، در نواحی که گرادیان سرعت و غلظت دارای شیب تند بوده، بر تراکم سلول‌ها اضافه شده است. با توجه به استفاده از مدل آشفتگی $Realizable\ k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی جریان آشفته، تراکم سلول‌های نزدیک به دیواره‌ها و فاصله اولین سلول برحسب واحد دیواره به گونه‌ای انتخاب شده است که Y^+ در محدوده ۳۰ برای



شکل ۲. بررسی عدم وابستگی حل مسئله به تعداد سلول‌های محاسباتی



(ب)



(الف)

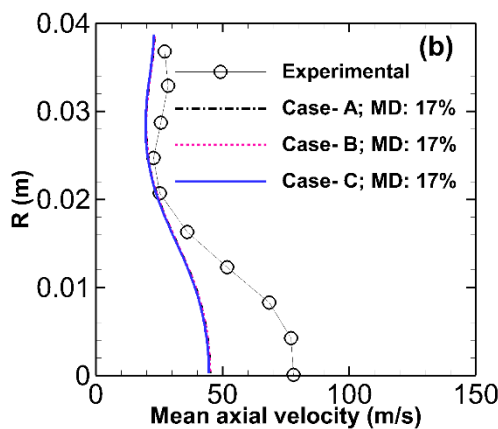
شکل ۳. نمایش از الف) هندسه محفظه احتراق $WJCC$ شبکه‌بندی شده، ب) تغییرات Y^+ روی دیواره در طول محفظه احتراق مدل

از $X = 0.02\ m$ ساختار سرعت متأثر از سرعت هوای قبل از جت‌های رقیق‌سازی و سرعت سوخت نمی‌باشد و جریان به سمت یکنواختی پیش می‌رود. به‌طور میانگین اختلاف توزیع سرعت پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی نزدیک به ۱۷ درصد می‌باشد. در شکل ۵ توزیع دمای متوسط در سه مقطع مختلف به نمایش گذاشته شده است. با توجه به مقادیر انحراف معیار ارائه شده، تعداد فلیملت‌ها و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر آرام فقط بر

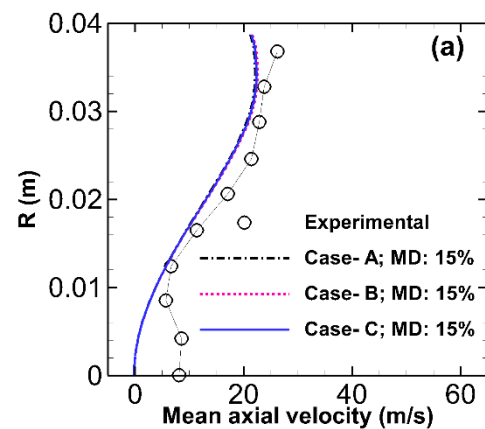
افزایش تعداد فلیملت‌های آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آرام، تأثیری بر پروفیل سرعت محوری ندارد. کمتر بودن سرعت در نزدیکی محور طولی محفظه احتراق ناشی از قرارگیری ناحیه بازگردش در ناحیه اولیه محفظه احتراق و برهم‌کنش برخورد سوخت با هوای سوئیرلر و جت‌های اولیه است. در مقطع $X = 0.1\ m$ به‌دلیل قرارگیری بین جت‌های اولیه و رقیق‌سازی، بر سرعت جریان افزوده می‌شود. در مقطع

نازل سوخت یک نامتقارنی وجود داشته است که در شکل‌گیری توزیع دما ناهمگون در نتایج تجربی تأثیر گذاشته است. در شکل ۶ دمای متوسط جریان روی محور مرکزی محفظه احتراق نمایش داده شده است. هر سه منحنی دارای دو قله و دو قعر می‌باشند. ماکزیمم دمای اولیه در فاصله‌ی تقریبی 0.03 متری از ابتدای محفظه قرار دارد که ناشی از مرکز شعله و اوج واکنش‌های احتراقی درون محفظه احتراق می‌باشد. با ورود فواره‌های اولیه هوا دما کاهش می‌یابد و به مینیمم مقدار بعد از شعله‌ور شدن سوخت می‌رسد.

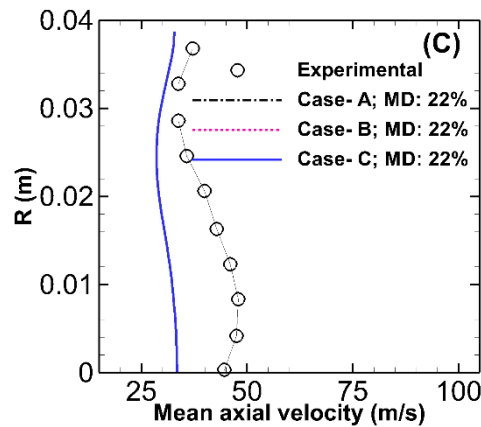
دمای جبهه شعله $X = 0.04m$ اثر می‌گذارد و در سایر مقاطع اختلافی مشاهده نمی‌شود؛ زیرا محل تشکیل شعله در ابتدای محفظه احتراق (پیش از فواره‌های اولیه) می‌باشد. اختلاف دمایی که در پروفیل‌های دمایی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی مشاهده می‌شود می‌تواند ناشی از در نظر نگرفتن انتقال حرارت جابجایی باشد؛ زیرا در اطراف بدنه محفظه احتراق به گفته کامرون و همکاران چهار مجرای ورودی آب برای خنک‌کاری بدنه وجود داشته است که به دلیل نبود اطلاعات کافی از آن صرف نظر شده است. همچنین بنا به گفته کامرون و همکاران [۸]، در



(ب)



(الف)



(ج)

