

پیش‌بینی حد خاموشی کم سوخت یک شعله آشفته پایدار شده به کمک جریان‌های بازگردشی

محمد شهسواری

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
m.shahsavari@turbotec-co.com

محمدعلی سرودی

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
m.soroudi@turbotec-co.com

یوسف باقری

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
y.bagheri@turbotec-co.com

چکیده

در این مقاله، هدف، پیش‌بینی حد خاموشی کم سوخت شعله‌های آشفته پایدار شده به وسیله جریان‌های بازگردشی است. برای این منظور، از مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی میدان جریان آشفته استفاده شده است. همچنین میدان احتراقی آشفته با استفاده از مدل احتراقی EDC به کمک یک واکنش شیمیایی کلی دومرحله‌ای شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج عددی حاضر و نتایج تجربی ارائه شده در [۲۲] نشان می‌دهد که اگرچه که روش عددی به کار رفته توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار جریان دارد، اما توانایی پیش‌بینی حد خاموشی شعله را ندارد. در راستای یافتن ابزاری برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله، رفتار پارامترهای مختلف میدان جریان و احتراق در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که دمای میدان جریان در انتهای ناحیه بازگردشی مرکزی یکی از محدود پارامترهایی است که با کاهش نسبت هم‌ارزی به صورت خطی کاهش می‌یابد. با برون‌یابی از این رفتار خطی، نسبت هم‌ارزی‌ای را که در آن، دمای جریان سیال در انتهای ناحیه بازگردشی برابر با دمای هوای ورودی به محفظه شود، به عنوان نسبت هم‌ارزی خاموشی شعله در نظر گرفته شده است. نتایج این برون‌یابی، نسبت هم‌ارزی خاموشی شعله را با خطای کمتر از ۱۰٪ نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌نماید. در پایان از معیار توسعه داده شده برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در یک محفظه احتراق صنعتی استفاده شده است.

کلیدواژگان: پایداری شعله، دمش شعله، مدل احتراقی EDC

مقدمه

پیشرفت تکنولوژی در حوزه احتراق و وجود قیود زیست‌محیطی بسیار سخت گیرانه در سال‌های گذشته باعث شده تا بخش اعظمی از صنایع مختلف از جمله صنایع وابسته به توربین‌های گازی، درصدد ایجاد تغییرات در واحدهای صنعتی خود برآیند. یکی از این تغییرات اساسی، استفاده از شعله‌های پیش آمیخته و یا نیمه پیش آمیخته به جای شعله‌های غیر پیش آمیخته است [۱]. امروزه برای پایداری این شعله‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. بی‌شک اصلی‌ترین روش پایداری مطرح شده تا به امروز، ایجاد ناحیه بازگردشی در جریان است که می‌تواند در اثر وجود پیچش و یا در اثر حضور یک پله و یا مانع در جریان به وجود آید [۲]. این جریان‌های بازگردشی باعث می‌شوند تا

محصولات احتراقی با دمای بالا مرتب در داخل مخلوط سوخت و هوا گردش کنند و موجب مشتعل کردن آن شوند [۳ و ۴].

مشکل اصلی شعله‌های پیش آمیخته و یا نیمه پیش آمیخته پایین بودن پایداری آن‌ها در مقابل شعله‌های غیر پیش آمیخته است [۱]. در این شعله‌ها دو حد از ناپایداری وجود دارد، حد دمش و حد پشش شعله [۵ و ۶]. شعله زمانی در محفظه احتراق دمش می‌کند که سرعت شعله آشفته کمتر از سرعت جریان محلی باشد [۵ و ۶]. در طرف مقابل، شعله زمانی پشش می‌کند که سرعت شعله آشفته بیش از سرعت جریان محلی باشد [۵ و ۶]. بروز هر یک از این پدیده‌ها در محفظه احتراق یک موتور توربینی بسیار خطرناک است. تا جایی که می‌تواند باعث بروز صدمات شدید به مجموعه انژکتورها، محفظه احتراق و حتی سیستم‌های پایین‌دستی مانند توربین شود. به طور مثال، بروز پشش شعله می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های حرارتی شدید در صفحه انژکتور و یا مشعل‌ها می‌شود. همچنین، در طول فرایند دمش شعله در محفظه، به علت بروز نوسانات فشار با دامنه بالا احتمال بروز ناپایداری احتراق افزایش می‌یابد که خود می‌تواند منجر به ایجاد صدمات جدی در محفظه شود [۷]. بنابراین پیش‌بینی حدود پایداری فوق یکی از اصلی‌ترین ملازمات طراحی یک محفظه احتراق توربینی است. این مقاله به صورت خاص، دمش شعله در شرایط کم سوخت را مورد بررسی قرار می‌دهد.

به طور کلی، دمش شعله در اثر عوامل مختلفی در محفظه به وجود می‌آید. وجود این پدیده نیز پیامدها و نشانه‌های مختلفی دارد. یکی از عوامل اصلی در ایجاد دمش شعله وجود اتلافات انرژی و کرنش‌های بالا در شعله است که به نوبه خود باعث خاموشی موضعی شعله می‌شود [۸]. اگر انرژی مورد نیاز برای مشتعل کردن مخلوط سوخت و هوا از انرژی تأمین شده در ناحیه بازگردشی جریان بیشتر باشد، شعله دمش می‌کند [۹]. از دیگر عوامل ایجاد دمش و خاموشی شعله، وجود ساختارهای درشت در جریان آشفته است که باعث می‌شود که بخش‌های از شعله به شدت تغییر کرده و احتمالاً خاموش شوند. همچنین مکش جریان ثانویه توسط جریان اصلی^۱ می‌تواند یکی از عوامل اصلی در بروز خاموشی شعله باشد [۱۰]. هر چند که میزان اثر این عامل نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. در برخی کاربردها نیز دمش شعله در اثر پایین بودن زمان ماند محصولات احتراق در محفظه اتفاق می‌افتد. به طور کلی وقتی زمان ماند محصولات احتراق در ناحیه شعله کمتر از زمان مورد نیاز واکنش‌های شیمیایی باشد، شعله دمش می‌کند [۱۱]. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که

¹ Entrainment

اگر زمان ماند محصولات احتراق از زمان مشخصه نرخ کرنش شعله در شرایط خاموشی بیش از ۱۰٪ باشد، شعله دمشی نمی‌کند [۷].

