

شبیه‌سازی عددی تاثیر سامانه بای‌پس در کاهش آلاینده کربن مونوکسید توربین گاز IGT25

محمدعلی قیدی شهران^{۱*}، ناعمه صفری^۲، محمدعلی سرودی^۳، محمد علیزاده^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، واحد توسعه، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، ma.gheydi@turbotec-co.com

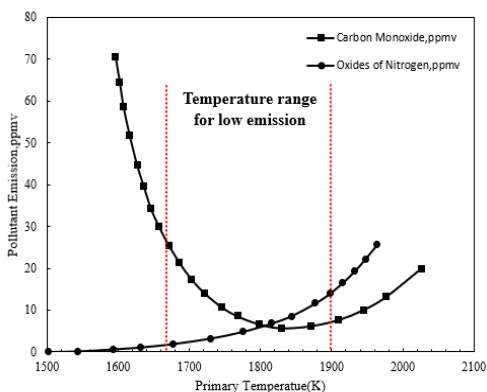
۲- کارشناس ارشد، مهندس مکانیک، واحد توسعه، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، n.safari@turbotec-co.com

۳- کارشناس ارشد، مهندس هوافضا، مدیر دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، m.soroudi@turbotec-co.com

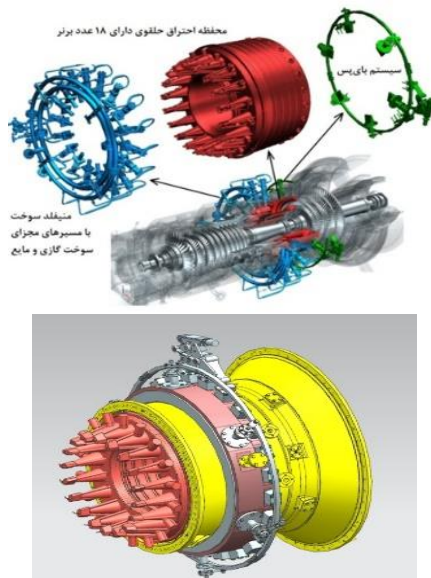
۴- کارشناس ارشد، مهندس مکانیک، معاون مهندسی، شرکت توربوتک، m.alizadeh@turbotec-co.com

* نویسنده مخاطب

در توربین IGT25 از یک سیستم الکترومکانیکی به منظور تحریک همزمان شیرهای نصب شده استفاده می‌شود.



شکل ۱: تاثیر دمای ناحیه احتراق بر آلاینده های CO و NOx [1]



شکل ۲: نمایی از جایابی سیستم بای‌پس روی مخلفه احتراق توربین IGT25

یکی از روش‌های عددی متداولی که برای پیش‌بینی آلاینده CO بکار برده می‌شود، ترکیب دو مدل احتراقی نرخ محدود/اتلاف ادی^۱ می‌باشد. بطور کلی در مدل اتلاف ادی، آشفستگی پارامتر کنترل‌کننده نرخ واکنش می‌باشد. این در حالی است که در مدل نرخ محدود، نرخ واکنش^۲ بوسیله رابطه آرنیوس^۳ محاسبه می‌شود و تاثیر آشفستگی در تبدیل‌گونه‌ها در نظر گرفته

چکیده

با توجه به اهمیت زیست محیطی کاهش آلاینده‌ها و الزامات قانونی در پایش وضعیت انتشار آلاینده‌ها در صنایع مختلف، شرکت‌های سازنده توربین همواره سعی در توسعه بهینه سیستم‌های احتراقی با آلاینده پایین دارند. مخلفه احتراق توربین گاز IGT25 از نوع نسل دوم برنهای EV می‌باشد که در کنترل آلاینده‌های NOx در بار کامل بسیار موفق بوده است ولی در بارهای جزئی، تولید آلاینده CO با مقادیر قابل توجهی صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های کاهش CO در این محدوده عملکردی استفاده از سیستم بای‌پس می‌باشد. در این مطالعه به بررسی میدان جریان درون مخلفه احتراق و محاسبه CO توربین گاز IGT25 در بار جزئی ۶۵٪ با بهره‌گیری از نرم‌افزار تجاری فلوئنت پرداخته شده است. از نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که استفاده از حدود ۲۰٪ هوای ورودی مخلفه در سامانه بای‌پس تاثیر قابل توجهی در کاهش میزان CO (حدود ۱۷ برابر کاهش نسبت به حالت عدم حضور سامانه بای‌پس) دارد.

