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

فرزاد بازدیدی طهرانی'، سجاد میرزایی'، محمدصادق عابدینژاد"

۱ استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، تهران، bazdid@iust.ac.ir ۲ دانشجوی کارشناس ارشد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۳ دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷

چکیدہ

در این مقاله تأثیر نحوهٔ شکل گیری شعلهٔ آشفته بر مشخصههای احتراقی در یک محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز با استفاده از مدل فلیملت آرام بررسی شده است. تأثیر تعداد فليملتها و نرخ استهلاک اسکالر آرام آنها بر مشخصات جريان واکنشی همچون دما، نرخ استهلاک اسکالر آشفتگی شعله، غلظت گونهها و آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید در مقاطع مختلف محفظة احتراق از نتايج اين مقاله است. براي حل معادلات حاكم بر احتراق غیرپیش آمیختهٔ کروسین مایع در محفظهٔ احتراق مدل از شبکهبندی منظم حجم محدود استفاده شده است. در شبیهسازی عددی جریان دو فاز واکنشی این محفظهٔ احتراق، از مدل آشفتگی Realizable k − ɛ، مدل احتراقی فلیملت پایا و سازوکار شیمیایی ۲۶ واکنشی با ۱۷ گونهٔ 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 استهلاک اسکالر شعله بر سرعت جریان ناچیز است. با این حال این دو پارامتر بر دمای شعله تأثیر گذارند. در حالتی که شعله از تعداد فلیملت آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر بزرگتری تشکیل شده باشد، اختلاف کمتری بین دمای شبیهسازی و آزمایشگاهی مشاهده میشود. با کاهش تعداد فلیملتهای آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر از کشیدگی شعله کاسته و دما و آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید بیشتری پیش بینی می شود.

واژ گان کلیدی محفظهٔ احتراق مدل، فلیملت، سوخت مایع، جریان واکنشی، انتشار آلایندهها

تأثير تعداد فليملتها و نرخ استهلاك اسكالر آرام أنها بر مشخصههاى احتراقى در يك محفظه احتراق مدل توريين گاز

محفظة احتراق توربين گاز با سوخت مايع شامل مفاهيم پيچيدهاي چون جريان واکنشی، پاشش، جريان آشفته، جريان چندفاز، فرايندهاي انتقال حرارت جابهجايي و تابش بههمراه برهم كنش هر یک با دیگری میباشد. دستیابی به توزیع دما و گونههای واکنشی مطلوب در مدلسازی یک جریان واکنشی منوط به شکل گیری شعله منطبق با واقعیت است. تیلیژاک و همکاران (۲۰۱۶) محفظه احتراق یک توربین گاز صنعتی را با استفاده از دو مدل آشفتگی و Realizable k – ϵ و LES و Realizable k – ϵ واكنشى بهصورت عددى بررسى كردند [1]. بهمنظور مدلسازى احتراق، از مدل فليملت پايا با دو نوع سازوكار شيميايي مختلف استفاده شده است. یک سازوکار ۲۵ واکنشی با ۱۶ گونهٔ مستقل و متمرکز بر تشکیل دوده، دیگری سازوکار GRI – 2.11 با ۴۹ گونه و۲۷۷ واکنش که بر تشکیل نیتروژن مونوکسید تمرکز 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 بهینه سازی فرآیند طراحی، شعله غیر پیش آمیخته درون یک محفظه احتراق توربین گاز را شبیه سازی کردهاند. بدین منظور با در نظر گرفتن هزینههای محاسباتی، دو مدل فليملت پايا و $SST k - \omega$ برای شبيه سازی جريان احتراقی درون محفظه احتراق در نظر گرفته شدهاند [۲]. این مدل در یک بهينهسازي چندمتغيره شامل بازدهٔ احتراق، فاکتور الگوي جريان، 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 فلیملت به بررسی توليد آلايندهها در محفظهٔ احتراق توربين گاز پرداختند [۳]. همهٔ محاسبات در یک ساختار بلوکی شبکهبندی شده با تمام جزئیات (همهٔ 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'، سازوکار ناکس فوری بر سازوکار ناکس حرارتی و شکست ناکس غلبه دارد.