پیش‌بینی حد دمشی شعله یکی از دغدغه‌های اصلی طراحان، سازندگان و مصرف‌کنندگان توربین‌های گازی است. یکی از این روش‌ها استفاده از شبیه‌سازی‌های دقیق برای یافتن حد دمشی است. این امر نیازمند استفاده از یک روش عددی دقیق به همراه واکنش شیمیایی مناسب در تمامی نسبت هم‌ارزی‌های موردبررسی است. زنگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل پیش‌بینی دمشی شعله را با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به کمک معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز پیشنهاد دادند [۱۲]. در این روش ابتدا یک صفحه در انتهای ناحیه بازگردشی جریان در محفظه زده می‌شود، سپس دما و نسبت هم‌ارزی در این صفحه محاسبه می‌شود. سپس شبیه‌سازی‌ها با نسبت هم‌ارزی‌های مختلف انجام می‌شود. در پایان هر شبیه‌سازی، اگر نسبت افزایش دما بر میزان تغییر نسبت هم‌ارزی در صفحه انتخاب‌شده در انتهای ناحیه بازگردشی نسبت به مقادیر متناظر ورودی بیشتر از ۵ باشد و همچنین میزان تغییرات نسبت هم‌ارزی در صفحه مذکور نسبت به جریان ورودی به محفظه کمتر از ۰.۰۳ باشد، شعله دمشی می‌کند [۱۲]. هو و همکاران یک مدل ساده‌تر برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به کمک معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز پیشنهاد دادند [۱۵-۱۳]. در این مدل، ابتدا میدان جریان محفظه در شرایط بدون احتراق با تزریق سوخت و هوای موردنظر شبیه‌سازی می‌شود. سپس در حل انجام‌شده، سطوح هم‌تراز حداقل نسبت هم‌ارزی را که احتمال تشکیل شعله در آن وجود دارد، رسم می‌شود. سپس حجم این ناحیه به‌عنوان حجم ناحیه اشتعال‌پذیر محاسبه می‌شود. در مرحله بعد دبی سوخت موردنیاز با استفاده از یک رابطه خطی که وابسته به حجم ناحیه اشتعال‌پذیر و دبی بازگردشی ناحیه بازچرخشی جریان است، محاسبه می‌شود. در پایان، اگر نسبت دبی سوخت محاسبه‌شده بر سوخت ورودی محفظه کمتر از ۰.۰۰۵ باشد، در آن نسبت هم‌ارزی شعله دمشی می‌کند. در غیر این صورت، دبی سوخت ورودی به محفظه باید کاهش یابد تا شرط فوق ارضا شود [۱۵-۱۳]. اعداد انتخاب‌شده برای معیارهای فوق طبعاً تنها برای استفاده در محفظه احتراق‌های موردنظر دارای دقت کافی است. برای استفاده از این مدل‌ها برای یک محفظه احتراق دیگر باید این ثابت‌ها تصحیح شوند.

هدف اصلی این مقاله بررسی توانایی شبیه‌سازی‌های عددی به کمک معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز و مدل احتراق اضمحلال ادی^۲ در پیش‌بینی حد خاموشی شعله فوق می‌باشد. برای این منظور، محفظه احتراق موردنظر در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف شبیه‌سازی و تحلیل شده است. بر اساس این تحلیل‌ها، در ادامه این مقاله معیاری ساده جهت پیش‌بینی حد خاموشی شعله در محفظه احتراق موردبررسی ارائه‌شده است. در پایان این مقاله، از روش توسعه داده‌شده برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در محفظه احتراق توربین SGT600 استفاده شده است.

روش عددی

در مطالعه عددی حاضر از نرم‌افزار ANSYS Fluent 16 استفاده شده است. در این راستا، برای شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان از روش $k-\varepsilon$ (Realizable) استفاده شده است. این مدل دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی رفتار جریان‌های همراه با پیچش، لایه مرزی، گرادیان‌های فشار مخالف، جدایش و نواحی بازگردشی دارد. مطالعات آقای مانگیا بر روی یک جریان پیچشی در داخل یک محفظه احتراق نشان می‌دهد که روش فوق از تمامی روش‌های هم‌خانواده دو معادله‌ای دقت بیشتری در پیش‌بینی ابعاد و محل ناحیه بازگردشی در مقایسه با نتایج تجربی دارد [۱۶]. در این مطالعه همچنین برای مدل‌سازی ترم‌های مجهول نرخ واکنش در معادلات انرژی و بقای عناصر از مدل احتراقی نرخ محدود EDC استفاده شده است. البته ترم $\overline{\dot{\omega}_T}$ به‌صورت زیر به نرخ واکنش در معادله عناصر مربوط می‌شود.

$$\overline{\dot{\omega}_T} = -\sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \overline{\dot{\omega}_k} \quad (1)$$

در مدل احتراقی EDC، نرخ واکنش به‌وسیله حرکات جریان آشفته کنترل می‌شود. به‌عبارت دیگر، واکنش شیمیایی به‌صورت مجموعه‌ای از گازهای سوخته و نسوخته دیده می‌شود که به‌وسیله ادی‌های جریان آشفته حمل می‌شوند و احتراق آن‌ها وابسته به انرژی اختلاط در میدان جریان آشفته است. در این مدل نرخ واکنش عنصر ξ به‌صورت زیر معرفی می‌شود [۱۸].

$$\overline{\dot{\omega}_k} = \frac{\rho \xi^2}{\tau(1-\xi^3)} (Y_k^{t=t_0+\tau} - Y_k^{t=t_0}) \quad (2)$$

که در این رابطه ρ چگالی، ξ کسر حجمی ساختارهای آشفته‌ای که در آن‌ها واکنش شیمیایی انجام می‌شود، τ زمان واکنش شیمیایی و Y_k کسر جرمی عنصر k می‌باشد. در مدل EDC واکنش شیمیایی در یک حجم خاصی از ساختارهای آشفته جریان انجام می‌شود. این حجم وابسته به مشخصات آشفته‌گی جریان است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود،

$$\xi = C_\xi \left(\frac{\theta \varepsilon}{k^2} \right)^{3/4} \quad (3)$$

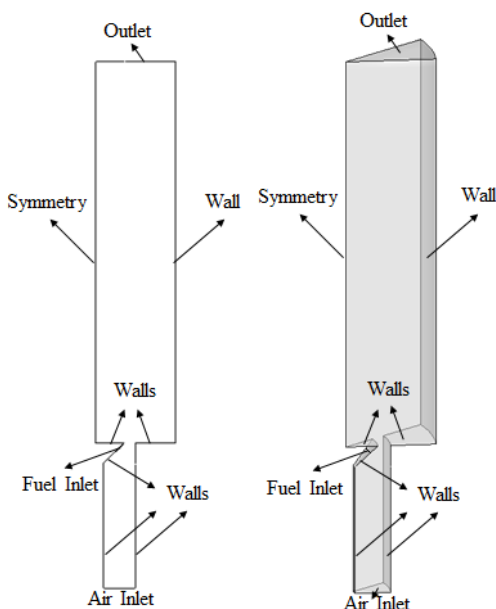
که در این رابطه C_ξ ثابت مدل (۲،۱۳۷۷) می‌باشد. در این مدل همچنین، کسر جرمی عنصر k با استفاده از یک مکانیزم شیمیایی محاسبه می‌شود اما زمان مشخصه این واکنش شیمیایی توسط مشخصه زمانی جریان آشفته (τ) تعیین می‌شود. این مشخصه زمانی به‌صورت زیر تعریف می‌شود،

$$\tau = C_\tau \left(\frac{\theta}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (4)$$