کلمات کلیدی: IGT25، مخلفه احتراق، سیستم بای‌پس، آلاینده

مقدمه

در سال‌های اخیر گسترش بهره‌برداری از توربین‌های گازی به گونه‌ای پیش می‌رود که قوانین زیست محیطی شدیدی برای انتشار گازهای آلاینده خروجی در حال وضع می‌باشند. در کشور ما نیز این الزامات، اساس بهره‌گیری از روشی به منظور کاهش آلاینده را منجر می‌شود. با توجه به این که سطح غلظت آلاینده‌های CO و UHC در محدوده دماهای پایین (در شرایط توان پایین موتور) افزایش می‌یابد و نرخ تولید آلاینده NOx و دوده با بالا رفتن دمای شعله (در شرایط توان بالای موتور) افزایش می‌یابد، می‌بایستی از یک سری مکانیزم‌های کنترلی از قبیل تزریق آب یا بخار در مخلفه، روش کاتالیزوری، DLN و سیستم رقیق‌سازی هوا به منظور کاهش آلاینده بهره برد. شکل ۱ تاثیر تغییرات دمای آدیاباتیک شعله بر غلظت آلاینده‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱ برمی‌آید، مقادیر قابل توجهی CO در دماهای پایین‌تر از حدود ۱۶۷۰K تشکیل می‌شود. در حالی که در دماهای بالاتر از حدود ۱۹۰۰K، مقادیر بسیار زیادی NOx تولید می‌شوند و تنها در محدوده نسبتاً محدودی از دمای شعله (۱۶۷۰-۱۹۰۰K) مقادیر آلاینده‌های CO و NOx تولید شده به ترتیب کمتر از ۲۵ppmv و ۱۵ppmv می‌باشد [۱]. یکی از موارد حائز اهمیت، کاهش همزمان آلاینده‌های NOx و CO می‌باشد که می‌بایست تعادلی در این راستا صورت گیرد. بدین منظور به جهت قرار دادن دمای شعله در محدوده بهینه، از شیر بای‌پس در قسمت انتهایی لاینر مخلفه بهره‌برده می‌شود. سیستم بای‌پس با کاهش هوای ورودی به برن در شرایط بار جزئی، موجب افزایش دمای ناحیه احتراق و کاهش میزان CO می‌گردد. شکل ۲ نمایی از نحوه قرارگیری سیستم بای‌پس بر روی مجموعه را نشان می‌دهد. برای این منظور

³ Arrhenius

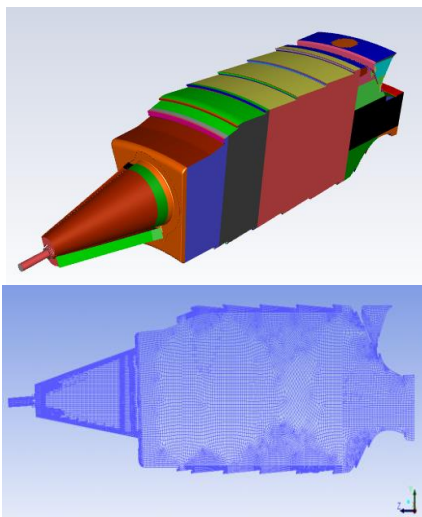
¹ Finite Rate/Eddy-Dissipation (FR-ED)

² Reaction Rate

در این مطالعه، به منظور مدلسازی جریان و تخمین آلاینده CO از مدل احتراقی FR/ED با در نظر گرفتن مکانیزم کاهیده بهینه دو گام و مدل جریان اغتشاشی (Standard) $K - \epsilon$ بهره برده شده است. در ادامه به بررسی تاثیر سیستم بای پس روی آلاینده CO و پروفیل دمای خروجی از محفظه پرداخته می شود. در مطالعات پیشین تیم حاضر، تولید آلاینده های NOx این محفظه به تفصیل بررسی شده است [۷].