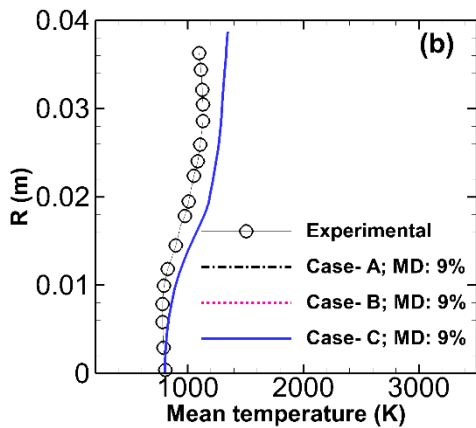
شکل ۴. مقایسه توزیع مؤلفه محوری سرعت در راستای شعاع با نتایج تجربی [۸]؛ (الف) $X = 0.04m$ ، (ب) $X = 0.1m$ ، (ج) $X = 0.18m$

دمای کاربردی برای توربین می‌رساند. طبق شکل ۶ اثر تعداد فلیمت بر توزیع دما روی محور مرکزی محفظه بسیار ناچیز است. با این حال، پروفیل دمای حالت سوم، کمی پایین‌تر از پروفیل دما در دو حالت دیگر است. دلیل آن را می‌توان با توجه به شکل ۸، در نرخ استهلاک اسکالر بالاتر شعله برای حالت سوم جستجو کرد.

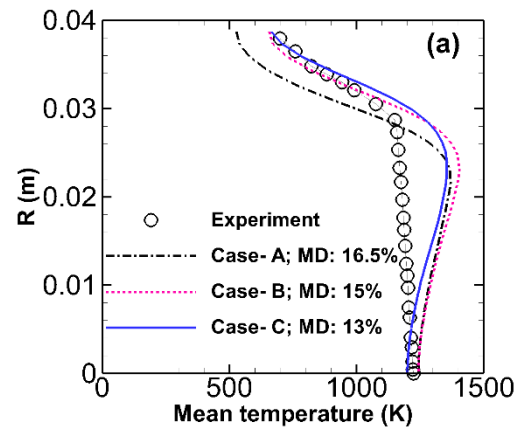
با پیشروی واکنش‌های احتراقی و پس از ورود هوا از طریق فواره‌های اولیه، دما مجدداً بالا می‌رود و یک نقطه ماکزیمم دمایی شکل می‌گیرد. دومین مینیمم دما تحت تأثیر فواره‌های رقیق‌سازی هوا ایجاد می‌شود. ورود هوا از طریق فواره‌های رقیق‌سازی، دمای گازهای خروجی از محفظه را کاهش داده و به

اسکالر کمتری انجام شده است (حالت اول) که باعث پیش‌بینی دمای شعله بیشتری در ناحیه اولیه شده است. در این حالت شعله تعادلی تر بوده و کشیدگی آن کمتر می‌باشد. علت این فزونی دما در حالت اول، بقا و تداوم شعله در نرخ استهلاک اسکالر پایین‌تر است.

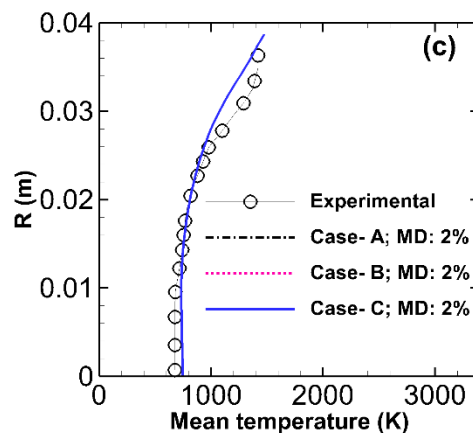
در شکل ۷ توزیع دمای متوسط جریان در مقطع $X = 0.04m$ متر نشان داده می‌شود. مطابق شکل ۷ اثر تعداد فلیملت آرام و حداکثر نرخ استهلاک اسکالر آرام شعله بر دمای جریان در ناحیه اولیه و نقطه ماکزیمم دما محسوس است. ماکزیمم دما در حالتی به دست می‌آید که شبیه‌سازی شعله با حداکثر نرخ استهلاک



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵. مقایسه توزیع دمای متوسط در راستای شعاع با نتایج تجربی [۸]؛ (الف) $X = 0.04m$ ، (ب) $X = 0.1m$ ، (ج) $X = 0.18m$

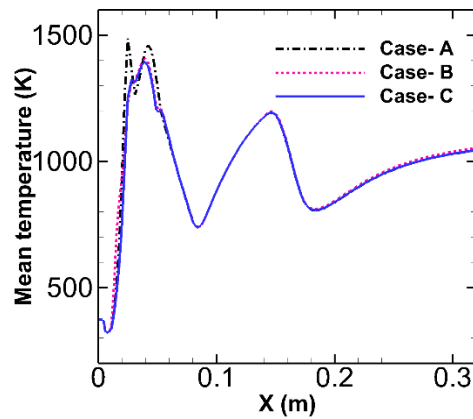
($X \cong 0.04m$)، محل شروع واکنش‌های شیمیایی احتراق و محل شکل‌گیری شعله رخ می‌دهد. دلیل این پدیده زیاد بودن نرخ استهلاک اسکالر آرام توأم با کم بودن تعداد فلیملت‌ها نسبت به دو حالت دیگر است.