^۲ Eddy dissipation concept (EDC)

در مطالعه حاضر، ابتدا روش عددی مورد استفاده با استفاده از نتایج تجربی موجود برای یک محفظه احتراق نمونه اعتبارسنجی می‌شود. سپس توانایی روش عددی در پیش‌بینی حد خاموشی در این محفظه ارزیابی می‌شود. در پایان، بر پایه مطالعات انجام شده یک معیار ساده برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در این گونه محفظه احتراق‌ها معرفی خواهد شد.

شکل ۲ هندسه‌های محفظه احتراق نمونه در شرایط دوبعدی و سه‌بعدی را نشان می‌دهد. در این هندسه‌ها، هوا از پایین‌ترین نقطه دامنه حل با سرعت ۵٫۱ متر بر ثانیه و درصد آشفته‌گی ۱۰٪ وارد دامنه حل می‌شود. در این ورودی از شرط مرزی سرعت استفاده شده است. سوخت (متان) با استفاده از شیباری که در قسمت شیب‌دار ورودی محفظه نصب شده است، وارد دامنه حل می‌شود. برای تعریف این ورودی در حل حاضر از شرط مرزی سرعت با ۱۰٪ آشفته‌گی ورودی استفاده شده است. از آنجاکه در مطالعه حاضر، هدف، بررسی حد خاموشی شعله است، طبیعتاً دبی سوخت متغیر می‌باشد. از آنجاکه جریان مورد بررسی در این مسئله فاقد پیچش است، می‌توان نیمی از هندسه را شبیه‌سازی نمود. به همین منظور شرط مرزی سمت چپ محفظه، شرط تقارن محوری انتخاب شده است. در بقیه مرزهای محفظه از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به‌منظور کم کردن هزینه محاسباتی در حالت سه‌بعدی، یک قطاع از هندسه کلی محفظه شبیه‌سازی شده است. این فرض در جریان‌های بدون پیچش، خطای بسیار کمی را ایجاد می‌کند. بنابراین در حل سه‌بعدی و در اطراف دامنه حل از شرط پریودیک استفاده شده است.



شکل ۲- شماتیک هندسه مورد مطالعه

برای شبکه‌بندی هندسه حاضر در شرایط دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب از ۱۹۰۰۰ و ۶۴۰۰۰ شبکه محاسباتی استفاده شده است. شبکه‌بندی در نزدیکی

که در این رابطه C_F ثابت مدل (۰٫۴۰۸۲) و θ لزجت دینامیکی جریان آشفته می‌باشد. در مطالعه حاضر مکانیزم دو مرحله پولیفک برای محاسبه کسر جرمی عناصر استفاده شده است [۱۹].



که نرخ واکنش در این دو واکنش عبارت است از،

$$\omega_1 = A_1 e^{-E_1/RT} \left[\frac{\rho Y_{CH_4}}{MW_{CH_4}} \right]^{0.2} \left[\frac{\rho Y_{O_2}}{MW_{O_2}} \right]^{1.3} \quad (7)$$

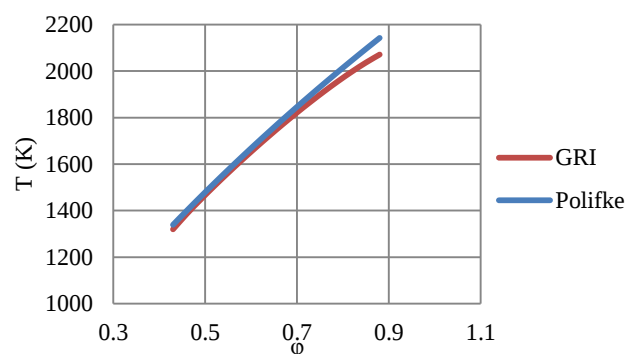
$$\omega_2 = A_2 e^{-E_2/RT} \left[\frac{\rho Y_{CO}}{MW_{CO}} \right]^{1.5} \left[\frac{\rho Y_{O_2}}{MW_{O_2}} \right]^{0.25} \quad (8)$$

که در این روابط،

$$A_1 = 4.56e + 11, \quad E_1 = 2.03e + 8 \left(\frac{J}{kgmol} \right) \quad (9)$$

$$A_2 = 3.16e + 12, \quad E_2 = 1.67e + 8 \left(\frac{J}{kgmol} \right) \quad (10)$$

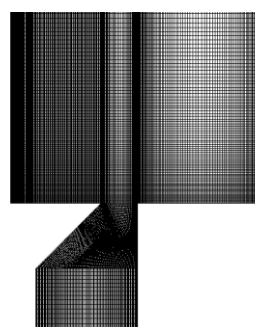
برای بررسی عملکرد مکانیزم به‌کاررفته در این مطالعه، نتایج این مکانیزم برای یک راکتور کاملاً پیش آمیخته در شرایط عملکردی محفظه مورد مطالعه با نتایج مکانیزم GRI3.0 مقایسه شده است. شکل زیر تغییرات دما برحسب نسبت هم ارزی را برای مکانیزم‌های فوق نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، مکانیزم حاضر به‌خوبی نتایج حاصل از مکانیزم GRI3.0 را پیش‌بینی می‌کند.