هندسه و شبکه بندی

اولین گام در تحلیل های عددی تولید هندسه می باشد. به دلیل هزینه بالای محاسبات عددی، یک قطاع ۲۰ درجه از کل محفظه احتراق (معادل ۱/۱۸ هندسه محفظه) مدل شده است. در این شبیه سازی به جهت تحلیل دقیق جریان، جزئیات محفظه از قبیل برنر، مسیر پیلوت و سوراخ های سوخت اصلی، شکاف برنر، سیر حرارتی و پوسته مدل شد. شبکه بندی در نرم افزار Gambit 2.4.6 انجام شده است. تعداد المان های شبکه مدل حاضر برابر ۲۲۴۱۹۱۳ (شامل المان نامنظم) می باشد. شکل ۳ نمایی از هندسه مدل مدنظر و شبکه بندی آن را نشان می دهد.



شکل ۳: نمای شماتیک مدل محفظه احتراق و شبکه بندی

شرایط مرزی

جریان سیال ورودی به محفظه به صورت ترکیب پیش مخلوط جزئی متان- هوا در نظر گرفته شده است. همانطور که اشاره شد، شبیه سازی عددی در شرایط بار جزئی توربین در دو حالت باز و بسته بودن شیر بای پس (با فرض دبی هوا و سوخت ورودی یکسان) انجام شد. شکل ۴ شرایط مرزی جریان عبوری از محفظه احتراق را نشان می دهد. در نزدیکی دیواره شرط عدم لغزش^۹ استفاده شد.

نمی شود. تاکنون بررسی های عددی و تجربی زیادی به منظور درک بهتر روش های تخمین مقادیر آلاینده CO انجام شده است.

چی فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۲] از دو روش شبکه راکتورهای شیمیایی معادل^۱ و شبیه سازی CFD به منظور تخمین آلاینده CO بهره بردند. در روش راکتورهای معادل، از مکانیزم کامل دودکان نرمال با ۵۰۰ گونه استفاده کردند. آنها همچنین شبیه سازی عددی CFD با رویکرد RANS و با استفاده از دو مدل احتراقی نرخ محدود/اتلاف ادی و همینطور مدل مفهومی اتلاف ادی^۲ در فلوئنت انجام دادند. مکانیزم کلی بر مبنای پژوهش داگات [۳] انجام شد و قادر بود پروفیل گونه ها و سرعت شعله را به شکل خوبی در بازه ای از دما و فشار کاری مربوطه استخراج کند. آنها در بررسی خود از ۷ محفظه با نازل های سوخت یکسان با سوئیبلر، لاینر و جریان هوای ایفیوژن متفاوت بهره بردند. نتایج بررسی نشان داد که روش حل CFD به واسطه استفاده از یک مکانیزم دقیق با تعداد واکنش های کمتر، منجر به تحلیل سینتیکی دقیق تری نسبت به مدل شبکه راکتور شد.

وگنر و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴] به بررسی عددی محفظه احتراق توربین گازی SGT-800 پرداختند. آنها به منظور پیش بینی آلاینده CO در بار جزئی توربین به شبیه سازی احتراق پیش آمیخته جزئی^۳ و بهره گیری از مدل سرعت شعله آشفته^۴ پرداختند. این مدل بر مبنای تفکیک اکسیداسیون آهسته تر CO، با در نظر گرفتن روش جدا سازی مقیاس زمانی سریع^۵ (در ناحیه پایدار سازی شعله پیش آمیخته) و کند (در ناحیه پسا شعله) صورت می پذیرد. این روش با افزودن یک معادله بعنوان معادله متغیر پیشرفت واکنش به شبیه سازی شعله پیش آمیخته آشفته می پردازد. سادگی و نتایج دقیق این روش آن را بعنوان یکی از بهترین مدل ها به منظور شبیه سازی احتراق پیش آمیخته آشفته معرفی می کند. نتایج شبیه سازی آنها نشان داد که تغییرات مقادیر CO بدست آمده از حل عددی (با در نظر گرفتن مدل TSS) نسبت به دمای ناحیه اصلی احتراق داده های آزمایشگاهی، به خوبی تخمین زده شد.