موریای و همکاران (۲۰۱۳) جریان پاششی - واکنشی درون محفظهٔ احتراق یک موتور جت مجهز به سوختپاش هوا انفجاری را با مقیاس نیم شبیه سازی نمودند [۴]. هدف از این مقاله پیش بینی مقدار تولید آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید و غلظت دوده در شرایط محفظهٔ 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 گونهٔ نیتروژن مونوکسید و انتشار دوده با اندازه گیری های انجام شده مقایسه شدهاند. نتایج آنها نشان میدهد که شبیه سازی عددی جریان با رهیافت LES و مدل فلیملت قادر به نمایش مشخصههای اسپری و احتراق، در آن مقياس از محفظة احتراق با يك هندسة پيچيده خواهد بود. ونجي و گوتهیل (۲۰۰۸) به بررسی پاشش متانول با استفاده از مدل فليملت و تابع چگالى احتمال فرضى بهبوديافته (BPDF) 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 فلیملت به همراه 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 دقیق تر محاسبه می شوند. زینی وند و بازدیدی طهرانی (۲۰۱۲) در یک محفظهٔ احتراق استوانهای اثر تعداد و محل سوراخهای فواره هوا را روی احتراق و آلایندهٔ ناکس بررسی کردند [8]. در این مقاله از مدل احتراقی نرخ محدود اضمحلال گردابه با سوخت کروسین، دیدگاه اویلر - لاگرانژ و مدل جهتهای مجزا برای جریان دوفاز و تابش استفاده شده است. نتایج آنها نشان میدهد که با افزایش فاصلهٔ محوری سوراخهای هوا از سوختپاش، آلایندهٔ ناکس کاهش پیدا میکند و بهطور معکوس توان حرارتی آن افزایش مییابد. همچنین، با افزایش تعداد سوراخهای هوا هر دو پارامتر توان حرارتی و آلایندهٔ ناکس افزایش می یابند. بازدیدی طهرانی و زینیوند (۲۰۱۰) طی مقالهای دیگر نشان دادند که مدل غیر پیش آمیختهٔ تعادلی بههمراه تابع چگالی احتمال فرضی بتا، توزیع دما را بهتر از مدل اضمحلال گردابه، مخصوصاً در نزدیکی دیوار پیشبینی میکند [۷]. گروه تحقیقاتی ساموئلسن و همکاران [۱۰–۸] از سال ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۳ م کلی معادلات در مختصات دکارتی، پایا و غیرقابل تراکم به صورت معادلهٔ ۱ است؛ به طوری که در این رابطه ψ بیانگر متغییرهای وابسته شامل جرم، ممنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اضمحلال انرژی آشفتگی، آنتالپی و کسر جرمی گونهها می باشد. پارامترهای $_{1\psi}^{2}$ و $_{2\psi}^{2}$ نیز به ترتیب عبارتهای چشمه و چاه برای فاز گازی و فاز قطرات می باشند.

$$\frac{\partial}{\partial X} (\rho U \psi) + \frac{\partial}{\partial Y} (\rho V \psi) + \frac{\partial}{\partial Z} (\rho W \psi)$$

$$= \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_{\Psi} \frac{\partial \psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma_{\Psi} \frac{\partial \psi}{\partial Y} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma_{\Psi} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) + S_{\psi_{1}} + S_{\psi_{2}}$$
(1)

۲-۲. فاز گسسته

جریان گاز بهعنوان فاز پیوسته است و بهصورت اویلری مدل می شود. در ناحیهٔ نزدیک به سوختپاش، به دلیل پاشش قطرات در محدودهٔ میکرومتر، کسر حجمی آنها کمتر از ۱۰ درصد کسر حجمی فاز گازی می شود. لذا در این ناحیه فاز گسسته ای ایجاد می شود که برای مدل کردن آن از دیدگاه لاگرانژی استفاده می شود. مسیر حرکت قطرات از معادلهٔ حرکت به دست می آید

 $\frac{d\vec{u}_p}{\partial t} = F_D \left(\vec{u} - \vec{u}_p \right) \tag{(7)}$

عبارت سمت چپ اینرسی یک قطره است که معرف مقاومت جرم برای تغییر سرعت و جهت آن است. عبارت سمت دوم معرف نیروی پسای 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 [۱۲–۱۱]. بنابراین، قطرات گسستهسازی نمی شوند و هزینهٔ محاسبات کاهش می یابد. نرخ تبخیر dm_p / dt از طریق رابطهٔ انتقال جرم اطراف قطره محاسبه می شود [۱۴–۱۲].

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_{\infty} D_{i,m} Sh_{AB} \times \ln(1+B_m)$$
(٣)

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_{\infty} D_{i,m} Sh_{AB} \times \ln(1+B_m)$$
(٣)

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{2} \frac$$

تحقيقات تجربى روى يك محفظة احتراق استوانهاي مدل انجام دادند. این گروه یکی از شناخته شده ترین مجموعه های تحقیقاتی طی دههٔ اخیر بوده است. کارهای آنها اغلب به سفارش صنایع معتبر و بينالمللي توربين گاز هوايي و صنعتي بوده است. طي اين سالها، محل و نحوهٔ 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 می تواند راه گشای دیگر مسائل احتراق و یاشش سوخت مایع باشد. در کارهای گذشته از مدلهای احتراقی مختلفى نظير اضمحلال گردابه، غيرپيش آميخته تعادلى و فليملت جهت شبیه سازی جریان واکنشی استفاده شده است. در هیچ کدام از کارهای پیشین به بررسی تأثیر تعداد فلیملتها و نرخ استهلاک اسکالر آرام آنها بر مدلسازی شعلهٔ جریان واکنشی سوخت کروسین در یک محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز پرداخته نشده است. در کار حاضر، تأثیر نحوهٔ مدلسازی فلیملت بر مشخصههای احتراقی در یک محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز بررسی شده است. فلیملت شعلهٔ 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 واكنشى دوفاز، كسر مخلوط و نرخ استهلاك اسكالر أشفتكى شعله، غلظت گونهها و آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید بررسی میشود. در این تحقیق از هندسهٔ محفظهٔ احتراق مدل کامرون⁵ (۱۹۸۹) استفاده شده است که همهٔ اجزای محفظههای احتراق اعم از چرخاننده، سوختپاش هوا انفجاری، سوراخهای اولیه و ثانویه را شامل می شود [۸]. مقالهٔ 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 مقايسة سرعت و دما در مقاطع مختلف محفظة 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 پيوسته