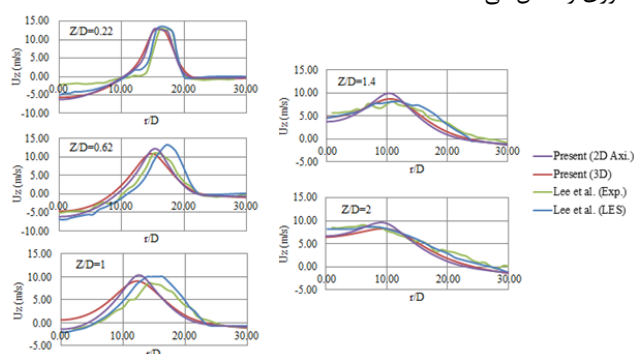
شکل ۳- دمای راکتور کاملاً پیش آمیخته برحسب نسبت هم ارزی برای مکانیزم پولیفک و مکانیزم دقیق

هندسه محفظه احتراق نمونه

دیواره‌ها، ورودی‌های هوا و سوخت، محل شعله، ناحیه بازگردشی و لایه‌های برشی، ریز شده است. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق لایه‌مرزی، در نزدیکی دیواره‌ها شبکه به حدی ریز شده است که $Y^+ < 1$ شود. شکل ۳ بخشی از شبکه محاسباتی مورد استفاده را نشان می‌دهد. سائز متوسط المان‌های انتخاب‌شده در کل دامنه حل ۰.۵ میلی‌متر است. به‌منظور ارزیابی استقلال شبکه، محاسبات برای شبکه‌ها با تعداد مش ۱۹۰۰۰۰، ۳۸۰۰۰۰، ۹۸۰۰۰۰ و ۱۳۳۰۰۰۰ نیز انجام شده است. شکل ۴ توزیع سرعت محوری و کسر مخلوط در راستای جریان در میانه محفظه را برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. در این حالت سرعت ورودی سوخت به هندسه مورد بررسی ۵ متر بر ثانیه است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، اگرچه توزیع سرعت حتی با استفاده از ۱۹۰۰۰۰ شبکه مستقل از شبکه محاسباتی است، اما برای دستیابی به توزیع کسر غلظت مستقل از شبکه، باید از ۶۴۰۰۰۰ مش استفاده کرد.

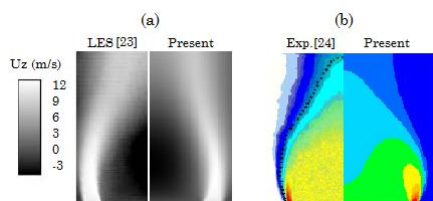


شکل ۳ - شبکه محاسباتی

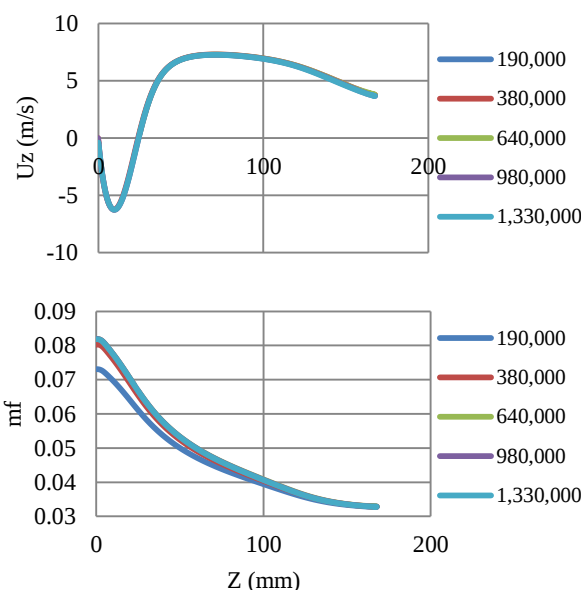


شکل ۵ - توزیع شعاعی سرعت محوری در مقاطع مختلف محفظه احتراق

نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های دوبعدی متقارن محوری اگرچه رفتار کلی جریان را پیش‌بینی می‌کند، اما توانایی پیش‌بینی حداکثر و حداقل سرعت جریان را ندارد. از طرفی، با توجه به نتایج می‌توان ملاحظه کرد که شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی حاضر دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار جریان در هندسه مورد بررسی را دارند. نتایج حاضر محل حداکثر سرعت را بهتر از نتایج LES ارائه‌شده توسط لی، پیش‌بینی می‌کند. اما مقدار سرعت منفی در نواحی نزدیک به مرکز هندسه مورد بررسی را که نمایانگر ناحیه بازگردشی است، با دقت کمتری پیش‌بینی می‌نماید. به‌منظور مقایسه بیشتر بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج LES و تجربی، شکل ۶ توزیع محلی کسر مخلوط و سرعت محوری را با نتایج پیشین مقایسه می‌کند. این نتایج نیز نشان می‌دهد که شبیه‌سازی حاضر توانایی مناسبی در پیش‌بینی رفتار جریان مورد بررسی دارد.

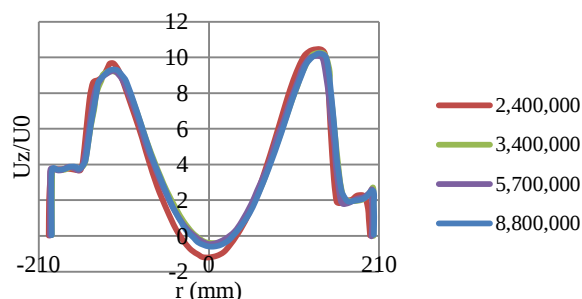


شکل ۶ - توزیع محلی (a) سرعت محوری و (b) کسر مخلوط



شکل ۴ - آنالیز حساسیت شبکه محاسباتی در قالب توزیع سرعت و کسر مخلوط بر روی خط مرکزی محفظه در شبکه‌های مختلف

بالادست شعله در داخل مشعل (در فاصله ۲۲ میلی‌متری از خروجی مشعل) را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، شبکه با ۳,۴ میلیون مش برای مطالعات حاضر کافی می‌باشد.



شکل ۸ - آنالیز حساسیت شبکه محاسباتی در قالب توزیع سرعت در بالادست شعله در شبکه‌های مختلف

نتایج

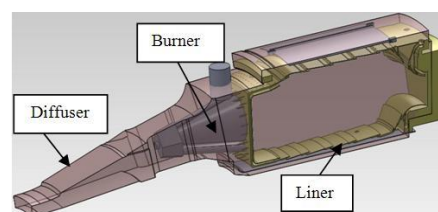
پیش‌بینی حد خاموشی در محفظه احتراق نمونه

در این قسمت توانایی شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی مبتنی بر معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز و مدل احتراقی EDC در پیش‌بینی حد دمش شعله کم سوخت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا شعله در نسبت هم ارزی ۰,۵۴، شبیه‌سازی شده است، سپس در ادامه، با کاهش نسبت هم ارزی رفتار شعله و جریان حاکم بر محفظه تحلیل و بررسی شده است. این بررسی‌ها تا نسبت هم‌ارزی‌ای انجام شده که در آن شعله دمش می‌کند. شکل ۹ توزیع دما در محفظه در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این تصاویر همچنین، مرزهای نواحی بازگردشی جریان به‌وسیله خطوط هم‌تراز سرعت محوری صفر نشان داده شده‌اند. با توجه به این نتایج می‌توان ملاحظه کرد که شعله در نسبت هم‌ارزی‌های بالا، به‌صورت معلق در پایین‌دست جریان پایدار می‌شود. دلیل این امر این است که در این شرایط ناحیه بازگردشی غنی از سوخت است، بنابراین در نواحی نزدیک به محل تزریق سوخت شعله به‌خوبی تشکیل نمی‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم ارزی شعله از حالت معلق به شعله چسبیده به کف محفظه تبدیل می‌شود. این نتایج با نتایج ارائه‌شده توسط احمد که در شکل ۱۰ نشان داده شده همخوانی خوبی دارد [۲۴].