جلا و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۵] به بررسی عددی محفظه احتراق موتور توربین گازی RB211-DLE به جهت دستیابی به تغییرات دمای محفظه و تخمین آلاینده CO پرداختند. آنها به منظور مدلسازی اثر آشفته گی بر احتراق، از ترکیب دو مدل LES و RANS بهره بردند. به منظور مقایسه دو مدل آشفته در برآورد پایداری شعله، از رویکرد تابع چگالی احتمال^۶ و مدل زیمونت^۷ و همینطور به جهت پیش بینی میزان آلاینده، از مدل FR-ED با در نظر گرفتن مکانیزم کاهش یافته ۸ گام نووزیلف^۸ استفاده نمودند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که پایداری شعله و تغییرات دمایی با استفاده از مدل اغتشاشی RANS اختلاف قابل توجهی با داده های تجربی دارد. این مدل قادر به پیش بینی صحیحی از موقعیت شعله در محفظه RB211 نبود. آنها همچنین نشان دادند که مدل LES به خوبی پایداری شعله و میزان آلاینده CO را پیش بینی می کند. کازالنس و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۶] به بررسی عددی محفظه احتراق توربین در دو حالت کاری توان بالا و پایین با بهره گیری از مدل آشفته گی RANS و مدل احتراقی تابع چگالی احتمال برای ۹۱ گونه با در نظر گرفتن ۱۳۲۹ واکنش شیمیایی پرداختند. نتایج مطالعه موید تطابق خوبی بین تحلیل عددی و داده های تجربی بود.

⁶ Probability Density Function (PDF)

⁷ Zimont

⁸ Novoselov

⁹ No Slip Condition (NSC)

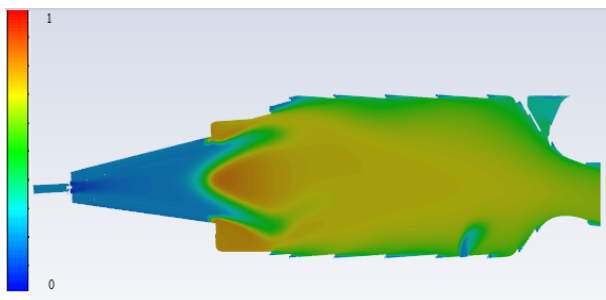
¹ Equivalent Chemical Reactor Network (ECRN)

² Eddy Dissipation Concept (EDC)

³ Partially Premixed Combustion Model

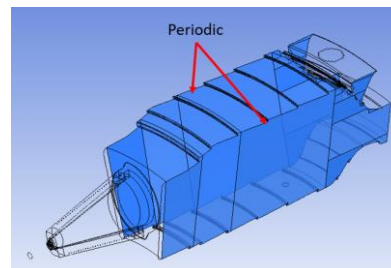
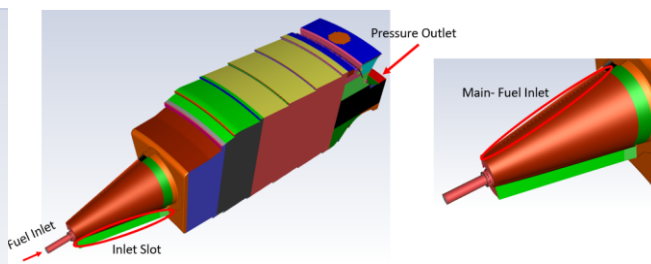
⁴ Burning Velocity Model (BVM)

⁵ Time Scale Separation Model (TSS)



شیر بای پس بسته

شکل ۵: کانتور توزیع دمای بی بعد در صفحه میانی از محفظه احتراق کانتور توزیع گونه CO و تاثیر سیستم بای پس بر روی آن، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، در حالت بسته بودن شیر بای پس، انتشار آلاینده افزایش نسبی داشته است. اما در حالتی که شیر باز می شود، انتشار آلاینده به نوعی کنترل شده و مقدار کلی آن در طول محفظه کاهش پیدا می کند.