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

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 نقطهٔ جوش، معادله ای مبنی بر نرخ جوشش قطره در معادلات لحاظ می شود که در معادلهٔ ۴ ارائه شده است. در این معادله ρ_p , $C_{p,\infty}$ و k_∞ به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه گاز، چگالی قطره و ضریب انتقال حرارت رسانشی میباشند.

$$m_{p}C_{p}\frac{dT_{p}}{dt} = hA_{p}(T_{\infty} - T_{p}) - \frac{dm_{p}}{dt}h_{fg}$$

$$\frac{d(d_{p})}{dt} = \frac{4k_{\infty}}{\rho_{p}C_{p,\infty}d_{p}}(1 + 0.23\sqrt{\text{Re}_{d}})$$

$$\times \ln\left[1 + \frac{C_{p,\infty}(T_{\infty} - T_{p})}{h_{fg}}\right]$$
(*)

ل ۱۹ مر بر یا سرعت نسبی ۱۱۰ متر بر سوخت در دمای ۳۰۰ کلوین با سرعت نسبی ۱۱۰ متر بر محفظه پاشیده می شود. با توجه به اینکه کسر حجمی قطرات کوچکتر از ۲۰/۰۱ است، نیازی به محاسبهٔ 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 نحوهٔ مدلسازی فاز گسسته و معادلات حاکم بر آن در مراجع [۱۱] و [۱۵] ذکر شده است.

۲-۳. مدل آشفتگی

براساس تحقیقات گذشته [۶] و [۱۸]، در این مقاله از مدل Realizable $k - \varepsilon$ برای مدلسازی آشفتگی جریان در محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز استفاده می شود. معادلات انتقال در مدل $k - \varepsilon$ اعماران (۱۹۹۵) توسط شیح⁶ و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شده است [۱۹] که به صورت روابط ۸ و ۹ است. پارامتر η بیان کنندهٔ نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصهٔ میدان جریان، k انرژی جنبشی و z نرخ اضمحلال است.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + B - \rho \varepsilon$$
(5)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{\rho}}} \\ C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \\ S = \sqrt{2S_{i,j} S_{i,j}} \mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \end{cases}$$
(8)

۲-۴. مدل احتراقی

در مقالهٔ حاضر، از مدل احتراقی فلیملت پایا برای مدلسازی واکنشهای شیمیایی محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز استفاده شده است. جریان آشفته و جریان احتراقی غیرپیش آمیخته با استفاده از تابع چگالی احتمال فرضی بتا^۲ مرتبط می شوند. در مدل احتراقی فلیملت، شعله نفوذی آشفته به صورت یک مجموع آماری از شعلههای کوچک (فلیملتهای) آرام فرض می شود [۲۰]. معادلات فلیملت در قالب دو معادلهٔ دما و کسر جرمی اجزاء و انتقال داده شده به دستگاه کسر مخلوط، به صورت معادلهٔ ۲ و $C_{p,i}$ می شده به دستگاه کسر مخلوط، به صورت معادلهٔ ۲ و م می شود $c_{p,i}$ می آیند. در این معادلات Y_i نسبت جرمی گونهٔ i ام، $c_{p,i}$ می آیند. در این معادلات Y_i نسبت جرمی گونهٔ i ام، $c_{p,i}$ می آیند. در این معادلات Y_i نسبت جرمی گونهٔ i مرای در S_i می می آیند است. S_i نیز نرخ واکنش، H_i آنتالپی ویژهٔ گونهٔ i و پارامتر χ نرخ استهلاک اسکالر است.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i \tag{Y}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i H_i S_i + \frac{1}{2c_p} \rho \chi \left[\frac{\partial c_p}{\partial f} + \sum_i c_{p,i} \frac{\partial Y_i}{\partial f} \right] \frac{\partial T}{\partial f}$$
(A)

برای بهدست آوردن توزیع نرخ استهلاک اسکالر در شعله و معادلهٔ 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 بهصورت 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 غیرتعادلی نرخ استهلاک اسکالر بوده که بیانگر اثر میدان جریان روی ساختار فلیملت است.

www.SID.ir

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

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(r,s) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \phi(s,s') d\Omega'$$
(17)