در شکل ۹، تغییرات کسر مخلوط روی محور مرکزی محفظی احتراق نشان داده شده است. بیش‌ترین مقدار کسر مخلوط در ناحیه شکل‌گیری شعله می‌باشد؛ یعنی محلی که بیشترین مقدار سوخت و کمترین مقدار اکسیژن وجود دارد. با تکامل احتراق سوخت و ورود اکسیژن از فواره‌های اولیه، از مقدار کسر مخلوط

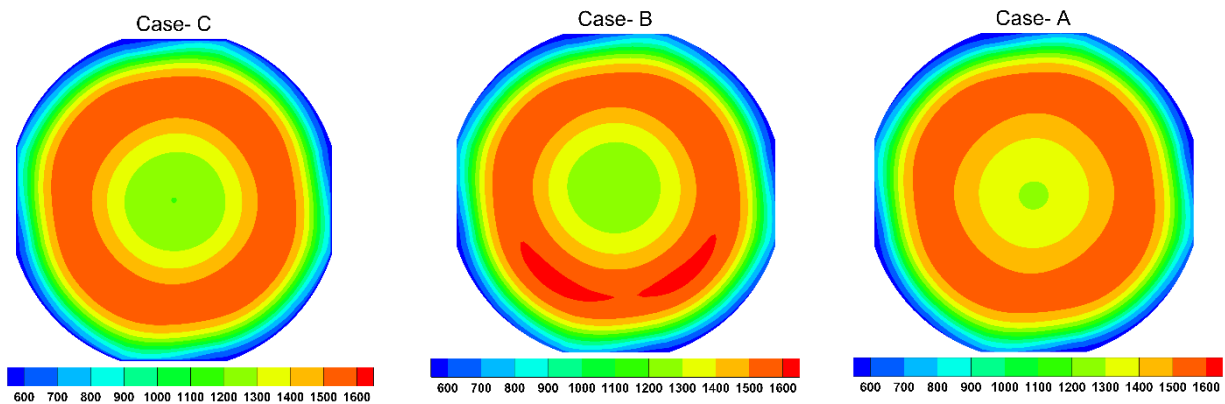
شکل ۸ بیانگر تغییرات نرخ استهلاک اسکالر شعله تحت تأثیر آشفته‌گی جریان، بر روی محور مرکزی محفظه احتراق می‌باشد. ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آشفته در حالت سوم به دست می‌آید. با افزایش تعداد فلیملت آرام، شعله تحت تأثیر بیشتر از آشفته‌گی جریان، کشیدگی آن بیشتر می‌گردد. با فاصله گرفتن از فواره‌های اولیه، مقدار نرخ استهلاک اسکالر نیز به صفر میل می‌کند. در واقع از این فاصله به بعد، دیگر اثری از شعله روی محور مرکزی محفظه احتراق مشاهده نمی‌شود. بیشترین نرخ استهلاک اسکالر در حالت دوم و نزدیک سوخت‌پاش

بیشینه نرخ استهلاک اسکالر آرام، کسر مخلوط در ناحیه شکل‌گیری شعله کاهش می‌یابد.

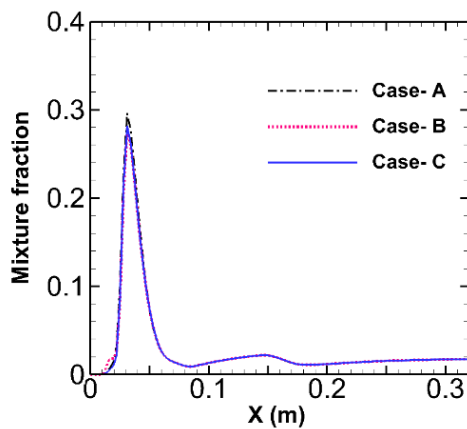
کاسته می‌شود. مطابق شکل ۹، با افزایش تعداد فیلیمت آرام، کسر مخلوط به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش



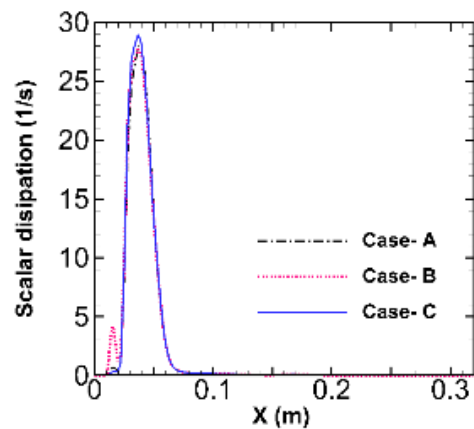
شکل ۶. دمای متوسط جریان روی محور مرکزی محفظه احتراق مدل



شکل ۷. توزیع دمای متوسط جریان در مقطع $X = 0.04m$



شکل ۹. توزیع کسر مخلوط روی محور مرکزی هندسه

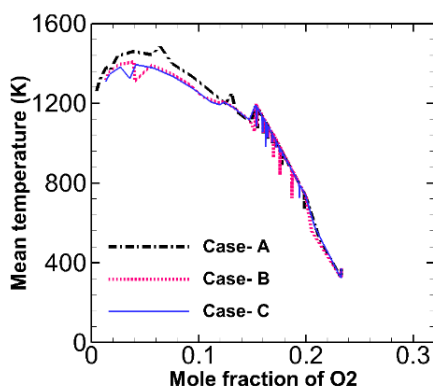


شکل ۸. نرخ استهلاک اسکالر آشفته شعله روی محور مرکزی هندسه

کاملاً صرف احتراق سوخت شده باشد. در ادامه با توجه به ورود هوا از فواره‌های اولیه و رقیق‌سازی و همچنین بازگردش جریان هوا به ناحیه اولیه محفظه احتراق، مجدداً مقدار اکسیژن سیر

در شکل ۱۰ تغییرات کسر مولی گونه O_2 روی خط مرکزی محفظه نشان داده شده است. کمترین مقدار کسر مولی گونه اکسیژن در محلی رخ می‌دهد که اکسیژن ورودی از چرخاننده