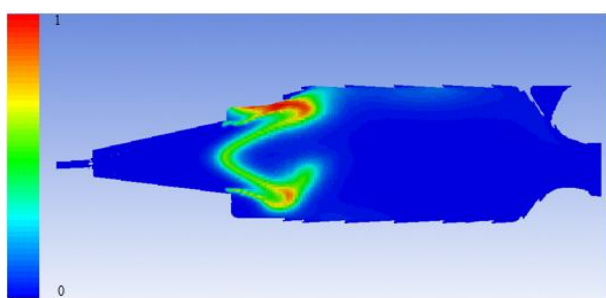
شکل ۴: شرایط مرزی اعمالی به هندسه مدل طراحی شده

معادلات پایداری مومنتوم، انرژی و همینطور مکانیزم سینتیک شیمیایی در نرم افزار فلونت مورد تحلیل قرار گرفت. جدول ۱ تنظیمات حل گر نرم افزار فلونت و الگوریتم های کولپینگ را تشریح می دهد.

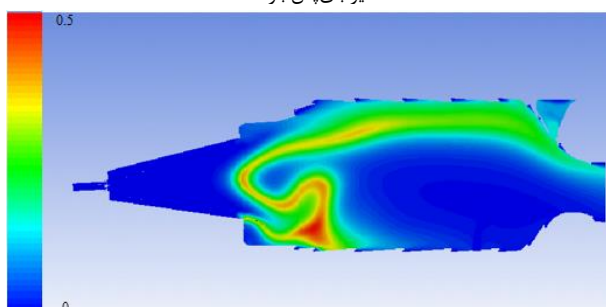
جدول ۱: تنظیمات حلگر	
$K - \epsilon(Standard)$	مدل آشفتگی جریان
$Species Transport(FR/ED)$	مدل احتراق آشفته
$modified two - step[7]$	مکانیزم شیمیایی
$Simple$	الگوریتم کولپینگ سرعت و فشار
$Second order - Upwind$	گسسته سازی ترم معادلات مومنتوم، انرژی، چگالی، انرژی جنبشی توربولانس

تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج شبیه سازی محفظه در دو حالت باز و بسته بودن شیر بای پس بررسی شده است. شکل های ۵ و ۶ توزیع کانتوری دما را در حالت های با و بدون شیر بای پس در صفحه مرکزی محفظه احتراق نشان می دهد. همانطور که در شکل ۵ دیده می شود، دمای بیشینه و میانگین محفظه احتراق در حضور سیستم بای پس نسبت به عدم حضور آن، افزایش داشته است. این افزایش دما بدلیل کاهش دبی هوا در برتر و همچنین افزایش نسبت سوخت به هوا می باشد.