۲-۶. حلگر محاسباتی

شبیهسازی جریان در بسته نرمافزاری انسیس فلوئنت ^{۱۲} ۱۶ [۱۱] انجام می شود. برای حل معادلهٔ بقای پیوستگی، انرژی، تکانه، معادلات مدلهای احتراقی، فاز گسسته و تابش گرمایی از روش حجم محدود در سه بعد استفاده می شود. معادلات حاکم بر جریان بهصورت ضمنی خطیسازی و بهصورت مرتبه دو گسستهسازی می شوند. معیار همگرایی حل معادلات ^{۲۰} ۱۰ در نظر گرفته می شود. جملات نفوذی در معادلات، با استفاده از روش اختلاف مرکزی^{۱۳} و عبارات جابهجایی بهصورت مرتبه دو بالادست^{۱۴} گسسته می شوند. الگوریتم سیمپل C [۱۱] عبارت فشار و سرعت را به هم متصل میکند. برای پیش بینی مشخصه های دینامیکی گاز و قطرات، دیدگاه اویلری برای فاز پیوسته اتخاذ می شود و دیدگاه لاگرانژی برای پیگیری حرکت و رفتار ترمودینامیکی فاز گسسته اعمال می شود. همچنین برای محاسبهٔ گرمای ویژه گونهها از توابع چندجملهای وابسته به دما استفاده می شود. در کار حاضر، دو نوع NO_x حرارتی و فوری محاسبه می شوند. برای محاسبة NO_x حرارتي از سازوكار توسعه يافتهٔ زلدوويچ 16 [۲۶] و برای محاسبهٔ رادیکالهای O و OH، از فرض تعادل جزئی استفاده می گردد [۲۷]. نرخ تشکیل NO_x فوری $^{\prime \prime}$ ، از رابطهٔ ارائهشده توسط دسویت^{۱۷} [۲۸] بهدست میآید. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص نحوهٔ محاسبهٔ NO_x ، مراجع [۶]، [11] و [٢٧] مفيد خواهند بود.

۳. هندسه و شرایط مرزی

محفظههای احتراق توربین گاز طی چهل سال اخیر توسعه پیوستهای در تکامل ساختار اصلی محفظه داشتهاند. محفظههای معادلات ۲ 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:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{\rho} \overline{f} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho} \overline{u_j} \overline{f} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{l_t} \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_j} \right]$$
(1.)

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

نرخ استهلاک اسکالر متوسط با در نظرگیری آثار آشفتگی جریان براساس روابط ۱۲ محاسبه می شود [۱۱]. در این روابط kانرژی جنبشی آشفته، ε استهلاک آشفته و ضریب C_{χ} معمولاً برابر با ۲ درنظر گرفته می شود [۲۱].

$$\overline{\chi}_{st} = \overline{\chi}, \overline{\chi} = c_{\chi} \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2}$$
(17)

در این مقاله شبیهسازی ها طی سه حالت مختلف (مطابق جدول ۱) برای سوخت کروسین با سازو کار 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 فلیملت 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 فلیملتهای آرام شعله با ۹ فلیملت آرام تشکیل شده و در حالت سوم، شبیهسازی شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شعله با ۸ فلیملت آرام انجام شده است. با افزایش تعداد فلیملت شکل می گیرد. در عین حال، افزایش تعداد فلیملت آرام، سبب

۲-۵. مدلسازی انتقال حرارت تابش

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

احتراق کنونی به طور کلی به سه دستهٔ محفظههای استوانهای شکل، استوانه – حلقوی و حلقوی تقسیم میشوند [۲۹]. استفاده از محفظهٔ احتراق مدل استوانهای برای بررسی جریان واکنشی مرسوم است و در سالهای اخیر از این نوع محفظهٔ احتراق مدل بهوفور در کارهای پژوهشی استفاده شده است [۳۳–۷،۳۰ –۶]. در مقالهٔ حاضر، از هندسهٔ محفظهٔ احتراق استوانهای مدل کامرون و همکاران [۸] جهت بررسی مشخصههای جریان و انتقال حرارت استفاده شده است. دلیل انتخاب این محفظهٔ احتراق مدل جهت شبیه سازی های عددی، وجود اطلاعات کافی درخصوص جزئیات هندسهٔ محفظه، نوع و هندسه سوخت پاش، جزئیات سوئیرلر و

مشخصههای جریان واکنشی از قبیل سرعت متوسط جریان سرد، سرعت و دمای متوسط جریان واکنشی، قطر متوسط ساتر، سرعت محوری قطرات پاشش سوخت و غلظت گونههای CO₂ ، CO و NO بوده است. هدف نویسندگان از انتخاب این محفظه احتراق مدل، پدیدهشناسی و ساختارشناسی جریان آشفته اسپری واکنشی و تعمیم آن به محفظههای احتراق صنعتی میباشد. همچنین، با توجه به اینکه استفاده از رهیافت شبیهسازی گردابههای بزرگ جهت مدلسازی آشفتگی جریان در برنامهٔ آتی نویسندگان قرار دارد، لذا استفاده از یک هندسهٔ واقعی محفظه احتراق توربین گاز هزینهٔ محاسباتی بسیار بالایی خواهد داشت.