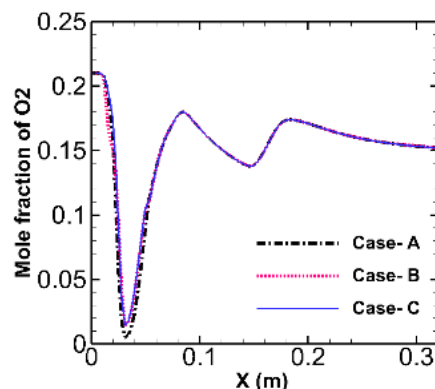
نسبت به دو حالت ديگر سريع تر است. شكل ۱۲ تغييرات دماي محفظه احتراق بر كسر مولي بخار آب روي خط مركزي محفظه را نشان مي دهد. بيشترين غلظت H_2O جايي مشاهده مي شود كه دما ماكزيمم است؛ زيرا بخار آب اصلي ترين محصول احتراق كامل است. با توجه به اينكه در حالت اول ماكزيمم نرخ استهلاك اسكالر شعله آرام از مقدار كمتري نسبت به ديگر حالتها برخوردار است، شعله شبیه سازی شده بيش ترين شابهت به احتراق كامل را دارد. در اين حالت واكنشها شبیه به واكنش استوكيومتری بوده و به دمایی نزدیک به دمای آدياباتیک شعله می رسد. در نتیجه بيشترين بخار آب نسبت به دو حالت ديگر توليد می گردد. اين در حالی است كه در حالت های دوم و سوم به دليل افزایش نرخ استهلاك اسكالر، دما و ميزان توليد بخار آب در ناحیه تشكيل شعله کاهش پيدا می کند. به دليل دمای بالای حاصل شده در حالت اول نسبت به دو حالت ديگر، واكنش های بازگشتی و تعادلی شكل گرفته و از غلظت محصولات احتراق نظير گونه هایی از قبيل H_2O و CO_2 در ناحیه شعله كاسته می شود. با توجه به اينكه سه حالت مفروض در كار حاضر به شبیه سازی جبهه ی شعله مربوط می باشد، بيشترين تفاوت بين حالتها، در نزديکی شعله مشاهده می شود. شكل ۱۳ كسر مولي بخار آب روي خط مركزي محفظه را نشان می دهد. در انتهای محفظه مقادير غلظت ها به يك مقدار ثابت و تعادلی رسيده و تفاوتی در بين حالتها دیده نمی شود.



شكل ۱۱. توزيع دمای متوسط جريان برحسب غلظت اكسيژن روي محور مركزي هندسه

صعودی می گیرد. در حالت اول مصرف سوخت و اكسيژن نسبت به دو حالت ديگر بيشتر است؛ زيرا در اين حالت شعله با تعداد فليملت آرام و ماكزيمم نرخ استهلاك اسكالر كمتري شبیه سازی شده و به شعله تعادلی نزديكتر است. در شعله تعادلی واكنش های شيميایی به واكنش های استوكيومتری^{۱۹} نزديكتر است. مقدار دمای ماكزيمم در شكل ۶ معرف اين موضوع است. لذا با افزایش ماكزيمم نرخ استهلاك اسكالر و تعداد فليملت های آرام در جبهه شعله، بر كسر مولي اكسيژن افزوده می شود.

در شكل ۱۱ تغييرات دمای متوسط جريان بر كسر مولي گونه اكسيژن روي خط مركزي محفظه نشان داده شده است. در اين شكل، داده ها به ترتيب افزایش كسر مولي اكسيژن در مختصات محوری نامتوالی مرتب شده اند. بخش هایی از منحنی های موجود كه به صورت خطوط عمودی هستند، بيانگر نقاطی روي محور مركزي محفظه احتراق می باشند كه كسر مولي اكسيژن يكسانی دارند؛ اما دما در آنها متفاوت است. نواحی با غلظت O_2 زياد نمايانگر ورودی هوا و بخش های عاری از واكنش های احتراقي هستند. در نتیجه دما در اين نواحی كم است. نواحی با غلظت O_2 كم نشان دهنده محل زنجیره واكنش های احتراقي است كه اكسيژن در آنجا مصرف می شود. اين نواحی محل تشكيل شعله هستند كه دما در آنها بالاست. در حالت اول، اكسيژن سريع تر مصرف شده و به دمای بالاتری می رسد. به عبارت ديگر نرخ مصرف اكسيژن و پيشرفت واكنش های شيميایی در حالت اول

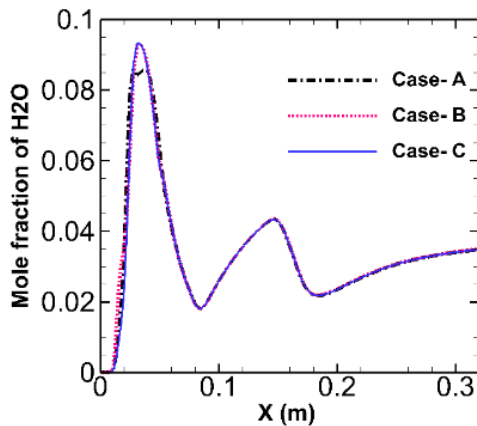


شكل ۱۰. توزيع كسر مولي اكسيژن روي محور مركزي هندسه

افزایش كسر مولي گونه H_2O كه یکی از محصولات اصلي احتراق است نشانگر فزونی دمای محفظه احتراق است. تحت تأثیر سازوكار شيميایی استفاده شده، با افزایش ميزان H_2O و افزایش

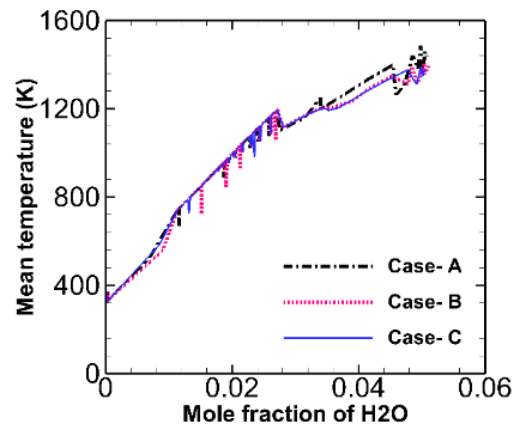
در شكل ۱۴ به مقایسه ميزان كسر مولي گونه های H و H_2O روي خط مركزي محفظه پرداخته شده است. پيش از كسر مولي $0.42/0$ برای بخار آب، مقدار H توليد شده ناچيز است.