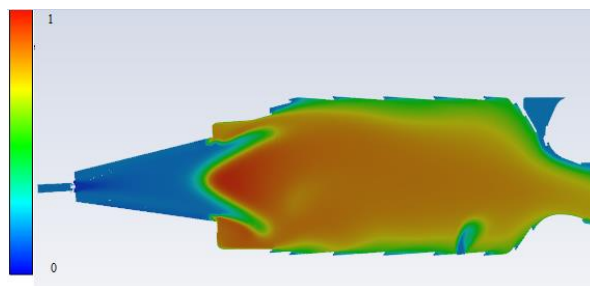
شیر بای پس باز



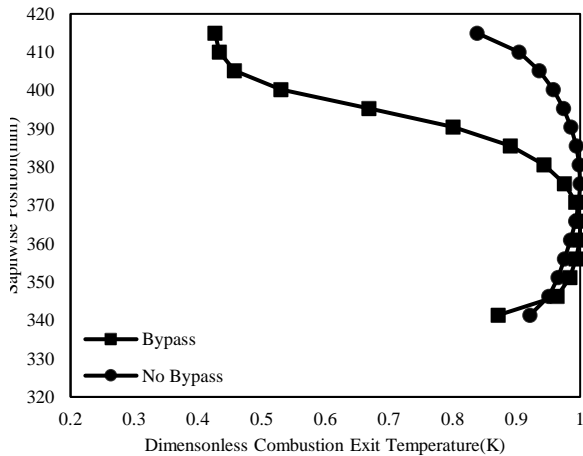
شیر بای پس بسته

شکل ۶: کانتور توزیع کسر جرمی بی بعد گونه CO در صفحه میانی از محفظه احتراق

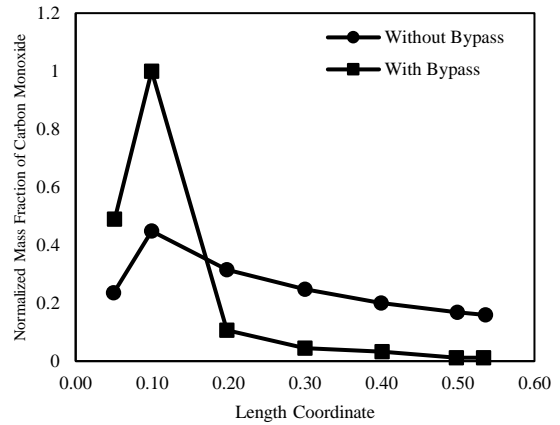
بررسی میانگین وزنی میزان آلاینده CO در صفحات میانی محفظه، نشان داد که در طول محفظه این آلاینده در حضور شیر بای پس کاهش چشمگیری پیدا می کند. شکل ۷ توزیع گونه CO را در طول محفظه نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، در ابتدا بدلیل ایجاد شعله غیرپیش آمیخته، میزان آلاینده CO بالا می رود و سپس با تغییر نسبت سوخت پایلوت به سوخت کل و تشکیل شعله پیش آمیخته رقیق و همینطور بهره گیری از سیستم بای پس میزان CO کاهش مطلوبی می کند.



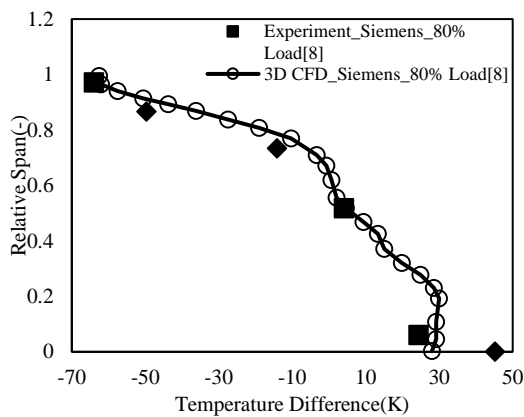
شیر بای پس باز



شکل ۹: تاثیر شیر بای پس روی پروفیل دمای خروجی از محفظه



شکل ۷: مقایسه تغییرات کسر جرمی بی بعد گونه CO در حالت های باز و بسته بودن بای پس



شکل ۱۰: مقایسه توزیع اختلاف دما تحلیل عددی با داده های آزمایشگاهی در دو حالت بار جزئی [۸]