جدول ۱. اطلاعات وضعیت فلیملت در حالتهای مورد مطالعه

حالتهای مورد مطالعه	تعداد فليملت	ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر در فلیملت آرام
Case – A	٩	٩
Case - B	٩	١٣
Case-C	۲۸	١٣

شکل ۱ طرحوارهٔ این هندسه را نشان میدهد که از یک هشتضلعی به طول ۳۲۰ و قطر ۸۰ میلیمتر تشکیل شده است. چهار فوارهٔ اولیهٔ عمود بر هم به قطر ۷/۵ میلیمتر در فاصلهٔ ۸۰ میلیمتری از صفحهٔ ورودی محفظهٔ احتراق قرار دارند و یک ردیف چهارتایی سوراخ دیگر نیز به قطر ۹ میلیمتر در فاصلهٔ ۱۶۰ میلیمتری از ورودی محفظهٔ احتراق جهت بهبود فرایند احتراق تعبیه شده است.



شكل ۱. طرحوارهٔ محفظهٔ احتراق مدل (ابعاد میلیمتر) [۸]

سوئیرلر مورد استفاده در این محفظه از نوع محوری است که پرههای آن زاویهٔ ۶۰ درجه با هم دارند. هوای ورودی به محفظهٔ احتراق ۱۶۳ کیلوگرم بر ساعت بوده که در دمای ۳۷۳ کلوین و فشار ۱ اتمسفر، ۲۵ درصد آن به سوئیرلر و از باقیمانده آن، ۳۵

درصد سهم فوارههای اولیه و ۴۰ درصد مابقی صرف رقیق سازی جریان درون محفظه می شود. شرایط مرزی در ورودی و خروجی دامنهٔ محاسباتی بهترتیب جریان جرمی ورودی و فشار خروجی لحاظ شدهاند. در مسئلهٔ حاضر شرایط مرزی گرمایی و سرعت دیوار بهترتیب بی دررو و عدم لغزش فرض شدهاند.

۴. شبکهبندی هندسه

^{۱۸} برای شبکهبندی محفظه احتراق، از بستهٔ نرمافزاری انسیس^{۱۸} [۳۳] استفاده شده است. شبکهٔ ایجادشده از نوع سازمان یافته بوده و با توجه به اینکه در نواحی اولیهٔ محفظهٔ احتراق، پدیدهٔ احتراق رخ میدهد و فوارههای اولیه و رقیق سازی نیز تأثیر زیادی بر جریان می گذارند، در این نواحی از سلولهای متراکم برای شبکهبندی استفاده شده است. جهت رسیدن به نتایج پایدار و مستقل از شبکه، از چهار سایز شبکهٔ مختلف برای شبیه سازی مستقل از شبکه، از چهار سایز شبکهٔ مختلف برای شبیه سازی هزان درون محفظه استفاده شده است که شبکههای "الف"، جریان درون محفظه استفاده شده است که شبکههای "الف"، هزار و یک میلیون و سیصد هزار سلول محاسباتی هستند. شکل ۲ توزیع سرعت محوری را در این چهار شبکه نشان میدهد. براساس شکل ۲، با توجه به دقت مناسب و هزینهٔ کمتر شبکهٔ

"ج" نسبت به سه شبکه دیگر، از شبکهٔ "ج" جهت شبیهسازی نهایی جریان درون محفظه استفاده می شود. شکل (۳–الف) شبکهٔ نهایی مورد استفاده برای شبیه سازی ها را نشان می دهد. همان طور که در شکل (۳–الف) مشاهده می شود، در نواحی که گرادیان سرعت و غلظت دارای شیب تند بوده، بر تراکم سلول ها اضافه شده است. با توجه به استفاده از مدل آشفتهی شده است. با توجه به استفاده از مدل آشفته، تراکم سلول های نزدیک به دیواره ها و فاصله اولین سلول بر حسب واحد دیواره به گونه ای انتخاب شده است که Y در محدودهٔ ۳۰ برای

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

۵. بحث و نتایج

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



شکل ۳. نمایی از الف) هندسهٔ محفظهٔ احتراق WJCC شبکهبندی شده، ب) تغییرات ۲⁺ روی دیواره در طول محفظهٔ احتراق مدل

 $X = 0.02 \, m$ ساختار سرعت متأثر از سرعت هوای قبل از جتهای رقیق سازی و سرعت سوخت نمی باشد و جریان به سمت یکنواختی پیش می رود. به طور میانگین اختلاف توزیع سرعت پیش بینی شده با داده های آزمایشگاهی نزدیک به ۱۷ در صد می باشد. در شکل ۵ توزیع دمای متوسط در سه مقطع مختلف به نمایش گذاشته شده است. با توجه به مقادیر انحراف معیار ارائه شده، تعداد فلیملت ها 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 محفظهٔ احتراق ناشی از قرارگیری ناحیهٔ بازگردش در ناحیهٔ اولیهٔ محفظهٔ احتراق و برهم کنش برخورد سوخت با هوای سوئیرلر و جتهای اولیه است. در مقطع m 0.1 *m X* بهدلیل قرارگیری بین جتهای اولیه و رقیق سازی، بر سرعت جریان افزوده می شود. در مقطع