بیشتر از دو حالت دیگر است. به همین دلیل بیشترین میزان تشکیل مولکول های H_2O و H نیز در حالت اول مشاهده می شود. در حالت های دوم و سوم که شعله آرام با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر بیشتری تشکیل شده است، بیشینه دمایی پایین تر بوده و میزان H کمتری تحت تأثیر سازوکار شیمیایی تشکیل می شود.

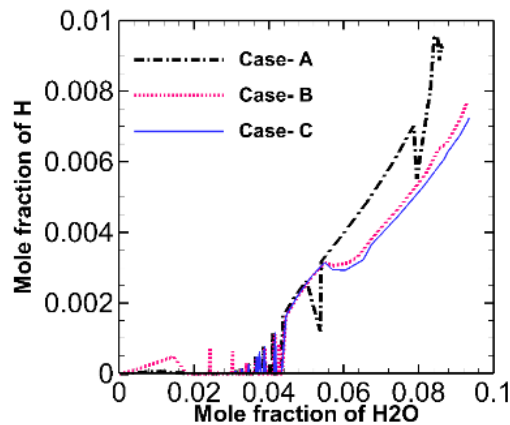


شکل ۱۳. نمودار توزیع کسر مولی بخار آب روی محور مرکزی هندسه

دمای محفظه که تأمین کننده انرژی فعال سازی واکنش ها می باشد، نرخ تشکیل مولکول های H نیز توأم با مولکول های H_2O افزایش می یابد. اختلاف بین شیب سه منحنی که نرخ تولید H نسبت به H_2O را نشان می دهد ناشی از اختلاف دمای تولید شده در سه حالت مفروض است. طبق شکل ۱۴، به دلیل شبه تعادلی بودن شعله در حالت اول، بیشینه دمایی آن



شکل ۱۲. مقایسه دمای متوسط جریان برحسب غلظت بخار آب روی محور مرکزی هندسه



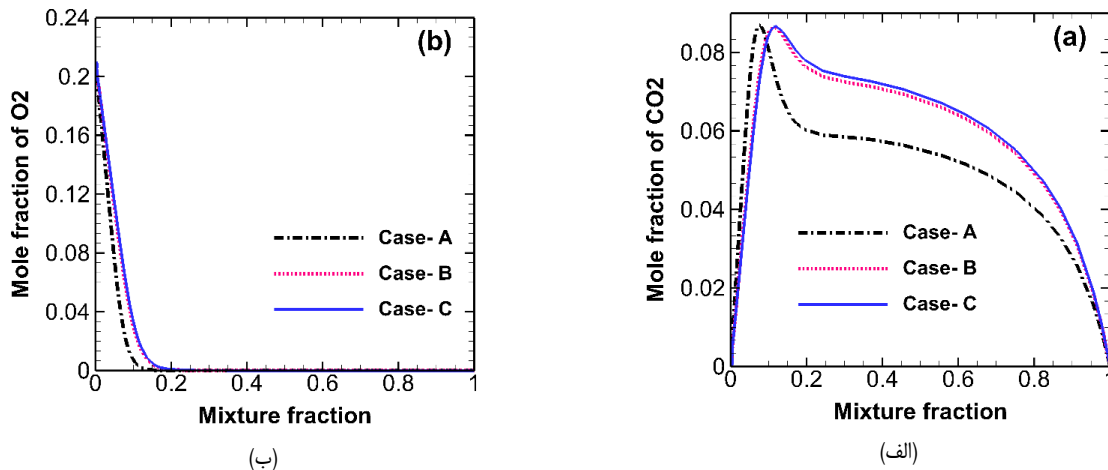
شکل ۱۴. کسر مولی گونه هیدروژن برحسب کسر مولی گونه بخار آب روی محور مرکزی هندسه

دمای محفظه و تکامل سوخت دارد. تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری، غلظت CO_2 در هر کسر مخلوط در حالت اول بیشترین و در حالت سوم کمترین مقدار را به خود اختصاص می دهد. به همین ترتیب مطابق شکل ۱۶ بیشترین و کمترین دمای محفظه تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری ۱۹۷۰ و ۱۸۴۶ کلوین می باشد که به ترتیب در حالت اول و سوم رخ می دهد؛ زیرا شعله در حالت اول با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آرام

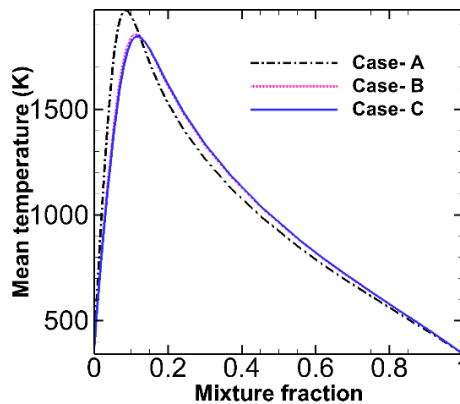
شکل ۱۵ کسر مولی گونه های O_2 و CO_2 را برحسب کسر مخلوط در بیشترین نرخ استهلاک اسکالر (شعله نزدیک به خاموشی) نشان می دهد. غلظت CO_2 رابطه مستقیم با دمای محفظه احتراق دارد؛ یعنی هرچه میزان غلظت CO_2 بیشتر باشد، قطعاً دمای محفظه بالاتر خواهد بود و احتراق سوخت کامل تر انجام شده است، البته تا دمایی که گونه CO_2 شکسته و به CO تبدیل نشود [۳۵]. در حالیکه میزان O_2 رابطه معکوس با

مستقل از قبل و یا بعد از مقدار استوکیومتری آن، غلظت O_2 در حالت اول کمتر از دو حالت دیگر است. این نشان از مصرف بیشتر اکسیژن در حالت اول نسبت به دو حالت دیگر است. با افزایش تعداد فلیملت‌های آرام در جبهه شعله، مطابق با کاهش دما (شکل ۶)، به مقدار بسیار کمی بر غلظت O_2 افزوده می‌شود.