نتایج شکل ۹ همچنین نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم ارزی، ابعاد ناحیه بازگردشی مرکزی افزایش می‌یابد تا اینکه در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از ۰,۲۶، ناحیه بازگردشی مستقل از نسبت هم ارزی می‌شود. بررسی‌های حاضر همچنین نشان می‌دهد که شعله در نسبت هم ارزی ۰,۲۳ دمش می‌کند. این در حالی است که نتایج تجربی پیشین بر روی محفظه حاضر نشان می‌دهد که شعله در نسبت هم ارزی ۰,۱۵ خاموش می‌شود [۲۴]. این نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های انجام شده به کمک معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز و مدل احتراقی EDC نسبت هم ارزی دمش شعله را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زنند. با توجه به اینکه مدل احتراقی استفاده شده یکی از دقیق‌ترین مدل‌های نرخ محدود موجود است، دلیل بروز خطاهای فوق می‌تواند ناشی از دو عامل

هندسه محفظه احتراق توربین SGT600

محفظه احتراق موتور SGT600 از ۱۸ مشعل EV نسل دوم که به‌صورت حلقوی در کنار یکدیگر قرار گرفته، تشکیل شده است. در مطالعه حاضر برای کاهش هزینه محاسباتی، یک بخش ۲۰ درجه‌ای از هندسه کلی که حاوی یک مشعل است، شکل ۷ هندسه مورد استفاده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. مبدأ مختصات در مسئله حاضر در خروجی از مشعل در ابتدای محفظه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مسئله حاضر به همراه شرایط کاری محفظه در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۷ - شماتیک هندسه مورد مطالعه

جدول ۱ - شرایط کاری و مرزی

۴,۴	دبی جریان هوای کل ورودی به محفظه (kg/s)
۳,۳	دبی جریان هوای ورودی به مشعل (kg/s)
۰,۰۸	دبی جریان سوخت ورودی کل (kg/s)
۰,۰۱۴	دبی سوخت پایلوت (kg/s)
۰,۰۶۹	دبی سوخت اصلی (kg/s)
۷۰۰	دمای ورودی هوا (°K)
۳۰۰	دمای ورودی سوخت (°K)
۱۳,۵	فشار محفظه احتراق (bar)
٪۶	افت فشار محفظه احتراق
۸۰	سرعت در شکاف‌های برنر (m/s)
۱۵۰۰	دمای هوای ورودی به توربین (K)

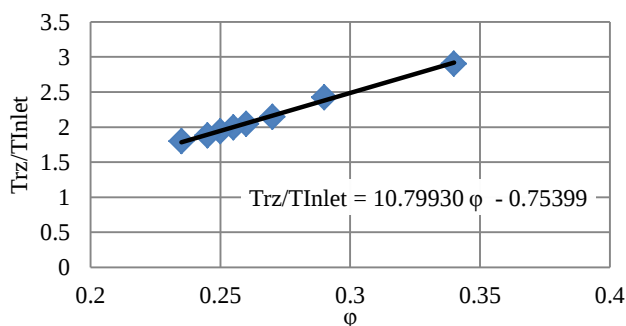
برای شبکه‌بندی هندسه حاضر از ۳,۴ میلیون مش ترکیبی مثلثی و مربعی استفاده شده است. شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره‌ها، ورودی‌های هوای خنک کاری و هوای رقیق‌سازی، مجاری ورودی هوا و سوخت، محل شعله و لایه‌های برشی، ریز شده است. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق لایه‌مرزی، در نزدیکی دیواره‌ها شبکه از ۱۰ لایه با نرخ رشد ۱,۲ تشکیل شده است. شبکه محاسباتی در ورودی‌های سوخت به نحوی انتخاب شده است که در هر سوراخ ورودی سوخت ۱۲ نود محاسباتی قرار گیرد. سایز متوسط المان‌های انتخاب شده در کل دامنه حل ۳ میلی‌متر است. به‌منظور ارزیابی استقلال شبکه، محاسبات برای شبکه‌ها با تعداد مش ۴,۵، ۵,۷، ۸,۸ میلیون نیز انجام شده است. شکل ۸ توزیع شعاعی سرعت محوری بی‌بعد شده با یک سرعت مبنا ($U_0=10\text{m/s}$) در محفظه احتراق مورد بررسی در شرایط حداکثر توان و برای شبکه‌های مختلف در مقطع

بدون احتراق استوار است و ثوابت مدل تنها برای یک محفظه خاص قابل استفاده است. این در حالی است که مطالعات پیشین شهسواری و همکاران نشان می‌دهد که احتراق تأثیرات بسزایی بر میدان جریان دارد [۲۵]. به عبارت دیگر، میدان جریان غیر محترقه و محترقه بسیار با یکدیگر متفاوت هستند. بنابراین، نمی‌توان از پدیده‌های یک میدان جریان برای پیش‌بینی یک پدیده کاملاً متفاوت در جریان محترقه استفاده نمود.