دمای جبههٔ شعله X = 0.04m اثر میگذارد و در سایر مقاطع اختلافی مشاهده نمی شود؛ زیرا محل تشکیل شعله در ابتدای محفظهٔ احتراق (پیش از فوارههای اولیه) می باشد. اختلاف دمایی که در پروفیل های دمایی بین نتایج شبیه سازی و داده های تجربی مشاهده می شود می تواند ناشی از در نظر نگرفتن انتقال حرارت جابجایی باشد؛ زیرا در اطراف بدنهٔ محفظهٔ احتراق به گفتهٔ کامرون و همکاران چهار مجرای ورودی آب برای خنک کاری بدنه وجود داشته است که به دلیل نبود اطلاعات کافی از آن صرف نظر شده است. همچنین بنا به گفتهٔ کامرون و همکاران [۸]، در

نازل سوخت یک نامتقارنی وجود داشته است که در شکل گیری توزیع دما ناهمگون در نتایج تجربی تأثیر گذاشته است.

در شکل ۶ دمای متوسط جریان روی محور مرکزی محفظهٔ احتراق نمایش داده شده است. هر سه منحنی دارای دو قله و دو قعر میباشند. ماکزیمم دمای اولیه در فاصلهی تقریبی ۰/۰۳ 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.



شكل ۴. مقايسة توزيع مؤلفة محوري سرعت در راستاي شعاع با نتايج تجربي [٨]؛ الف) X = 0.04m ، ب) X = 0.18m ، ج) X = 0.18m

دمای کاربردی برای توربین می ساند. طبق شکل ۶، اثر تعداد فلیملت بر توزیع دما روی محور مرکزی محفظهٔ بسیار ناچیز است. با این حال، پروفیل دمای حالت سوم، کمی پایین تر از پروفیل دما در دو حالت دیگر است. دلیل آن را می توان 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 نقطهٔ ماکزیمم دمایی شکل می گیرد. دومین مینیمم دما تحت تأثیر فوارههای رقیق سازی هوا ایجاد می شود. ورود هوا از طریق فوارههای رقیق سازی، دمای گازهای خروجی از محفظه را کاهش داده و به

در شکل ۷ توزیع دمای متوسط جریان در مقطع X = 0.04m متر نشان داده می شود. مطابق شکل ۷ اثر تعداد فلیملت آرام و حداکثر نرخ استهلاک اسکالر آرام شعله بر دمای جریان در ناحیهٔ اولیه و نقطهٔ ماکزیمم دما محسوس است. ماکزیمم دما در حالتی بهدست می آید که شبیه سازی شعله با حداکثر نرخ استهلاک

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



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

شکل ۸ بیانگر تغییرات نرخ استهلاک اسکالر شعله تحت تأثیر آشفتگی جریان، بر روی محور مرکزی محفظه احتراق میباشد. ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آشفته در حالت سوم بهدست میآید. با افزایش تعداد فلیملت آرام، شعله تحت تأثیر بیشتر از آشفتگی 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 محفظهٔ احتراق مشاهده نمی شود. بیشترین نرخ استهلاک اسکالر در حالت دوم و نزدیک سوختپاش

 $(X \cong 0.04m)$ ، محل شروع واکنش های شیمیایی احتراق و محل شکل گیری شعله رخ می دهد. دلیل این پدیده زیاد بودن نرخ استهلاک اسکالر آرام توأم با کم بودن تعداد فلیملت ها 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 ناحیهٔ شکل گیری 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

کاسته میشود. مطابق شکل ۹، با افزایش تعداد فلیملت آرام، کسر مخلوط به مقدار ناچیزی افزایش مییابد. در حالیکه با افزایش

بیشینه نرخ استهلاک اسکالر آرام، کسر مخلوط در ناحیه شکل گیری شعله کاهش می یابد.



شکل ۹. توزیع کسر مخلوط روی محور مرکزی هندسه

کاملاً صرف احتراق سوخت شده باشد. در ادامه با توجه به ورود هوا از فوارههای اولیه و رقیق سازی و همچنین بازگردش جریان هوا به ناحیهٔ اولیهٔ محفظهٔ احتراق، مجدداً مقدار اکسیژن سیر شکل ۸ نرخ استهلاک اسکالر آشفته شعله روی محور مرکزی هندسه

در شکل ۱۰ تغییرات کسر مولی گونهٔ 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

صعودی میگیرد. در حالت اول مصرف سوخت و اکسیژن نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است؛ زیرا در این حالت شعله با تعداد فلیملت آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر کمتری شبیهسازی شده و به شعلهٔ تعادلی نزدیکتر است. در شعلهٔ تعادلی واکنشهای شیمیایی به واکنشهای استوکیومتری^{۹۱} نزدیکتر است. مقدار دمای ماکزیمم در شکل ۶ معرف این موضوع است. لذا با افزایش ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر و تعداد فلیملتهای آرام در جبههٔ شعله، بر کسر مولی اکسیژن افزوده می شود.