کمتری نسبت به دیگر حالت‌ها شکل گرفته و بیشترین شباهت را به احتراق تعادلی و استوکیومتری داراست. در کسر مخلوط‌های بیشتر از مقدار استوکیومتری، به دلیل فزونی سوخت نسبت به هوای موجود، شعله دچار کمبود هوا و خفگی شده و ترتیب مقدار CO_2 در سه حالت معکوس می‌گردد. در هر کسر مخلوط،



شکل ۱۵. کسر مولی گاز کربن دی‌اکسید و اکسیژن برحسب کسر مخلوط روی محور مرکزی هندسه



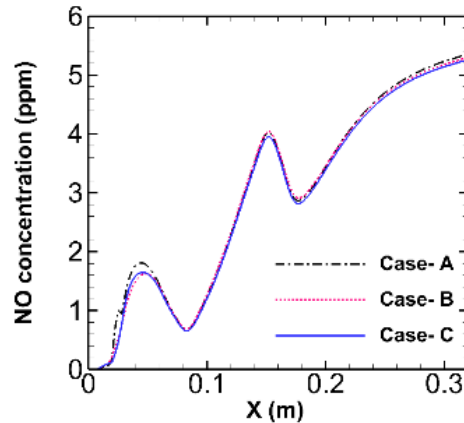
شکل ۱۶. دمای متوسط جریان برحسب کسر مخلوط روی فلیملت نهایی با بیشترین نرخ استهلاک اسکالر

جایی که با ورود هوا از سوراخ‌های اولیه، بر کسر جرمی اکسیژن افزوده می‌شود. با ورود هوا از فواره‌های اولیه و با توجه به شکل‌گیری شعله در ناحیه بین سوراخ‌های اولیه و رقیق‌سازی، احتراق سوخت کامل‌تر شده و مجدداً بر نرخ تولید گونه نیتروژن مونوکسید افزوده می‌شود. این اتفاق برای بعد از ورود فواره‌های رقیق‌سازی نیز رخ می‌دهد. ورود هوا از سوراخ‌های رقیق‌سازی سبب کاهش دما و رقیق‌سازی محصولات احتراق می‌گردد، اما ورود اکسیژن اضافی بر نرخ تولید نیتروژن مونوکسید نیز می‌افزاید. شکل ۱۸ توزیع کسر مولی گونه کربن مونوکسید در مقطع $X = 0.04m$ برای سه حالت مختلف فلیملت نشان می‌دهد.

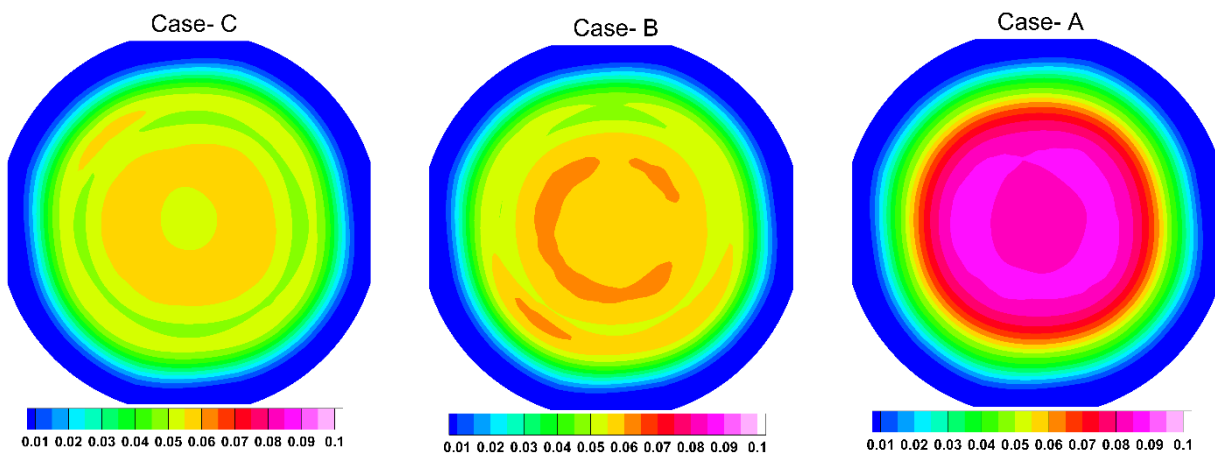
در شکل ۱۷ غلظت آلایندة نیتروژن مونوکسید روی خط مرکزی محفظه احتراق نشان داده شده است. در حالت اول آلایندة نیتروژن مونوکسید بیشتری نسبت به دو حالت دیگر تولید می‌شود؛ زیرا نزدیک به ۸۰ درصد کل آلایندة نیتروژن مونوکسید از نوع حرارتی است که شدیداً به دما وابسته است و مطابق با شکل ۶، بیشترین دما در حالت اول به‌دست آمده است. با شکل‌گیری شعله در ناحیه اولیه محفظه احتراق دما در این ناحیه افزایش یافته و به‌مرور بر غلظت گونه نیتروژن مونوکسید افزوده می‌شود. با مصرف اکسیژن موجود در ناحیه نزدیک به سوخت‌پاش، نرخ تولید گونه نیتروژن مونوکسید تا پیش از فواره‌های هوا افت می‌کند تا

گونه O_2 در حالت اول (شکل ۱۰) و همچنین بیشتر بودن دما در این حالت نسبت به دو حالت دیگر (شکل ۷)، در حالت اول سوخت بیشتری مصرف شده است، اما با توجه به عدم اکسیژن کافی در این مقطع، گونه کربن مونوکسید بیشتری تولید شده است.