طبق نتایج ارائه شده در قسمت‌های فوق، اگرچه شبیه‌سازی‌های حاضر توانایی پیش‌بینی رفتار جریان محترقه در نزدیکی حد خاموشی شعله را ندارد، اما با توجه به اعتبارسنجی‌های انجام شده و همچنین شکل شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف، این شبیه‌سازی‌ها در نواحی دور از حد خاموشی، دقت لازم برای پیش‌بینی رفتار جریان و شعله را دارند. لذا در ادامه، هدف، استخراج معیاری برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی در شرایط دور از حد خاموشی است. برای دستیابی به این هدف، بررسی‌های دقیقی بر روی پارامترهای مؤثر در بروز خاموشی شعله انجام شده است. به این صورت که با کاهش نسبت هم‌ارزی کلی جریان، رفتار پارامترهای تأثیرگذار در بروز خاموشی شعله مانند دما، نسبت هم‌ارزی محلی، نرخ واکنش، ابعاد ناحیه بازگردشی، نرخ کرنش، حرارت آزاد شده و هیدروکربن‌های نسوخته بررسی شده‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که اکثر پارامترهای فوق به صورت غیرخطی به تغییرات نسبت هم‌ارزی پاسخ می‌دهند. در میان این پارامترها، دما یکی از معدود پارامترهایی است که با کاهش نسبت هم‌ارزی به صورت خطی کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ توزیع دمای میانگین‌گیری شده وزنی در انتهای ناحیه بازگردشی مرکزی محفظه را برحسب نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد. برای محاسبه این دما ابتدا ناحیه بازگردشی به کمک سرعت محوری صفر رسم شده، سپس از انتهای این ناحیه یک صفحه گذرانده شده است (شکل ۱۲). این صفحه از حل عددی، حاوی n سلول محاسباتی است. برای محاسبه دما در این صفحه از رابطه زیر استفاده شده است،

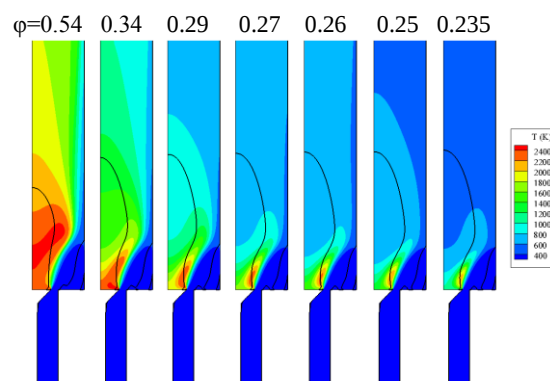
$$T_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \rho_i |V_i \cdot A_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i |V_i \cdot A_i|} \quad (24)$$

که در این رابطه ρ_i چگالی سیال، V_i سرعت محوری جریان و A_i مساحت سلول i در مقطع موردنظر در انتهای ناحیه بازگردشی می‌باشد.

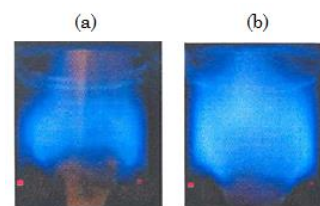


شکل ۱۱- دمای بی‌بعد شده جریان در انتهای ناحیه بازگردشی مرکزی برحسب نسبت هم‌ارزی

باشد. عامل اول ناکارآمدی مکانیزم شیمیایی دومرحله‌ای استفاده شده در نسبت هم‌ارزی‌های پایین است. مکانیزم‌های کاهش یافته معمولاً در گستره مشخصی از نسبت هم‌ارزی‌ها دارای دقت کافی است و در بقیه شرایط با خطا همراه می‌باشند. اما این خطا در حل عددی به کمک مدل‌های احتراقی نرخ محدود گریزناپذیر است، زیرا در این مدل‌ها، به دلیل هزینه محاسباتی بالا، نمی‌توان از مکانیزم‌های پیچیده استفاده نمود. عامل دوم در بروز خطای فوق می‌تواند، عدم توانایی شبیه‌سازی‌ها مبتنی بر معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز باشد. اگرچه اعتبارسنجی‌های انجام شده و همچنین مطالعه اثر شبکه بر حل، نشان داد که روش و شبکه مورد استفاده با دقت بالا رفتار جریان را پیش‌بینی می‌کند، اما این مدل در نزدیکی حد خاموشی دارای دقت مناسب نیست. در نزدیکی خاموشی شعله رفتار جریان و شعله بسیار حساس و ناپایا است. به عبارت دیگر، شعله و جریان مرتب تحت تغییرات لحظه‌ای قرار می‌گیرند. از طرفی روش‌های مبتنی بر معادلات میانگین‌گیری شده رینولدز توانایی پیش‌بینی این رفتارهای ناپایا را ندارند.



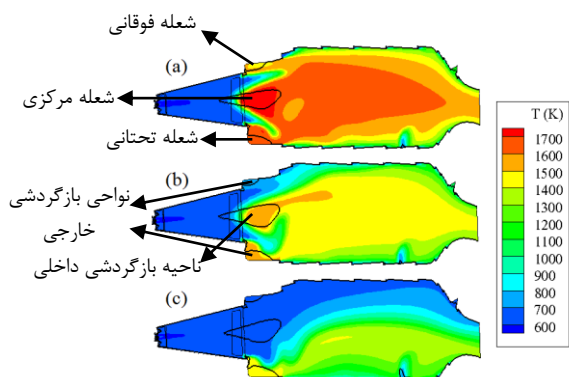
شکل ۹- توزیع محلی دما و مرزهای ناحیه بازگردشی در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل ۱۰- تصویری از شعله‌های (a) معلق ($\phi > 0.54$) و (b) چسبیده ($\phi < 0.54$) [۲۴]

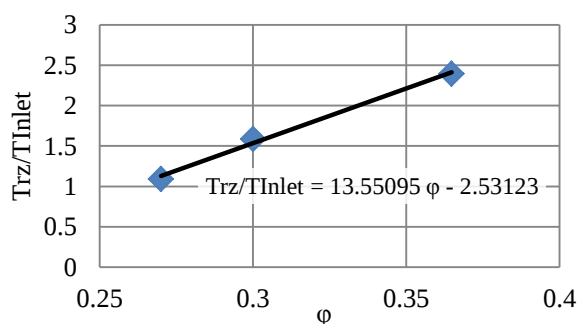
برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در محفظه حاضر نمی‌توان از مدل ارائه شده توسط زنگ و همکاران [۱۲] استفاده نمود، زیرا لازمه استفاده از این مدل این است که شبیه‌سازی‌های عددی بتوانند رفتار شعله در نسبت هم‌ارزی‌های نزدیک به خاموشی را به درستی پیش‌بینی نمایند. این در حالی است که بررسی‌های فوق نشان داد که مدل‌سازی‌های عددی در نزدیکی حد خاموشی شعله بی‌اعتبار می‌شوند. از طرف دیگر استفاده از مدل هو و همکاران [۱۵-۱۳] از نظر علمی چندان مورد استناد نیست زیرا این مدل بر مبنای شبیه‌سازی‌های

به کمک نواحی بازگردشی خارجی پایدار می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ (a) نشان می‌دهد که در نسبت هم ارزی ۰,۳۶ که متناظر با شرایط کاری بار کامل توربین است، تمامی قسمت‌های شعله روشن است. هرچند قسمت فوقانی شعله از قسمت مرکزی و تحتانی آن ضعیف‌تر است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش نسبت هم ارزی از ۰,۳۶ به ۰,۳ قسمت فوقانی شعله در محفظه خاموش می‌شود. سپس با کاهش بیشتر نسبت هم ارزی بخش مرکزی شعله نیز خاموش می‌شود.