در شکل ۱۱ تغییرات دمای متوسط جریان بر کسر مولی گونهٔ اکسیژن روی خط مرکزی محفظه نشان داده شده است. در این شکل، دادهها بهترتیب افزایش کسر مولی اکسیژن در مختصات محوری نامتوالی مرتب شدهاند. بخشهایی از منحنیهای موجود که بهصورت خطوط عمودی هستند، بیانگر نقاطی روی محور مرکزی محفظه احتراق میباشند که کسر مولی اکسیژن یکسانی دارند؛ اما دما در آنها متفاوت است. نواحی با غلظت O_2 زیاد نمایانگر ورودی هوا و بخشهای عاری از واکنشهای احتراقی هستند. در نتیجه دما در این نواحی کم است. نواحی با غلظت O_2 کم نشاندهندهٔ محل زنجیرهٔ واکنشهای احتراقی است که هستند. در آنجا مصرف میشود. این نواحی محل تشکیل شعله اکسیژن در آنجا مصرف میشود. این نواحی محل تشکیل شعله مصرف شده و به دمای بالاتری میرسد. بهعبارت دیگر نرخ



در شکل ۱۴ به مقایسهٔ میزان کسر مولی گونههای H و H_2O روی خط مرکزی محفظه پرداخته شده است. پیش از کسر مولی ۰/۰۴۲ برای بخار آب، مقدار H تولیدشده ناچیز است.

كه دما ماكزيمم است؛ زيرا بخار آب اصلى ترين محصول احتراق کامل است. با توجه به اینکه در حالت اول ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعله آرام از مقدار کمتری نسبت به دیگر حالتها برخوردار است، شعلهٔ شبیهسازی شده بیشترین شباهت به احتراق کامل را دارد. در این حالت واکنشها شبیه به واکنش استوکیومتری بوده و به دمایی نزدیک به دمای آدیاباتیک شعله میرسد. در نتیجه بیشترین بخار آب نسبت به دو حالت دیگر تولید میگردد. این در حالی است که در حالتهای دوم و سوم بهدلیل افزایش نرخ استهلاک اسکالر، دما و میزان تولید بخار آب در ناحیهٔ تشکیل شعله کاهش پیدا میکند. بهدلیل دمای بالای حاصل شده در حالت اول نسبت به دو حالت دیگر، واکنش های بازگشتی و تعادلی شکل گرفته و از غلظت محصولات احتراق نظیر گونههایی از قبيل CO_2 و H_2O در ناحيهٔ شعله كاسته می شود. با توجه به اینکه سه حالت مفروض در کار حاضر به شبیهسازی جبههی شعله مربوط میباشد، بیشترین تفاوت بین حالتها، در نزدیکی شعله مشاهده می شود. شکل ۱۳ کسر مولی بخار آب روی خط مرکزی محفظه را نشان میدهد. در انتهای محفظه مقادیر غلظتها به یک مقدار ثابت و تعادلی رسیده و تفاوتی در بین حالتها دیده

نسبت به دو حالت دیگر سریعتر است. شکل ۱۲ تغییرات دمای

محفظة احتراق بر كسر مولى بخار آب روى خط مركزى محفظه

را نشان میدهد. بیشترین غلظت H_2O جایی مشاهده می شود



افزایش کسر مولی گونه H_2O که یکی از محصولات اصلی احتراق است نشانگر فزونی دمای محفظهٔ احتراق است. تحت تأثیر سازوکار شیمیایی استفاده شده، با افزایش میزان H_2O و افزایش

دمای محفظه که تأمین کنندهٔ انرژی فعال سازی واکنش ها می باشد، نرخ تشکیل مولکول های H نیز توأم با مولکول های H₂O افزایش می یابد. اختلاف بین شیب سه منحنی که نرخ تولید H نسبت به H₂O را نشان می دهد ناشی از اختلاف دمای تولیدشده در سه حالت مفروض است. طبق شکل ۱۴، به دلیل شبه تعادلی بودن شعله در حالت اول، بیشینهٔ دمایی آن

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



دمای محفظه و تکامل سوخت دارد. تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری، غلظت CO₂ در هر کسر مخلوط در حالت اول بیشترین و در حالت سوم کمترین مقدار را به خود اختصاص میدهد. بههمین 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 گونههای CO_2 و O_2 را برحسب کسر مخلوط در بیشترین نرخ استهلاک اسکالر (شعله نزدیک به خاموشی) نشان میدهد. غلظت CO_2 رابطهٔ مستقیم با دمای محفظهٔ 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 [۵۵]. در حالیکه میزان O_2 رابطهٔ معکوس با

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 CO₂ در سه حالت معکوس می گردد. 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 (شکل \mathcal{P}_3)، به مقدار بسیار کمی بر غلظت O_2 افزوده می شود.