بیشترین مقدار کسر مولی گونه کربن مونوکسید در حالت اول و کمترین مقدار آن در حالت سوم پیش‌بینی شده است. تشکیل گونه کربن مونوکسید ناشی از احتراق ناقص سوخت می‌باشد. در این مقطع هنوز گونه $C_{12}H_{23}$ در محفظه احتراق موجود است و سوخت کاملاً محترق نشده است. با توجه به کسر مولی کمتر



شکل ۱۷. مقایسه توزیع غلظت آلاینده نیتریک اکسید روی محور مرکزی هندسه



شکل ۱۸. توزیع کسر مولی گونه کربن مونوکسید در مقطع $X = 0.04m$

۶. نتیجه‌گیری

حاصل شده است. افزایش تعداد فلیمات‌های آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آرام، تأثیری بر پروفیل سرعت محوری ندارد. تعداد فلیمات‌ها و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر آرام فقط بر دمای جبهه شعله ($X = 0.04m$) اثر می‌گذارد و در سایر مقاطع اختلافی مشاهده نمی‌شود.

ماکزیمم دما در حالتی به دست می‌آید که شبیه‌سازی شعله با حداکثر نرخ استهلاک اسکالر کمتری انجام شده است (حالت اول) که باعث پیش‌بینی دمای شعله بیشتری در ناحیه اولیه شده است.

در مقاله حاضر، تأثیر نحوه شکل‌گیری شعله آشفته با استفاده از مدل فلیمات آرام بر مشخصه‌های احتراقی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز بررسی شده است. برای پیش‌بینی مشخصه‌های دینامیکی گاز و قطرات، دیدگاه اوپلری برای فاز پیوسته اتخاذ و دیدگاه لاگرانژی برای پیگیری حرکت و رفتار ترمودینامیکی فاز گسسته اعمال شده است. انتقال حرارت تابشی نیز به وسیله مدل تشعشی جهات مجزا در نظر گرفته شده است. مقاله حاضر در سه حالت فلیمات مختلف انجام شده که از مقایسه آنها نتایج زیر

کمترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. به همین ترتیب مطابق شکل ۱۶ بیشترین و کمترین دمای محفظه تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری نزدیک به ۱۹۷۰ و ۱۸۴۶ کلوین می‌باشد که به ترتیب در حالت اول و سوم رخ می‌دهد؛ زیرا شعله در حالت اول با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آرام کمتری نسبت به دیگر حالت‌ها شکل گرفته و بیشترین شباهت را به احتراق تعادلی و استوکیومتری داراست.

در هر کسر مخلوط، مستقل از قبل و یا بعد از مقدار استوکیومتری آن، غلظت O_2 در حالت اول کمتر از دو حالت دیگر است. این نشان از مصرف بیشتر اکسیژن در حالت اول نسبت به دو حالت دیگر است. با افزایش تعداد فلیملت‌های آرام در جبهه شعله، مطابق با کاهش دما، به مقدار بسیار کمی بر غلظت O_2 افزوده می‌شود.

در حالت اول، آلایندۀ نیتروژن مونوکسید بیشتری نسبت به دو حالت دیگر تولید می‌شود؛ زیرا نزدیک به ۸۰ درصد کل آلایندۀ نیتروژن مونوکسید از نوع حرارتی می‌باشد که شدیداً به دما وابسته است و بیشترین دما در حالت اول به دست آمده است.

در این حالت شعله تعادلی تر بوده و کشیدگی آن کمتر می‌باشد. علت این فزونی دما در حالت اول، بقا و تداوم شعله در نرخ استهلاک اسکالر پایین تر است. با افزایش تعداد فلیملت آرام، شعله تأثیر بیشتری از آشفته‌گی جریان گرفته و کشیدگی شعله بیشتر می‌گردد.

با افزایش میزان H_2O و افزایش دمای جریان محفظه که تأمین‌کننده انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها می‌باشد، نرخ تشکیل مولکول‌های H نیز توأم با مولکول‌های H_2O افزایش می‌یابد. به دلیل شبه‌تعادلی بودن شعله در حالت اول، بیشینۀ دمایی آن بیشتر از دو حالت دیگر است. به همین دلیل بیشترین میزان تشکیل مولکول‌های H_2O و H نیز در حالت اول مشاهده می‌شود. در حالت‌های دوم و سوم که شعله آرام با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر بیشتری تشکیل شده است، بیشینۀ دمایی پایین‌تر بوده و میزان H کمتری تحت تأثیر سازوکار شیمیایی تشکیل می‌شود.

تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری، غلظت دی اکسید کربن در هر کسر مخلوط در حالت اول بیشترین و در حالت سوم

۶. مآخذ

- [1] A. Tyliszczak, A. Boguslawski, and D. Nowak, Numerical simulations of combustion process in a gas turbine with a single and multi-point fuel injection system, *Applied Energy*, Vol. 174, pp. 153–165, 2016.
- [2] M. M. Torkzadeh, F. Bolourchifard, E. Amani, An investigation of air-swirl design criteria for gas turbine combustors through a multi-objective CFD optimization, *Fuel*, vol. 186, pp. 734–749, 2016.
- [3] G. Bulat, W. Jones, A. Marquis, NO and CO formation in an industrial gas-turbine combustion chamber using LES with the Eulerian sub-grid PDF method, *Combustion and Flame*, vol. 161, no. 7, pp. 1804-1825, 2014.
- [4] H. Moriai, R. Kurose, H. Watanabe, Y. Yano, F. Akamatsu, S. Komori, Large-Eddy Simulation of Turbulent Spray Combustion in a Subscale Aircraft Jet Engine Combustor-Predictions of NO and Soot Concentrations, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 135, no. 9, 2013.
- [5] H. Wen Ge, E. Gutheil, Simulation of a Turbulent Spray Flame using Coupled PDF Gas Phase and Spray Flamelet Modeling, *Combustion and Flame*, 153, pp. 173-185, 2008.
- [6] H. Zeinivand, F. Bazdidi-Tehrani, Influence of Stabilizer Jets on combustion Characteristics and NOx Emission in a Jet-Stabilized combustor, *Applied Energy*, vol. 92, pp. 348-360, 2012.
- [7] F. Bazdidi-Tehrani and H. Zeinivand, Presumed PDF Modeling of Reactive Two-phase Flow in a Three Dimensional Jet-Stabilized Model combustor, *Energy conversion and Management*, vol. 51, pp. 225-234, 2010.
- [8] C. D. Cameron, J. Brouwer, C. P. Wood and G. S. Samuelsen, A Detailed Characterization of the Velocity and Thermal Fields in a Model Can combustor with Wall Jet Injection, *Gas Turbine Power*, vol. 111, pp. 31-35, 1989.
- [9] C. D. Richards, G. S. Samuelsen, The Role of Primary Jets in the Dome Region Aerodynamics of a Model Can Combustor, *Gas Turbine Power*, vol. 114, pp. 20-26, 1992.