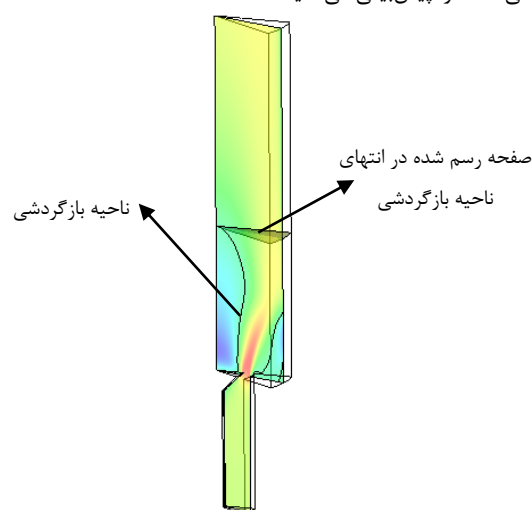
شکل ۱۳ - توزیع دما در محفظه احتراق توربین SGT600 در نسبت هم ارزی‌های (a) ۰,۳۶، (b) ۰,۳ و (c) ۰,۲۷

شکل ۱۴ توزیع دمای میانگین‌گیری شده وزنی در انتهای ناحیه بازگردشی مرکزی محفظه را برحسب نسبت هم ارزی نشان می‌دهد. برای محاسبه دمای میانگین از روش مشابه استفاده شده در قسمت قبل، استفاده شده است. با استفاده از معیار توسعه داده شده در بخش قبل، فرض می‌شود که شعله زمانی در محفظه خاموش می‌شود که $T_{nr}/T_{inlet} = 1$ ، لذا برای یافتن نسبت هم ارزی که در آن شرط فوق ارضا شود، از داده‌های شکل ۱۴ یک منحنی خطی برون‌یابی شده است. این برون‌یابی نشان می‌دهد که محفظه SGT600 در نسبت هم ارزی ۰,۲۶ خاموش می‌شود.



شکل ۱۴ - دمای بی‌بعد شده جریان در انتهای ناحیه بازگردشی مرکزی برحسب نسبت هم ارزی

در شکل ۱۱ دمای انتهای ناحیه بازگردشی با دمای هوای ورودی به محفظه بی‌بعد سازی شده است. با توجه به این شکل، دمای میانگین انتهای ناحیه بازگردشی با کاهش نسبت هم ارزی تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. حال از این نتایج، یک نمودار خطی گذرانده شده است. به طور کلی، زمانی که شعله خاموش می‌شود، دمای جریان سیال انتهای ناحیه بازگردشی (Trz) به دمای اولیه سوخت و هوای ورودی (T_{inlet}) به محفظه نزدیک می‌شود. لذا در شکل ۱۱، نمودار برای یافتن نسبت $T_{nr}/T_{inlet} = 1$ برون‌یابی شده است. این برون‌یابی نشان می‌دهد که در نسبت هم ارزی ۰,۱۶ دمای جریان در انتهای ناحیه بازگردشی با دمای سوخت و هوای ورودی به محفظه برابر می‌شود. مقایسه این نسبت هم ارزی با نسبت هم ارزی خاموشی شعله که در مطالعات تجربی گزارش شده است [۲۴]، نشان می‌دهد که روش حاضر با خطای ۷٪ حد خاموشی شعله را پیش‌بینی می‌نماید.



شکل ۱۲ - محاسبه دمای میانگین در صفحه انتهایی ناحیه بازگردشی میانی

پیش‌بینی حد خاموشی در محفظه احتراق SGT600

در این بخش، از روش توسعه داده در بخش قبل برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در محفظه احتراق SGT600 استفاده شده است. شکل ۱۳ توزیع دما در محفظه احتراق مذکور در سه نسبت هم ارزی ۰,۳۶، ۰,۳ و ۰,۲۷ را نشان می‌دهد. مشعل مورد استفاده در مطالعه حاضر از نوع پر پیچش است. لذا انتظار می‌رود که یک ناحیه بازگردشی قوی در اثر پیچش جریان به وجود آید که به کمک آن شعله پایدار می‌شود. از طرفی انتظار می‌رود که در نواحی اطراف محفظه نیز نواحی بازگردشی ایجاد شود که به آن ناحیه بازگردشی خارجی گویند. در این مقاله، برای نشان دادن نواحی بازگردشی از خطوط هم‌تراز سرعت محوری صفر در شکل ۱۳ استفاده شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر به مقاله پیشین شهسواری و همکاران مراجعه شود [۲۶].

همان‌طور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، می‌توان شعله حاضر را به سه بخش مختلف تقسیم‌بندی کرد: شعله مرکزی و شعله‌های غیر مرکزی فوقانی و تحتانی. شعله مرکزی به کمک ناحیه بازگردشی داخلی و شعله‌های غیر مرکزی

نتیجه‌گیری

هدف از مقاله حاضر، پیش‌بینی حد خاموشی کم سوخت در محفظه احتراق توربین SGT600 با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی است. برای این منظور، ابتدا از نتایج تجربی موجود برای یک محفظه احتراق ساده استفاده شده تا توانایی شبیه‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی رفتار جریان و حد خاموشی شعله ارزیابی شود. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که اگرچه که روش عددی به‌کاررفته توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار جریان دارد، اما توانایی پیش‌بینی حد خاموشی شعله را ندارد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که دما یکی از محدود پارامترهایی است که با کاهش نسبت هم ارزی تقریباً به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. با برون‌یابی از این رفتار خطی، نسبت هم‌ارزی‌ای را که در آن، دمای جریان سیال در انتهای ناحیه بازگردشی برابر با دمای هوای ورودی به محفظه شود، به‌عنوان نسبت هم ارزی خاموشی شعله محاسبه شده است. نتایج این برون‌یابی نسبت هم ارزی خاموشی شعله را در محفظه احتراق نمونه با خطای کمتر از ۷٪ نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌نماید. در پایان، از مدل توسعه داده‌شده برای پیش‌بینی حد خاموشی شعله در محفظه احتراق توربین SGT600 استفاده شده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که محفظه احتراق مذکور در نسبت هم ارزی ۰٫۲۶ خاموش می‌شود.