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 می شود. با ورود هوا از فوارههای اولیه و با توجه به شکل گیری شعله در ناحیه بین سوراخهای اولیه و رقیق سازی، احتراق سوخت کامل تر شده و مجدداً بر نرخ تولید گونهٔ نیتروژن مونوکسید افزوده می شود. این اتفاق برای بعد از ورود فوارههای رقیق سازی نیز رخ می دهد. ورود هوا از سوراخهای رقیق سازی سبب کاهش دما و رقیق سازی محصولات احتراق می گردد، اما ورود اکسیژن اضافی بر نرخ تولید نیتروژن مونوکسید نیز می افزاید. شکل ۱۸ توزیع کسر مولی گونهٔ کربن مونوکسید در مقطع شکل ۱۸ توزیع کسر مولی گونهٔ کربن مونوکسید در مقطع در شکل ۱۷ غلظت آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید روی خط مرکزی محفظهٔ احتراق نشان داده شده است. در حالت اول آلایندهٔ نیتروژن مونوکسید بیشتری نسبت به دو حالت دیگر تولید میشود؛ زیرا نزدیک به ۸۰ درصد کل آلایندهٔ 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 شکل گیری شعله در ناحیهٔ اولیهٔ محفظهٔ احتراق دما در این ناحیه افزایش یافته و بهمرور بر غلظت گونهٔ نیتروژن مونوکسید افزوده میشود. با مصرف اکسیژن موجود در ناحیهٔ نزدیک به سوختپاش، نرخ تولید گونهٔ نیتروژن مونوکسید تا پیش از فوارههای هوا افت میکند تا

بیشترین مقدار کسر مولی گونهٔ کربن مونوکسید در حالت اول و کمترین مقدار آن در حالت سوم پیش بینی شده است. تشکیل گونه کربن مونوکسید ناشی از احتراق ناقص سوخت می باشد. در این مقطع هنوز گونهٔ C₁₂H₂₃ در محفظهٔ احتراق موجود است و سوخت کاملاً محترق نشده است. با توجه به کسر مولی کمتر

گونهٔ O₂ 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، گونهٔ کربن مونوکسید بیشتری تولید شده است.





۶. نتیجه گیری

تأثير تعداد فليملتها و نرخ استهلاك اسكالر آرام أنها بر مشخصههاى احتراقى در يك محفظه احتراق مدل توربين گاز

در مقالهٔ حاضر، تأثیر نحوهٔ شکل گیری شعلهٔ آشفته با استفاده از مدل فلیملت آرام بر مشخصههای احتراقی در یک محفظهٔ احتراق مدل توربین گاز بررسی شده است. برای پیش بینی مشخصههای دینامیکی گاز و قطرات، دیدگاه اویلری برای فاز پیوسته اتخاذ و دیدگاه لاگرانژی برای پیگیری حرکت و رفتار ترمودینامیکی فاز گسسته اعمال شده است. انتقال حرارت تابشی نیز بهوسیلهٔ مدل تشعشعی جهات مجزا در نظر گرفته شده است. مقالهٔ حاضر در سه حالت فلیملت مختلف انجام شده که از مقایسه آنها نتایج زیر

حاصل شده است. افزایش تعداد فلیملتهای آرام و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر شعلهٔ آرام، تأثیری بر پروفیل سرعت محوری ندارد. تعداد فلیملتها و ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر آرام فقط بر دمای جبههٔ شعله (X = 0.04 m) اثر میگذارد و در سایر مقاطع اختلافی مشاهده نمی شود.

ماکزیمم دما در حالتی به دست می آید که شبیه سازی شعله با حداکثر نرخ استهلاک اسکالر کمتری انجام شده است (حالت اول) که باعث پیش بینی دمای شعلهٔ بیشتری در ناحیهٔ 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 پایین تر است. با افزایش تعداد فلیملت آرام، شعلهٔ تأثیر بیشتری از آشفتگی جریان گرفته و کشیدگی شعله بیشتر میگردد.

با افزایش میزان H_2O و افزایش دمای جریان محفظه که تأمین کننده انرژی فعال سازی واکنش ها میباشد، نرخ تشکیل مولکول های H نیز توأم با مولکول های O_2H افزایش مییابد. بهدلیل شبه تعادلی بودن شعله در حالت اول، بیشینهٔ دمایی آن بیشتر از دو حالت دیگر است. به همین دلیل بیشترین میزان تشکیل مولکول های O_2H و H نیز در حالت اول مشاهده میشود. در حالت های دوم و سوم که شعلهٔ آرام با ماکزیمم نرخ استهلاک اسکالر بیشتری تشکیل شده است، بیشینهٔ دمایی پایین تر بوده و میزان H کمتری تحت تأثیر سازوکار شیمیایی تشکیل می شود. تا قبل از کسر مخلوط استوکیومتری، غلظت دی اکسید کربندر هر کسر مخلوط در حالت اول بیشترین و در حالت سوم

ج. مأخذ

- [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.

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 شعلهٔ آرام کمتری نسبت به دیگر حالت ها 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 جبههٔ شعله، مطابق با کاهش دما، به مقدار بسیار کمی بر غلظت O_2

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

- 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.

- [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 particleladen 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 $k - \varepsilon$ 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-ɛ 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 nonpremixed 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 mbustion 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. Sadovinikov, 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 nonpremixed 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.

پىنوشت

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	

فرزاد بازديدى طهراني، سجاد ميرزايي، محمد صادق عابدىنژاد