- [10] C. D. Cameron, J. Brouwer, G. S. Samuelsen, A Model Gas Turbine combustor with Wall Jets and Optical Access for Turbulent Mixing Fuel Effects and Spray, *Twenty-Second Symposium (International) on combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, PA (US), pp. 465-474, 1988.
- [11] ANSYS *FLUENT User's Manual*, Version 16.0, 2015.
- [12] S. S. Sazhin, Advanced Models of Fuel Droplet Heating and Evaporation, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, pp. 162-214, 2006.
- [13] A. Berlemont, M. S. Grancher, G. Gouesbet, Heat and Mass Transfer coupling between Vaporizing Droplets and Turbulence using a Lagrangian Approach, *Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 3023-3034, 1995.
- [14] J. H. Park, Y. Yoon, S. S. Hwang, Improved Tab-Model for Prediction of Spray Droplet Deformation and Breakup, *Atomization and Sprays*, vol. 12, pp. 387-402, 2002.
- [15] Flows S.I.A.f.M., Sommerfeld M., Best Practice Guidelines for Computational Fluid Dynamics of Dispersed Multi-Phase Flows, European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion (ERCOFTAC), 2008.
- [16] W. A. Sirignano, *Fluid dynamics and transport of droplets and sprays*, Cambridge University Press, 1999.
- [17] M. Alletto, M. Breuer, One-way, two-way and four-way coupled LES predictions of a particle-laden turbulent flow at high mass loading downstream of a confined bluff body, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 45, pp. 70-90, 2012.
- [18] S. Jo, H. Y. Kim, S. S. Yoon, Numerical Investigation on the Effects of Inlet Air Temperature on spray combustion in a Wall Jet Can Combustor Using the $k - \epsilon$ Turbulence Model, *Numerical Heat Transfer*, vol. 54, pp. 1101-1120, 2008.
- [19] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu, A new $k - \epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation, *Computers Fluids*, vol. 24, No. 3, pp. 227-238, 1995.
- [20] D. Veynante, L. Vervisch, *Turbulent Combustion Modeling*, *Energy Combustion*, vol. 28, pp. 193-266, 2002.
- [21] K. Claramunt, *Numerical simulation of non-premixed laminar and turbulent flames by means of flame let moodelin, approaches*, PhD Thesis, Department of Heat Engines, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [22] K. Kundu, P. Penko, S. Yang, Simplified Jet-A/Air Combustion Mechanisms for Calculation of NOx Emissions, *29th Joint Propulsion reference and Exhibit*, 1993.
- [23] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Third Edition, Academic Press, U. S, 2013.
- [24] J. Moss, S. Perera, C. Stewart, M. Makida, Radiation heat transfer in gas turbine combustors, *Proc 16th (Int'l) Symp on Airbreathing Engines*, Cleveland, OH, 2003.
- [25] T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman, Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model, *Heat Transfer*, vol. 104, pp. 602-608, 1982.
- [26] Y. B. Zeldovich, P. Y. Sadovnikov, D. A. Frank-Kamenetskii, Oxidation of Nitrogen in Combustion, *Publishing House of the Acad of Sciences of USSR*, 1947.
- [27] C. Westbrook, F. Dryer, Chemical Kinetic Modelling of Hydrocarbon Combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 10, pp. 1-57, 1984.
- [28] De Soete, Overall Reaction Rates of NO & N2 Formation from Fuel Nitrogen, *Symposium (international) on Combustion, 15*, Toshi Center Hall Tokyo, Japan, pp. 1093-1102, 1975.
- [29] A. H. Lefebvre, *Gas turbine combustion*. CRC press, 1998.
- [30] Z. Yin, I. Boxx, M. Stöhr, O. Lammel, W. Meier, Confinement-Induced Instabilities in a Jet-Stabilized Gas Turbine Model Combustor, *Turbulence and Combustion*, vol. 98, no. 1, pp. 217-235, 2017.
- [31] A. C. Benim, et al., Numerical investigation of turbulent swirling flames with validation in a gas turbine model combustor, *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 202-212, 2017.

- [32] M. A. Habib, et al., Stability maps of non-premixed methane flames in different oxidizing environments of a gas turbine model combustor, *Applied Energy*, vol. 189, pp. 177-186, 2017.
- [33] ANSYS ICEM CFD Tutorial Manual, Version 11.0, 2007.

- [34] L. Davidson, *Fluid Mechanics, Turbulent Flow and Turbulence Modeling*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2016.
- [35] B. K. Sharma, Air Pollution, UK, *Goel Publishing House*, Fourth Edition, 2005.

پی نوشت

-
1. NO_x
 2. airblaste
 3. transport probability density function
 4. eddy dissipation
 5. mixture fraction
 6. Cameron
 7. Sherwood number
 8. spalding mass transfer number
 9. Shih
 10. βPDF
 11. Smith
 12. Ansys Fluent
 13. central difference
 14. upwind
 15. Zeldovich
 16. Prompt NO_x
 17. De Soete
 18. ANSYS
 19. stoichiometric