منابع

1. J.P. Longwell, E.E. Frost, and M.A. Weiss, "Flame Stability in Bluff Body Recirculation Zones", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 8, pp. 29-33, 1953.
11. E.E. Zukoski and F.E. Marble, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blowoff from Bluff Bodies", Proceedings of the Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry, Vol. 20, pp. 5-10, 1956.
12. H. Zheng, Z. Zhang, Y. Li, and Z. Li, "Feature Parameter Criterion for Predicting Lean Blowout Limit of Gas Turbine Combustor and Bluff Body Burner", Mathematical Problems in Engineering, No. 939234, pp. 1-17, 2013.
13. B. Hu, Y. Huang, F. Wang, and F. Xie, "CFD Predictions of LBO Limits for Aero-engine Combustors Using Fuel Iterative Approximation", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 26, pp. 74-84, 2013.
14. B. Hu, Y. Huang, and F. Wang, "FIA Method for LBO Limit Predictions of Aer-engine Combustors Based on FV Model", Aerospace Science and Technology, Vol. 28, pp. 435-446, 2013.
15. B. Hu, Q. Zhao, and J. Xu, "Predicting Lean Blowout Limit of Combustors Based on Semi-empirical Correlation and Simulation", Journal of Propulsion and Power, Vol. 32, pp. 108-120, 2016.
16. H.C. Mongia, "Recent Progress in Comprehensive Modeling of Gas Turbine Combustor", 46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Nevada, No. 1445, pp. 1-33, 2008.
17. T. Poinso and D. Veynante, "Theoretical and Numerical Combustion", 3rd Ed., R.T. Edwards, 2012.
18. H. Pitch, "Modeling Turbulent Combustion", CEFRC Combustion Summer School, Institut fur Technische Verbrennung, Germany, 2014.
19. W. Polifke, W. Dobbeling, T. Sattelmayer, D.G. Nicol, "A NOx Prediction Scheme for Lean-premixed Gas Turbine Based on Detailed Chemical Kinetics", Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 118, pp. 775-776, 1996.
20. T. Cebeci, "Turbulence Models and Their Application", Horizons Publishing (Springer), Long Beach, 2004.
21. Ch.J. Chen and Sh.Y. Jaw, "Fundamentals of Turbulence Modeling", Taylor and Francis, Washington, 1998.
22. Ch.Y. Lee and S. Cant, "LES of Nonlinear Saturation in Forced Turbulent Premixed Flames", Flow Turbulence and Combustion, Accepted, 2017.
23. L. Esclapez, E. Riber, and B. Cuenot, "Ignition Probability of a Partially Premixed Burner", Proceedings of Combustion Institute, Vol. 3, pp. 3133-3141, 2014.
24. S.F. Ahmed, R. Balachandran, T. Marchione, and E. Mastorakos, "Spark Ignition of Turbulent Nonpremixed Bluff-body Flames", Combustion and Flame, Vol. 151, pp. 366-385, 2007.
25. M. Shahsavari, M. Farshchi, and M.H. Arabnejad, "Large Eddy Simulations of Unconfined Non-reacting and Reacting Turbulent Low Swirl Jets", Flow Turbulence and Combustion, Vol. 98, pp. 817-840, 2017.
26. M. Shahsavari, M.A. Soroudi, M. Yazdani, S. Montazerinejad, and Y. Bagheri, "CO Pollutant Prediction of a Stationary Gas Turbine Combustor Using Finite Rate Eddy Dissipation Combustion Model", Fuel and Combustion, Accepted, 2017.
1. A.H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Taylor and Francis, Philadelphia, 1998.
2. Dunn-Rankin, D., Lean Combustion: Technology and Control, London, Academic Press, 2008.
3. Jahnson, M. R., Littlejohn, D., Nazeer, W. A., Smith, K. O., Cheng, R.K., A Comparison of the Flowfields and Emissions of High-Swirl Injectors and Low-Swirl Injectors for Lean Premixed Gas Turbines, Proceedings of Combustion Institute, Vol. 30, pp.2867-2874, 2005.
4. Y. Huang, and V. Yang, "Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustion," Journal of Progress in Energy and Science, 35, pp. 293-364, 2009.
5. D. T. Yegian and R. K. Cheng, "Development of a Lean Premixed low-Swirl Burner for Low NOx Practical Application," Combustion Science and Technology, 139, pp. 207-227, 1998.
6. M. Shahsavari and M. Farshchi, "Stability and NOx emissions of Low Swirl Flames", Fuel and Combustion, Vol. 2, pp. 59-75, 2013.
7. T.C. Lieuwen and V. Yang, "Gas Turbine Emissions", Cambridge University Press, 2013.
8. Ch.K. Law, "Combustion Physics", Cambridge University Press, 2010.
9. G.C. Williams, H.C. Hottel, A.C. Scurlock, "Flame Stabilization and Propagation in High Velocity Gas Streams", Proceedings of Combustion Institute, Vol. 3, pp.21-40, 1948.

English Abstract**Lean Blow-off Prediction of a Turbulent Flame Stabilized by Recirculating Flows**

Mohammad Shahsavari, Mohammad Ali Soroudi, and Yousef Yazdani

Combustion Chamber Department, Turbotec Co., Oil Turbo Compressor, Tehran, Iran.

The objective of the present paper is to predict lean blow-off limit of a turbulent flame stabilized by recirculating flows in stationary gas turbines. To such aim, $k - \epsilon$ turbulent model along with Eddy Dissipation Concept (EDC) and a global two step kinetic mechanism are used to simulate the combustor flow field. Comparison of the present numerical results and experimental data presented in [22] shows that although numerical simulations can predict overall flow features accurately, it cannot predict lean blow out limit. In an attempt to develop a basis to predict the lean blow-off limit, different flow variables contributing in lean blow-off process are studied as a function the global equivalence ratio. Such investigations show that mass-weighted flow temperature at the end of the recirculation zone reduces linearly by decreasing the equivalence ratio. Using such linear feature, lean blow-out equivalence ratio is calculated by extrapolating the linear curve to find an equivalence ratio in which the mass-weighted flow temperature at the end of the central recirculation zone equals the inlet air temperature. Result shows that such extrapolations can predict lean blow-off equivalence ratio by 7% error as compared to the experimental data. Finally, the methodology is used to predict lean blow out limit in a stationary gas turbine combustor.

Keywords: Flame Stability, Lean Blow-off, Finite Rate Eddy Dissipation Combustion Model.