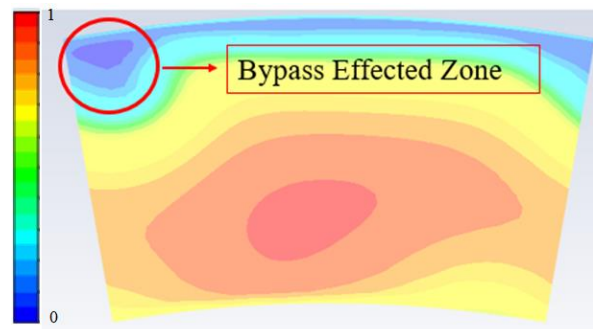
با توجه به تاثیر سیستم بای پس روی الگوی دمای خروجی و علم به طراحی توربین های گازی در بار کامل، نگرانی در خصوص اثر دمای خروجی محفظه روی عمر پره های استاتور و روتور در بار جزئی احساس نمی شود. شکل ۸ توزیع دمای خروجی از محفظه را در دو حالت باز و بسته بودن شیر عملگر بای پس نشان می دهد. شکل ۹ تاثیر شیر بای پس در خروجی محفظه را نشان می دهد. همانطور که از شکل ۹ برمی آید، با باز شدن شیر بای پس و ورود هوای خنک کننده، نیمه بالایی پره های توربین محدود دمای پایینی را نسبت به عدم حضور سیستم بای پس تجربه می کند. شکل ۱۰ توزیع دمای خروجی محفظه در دو حالت ۶۵٪ بار (تحلیل حاضر) و ۸۰٪ بار (توربین گازی SGT-600 زیمنس) را نشان می دهد [۷]. می توان گفت با افزایش میزان بار کارکرد توربین هوای کمتری از شیر بای پس در محفظه وارد می گردد و عملاً اختلاف دمای شعله در حضور و عدم حضور سیستم بای پس نسبت به حالت بار جزئی توربین کمتر خواهد بود.

نتیجه گیری

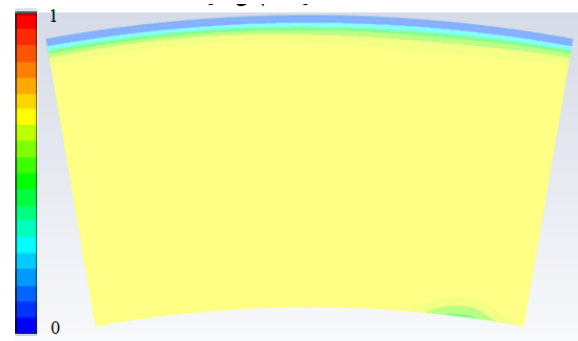
در این پژوهش تاثیر سامانه بای پس در کاهش آلاینده های CO در توربین گاز ملی IGT25 با استفاده از روش های عددی پرداخته شد. نتایج تحلیل نشان داد که بهره گیری از حدود ۲۰٪ هوای ورودی محفظه در بار جزئی در سامانه بای پس تاثیر بسیار مطلوبی روی کاهش آلاینده کربن مونوکسید (حدود ۱۷ برابر کاهش) می گذارد.

مراجع

- 1- A. H. Lefebvre and D. R. Ballal, "Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions," Third. s.l. : CRC Press (Taylor & Francis Group), 2010. Third.
- 2- F. Xu, V. Nori, and J. Basani, "CO Prediction for Aircraft Gas Turbine Combustors," Volume 1A: Combustion, Fuels and Emissions, Jun. 2013.
- 3- Dagaut P, Cathonnet M. The ignition, oxidation, and Combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. Progress in energy and Combustion science. 2006 Jan 1;32(1):48-92.
- 4- B. Wegner, U. Gruschka, W. Krebs, Y. Egorov, H. Forkel, J. Ferreira, and K. Aschmoneit, "CFD Prediction of Partload CO Emissions Using a Two-Timescale Combustion Model," Volume 2:



شیر بای پس باز



شیر بای پس بسته

شکل ۸: مقایسه کانتوری تاثیر شیر بای پس روی توزیع دمای خروجی محفظه

- Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B, 2010.
- 5- S. Jella, P. Gauthier, and M. Paraschivoiu, "CFD Predictions of CO Emission Trends in an Industrial Gas Turbine Combustor," Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B, 2010
 - 6- M. Cazalens, M. Rullaud, and J. P. Frenillot, "Computational Methodology for Carbon Monoxide Emission for Aeroengine Combustor Design," Journal of Propulsion and Power, vol. 24, no. 4, pp. 779-787, Jul. 2008.
 - 7- M. Shahsavari, M. Soroudi, M. Yazdani, S. Montazerinejad, Y. Bagheri, "CO pollutant Prediction of a Stationary Gas Turbine Combustor Using Finite Rate Eddy Dissipation Combustion Model," Journal of Fuel and Combustion, vol.10, no. 21, pp. 33-49, winter 2018.
 - 8- Sundberg, J. Detailed Hot Section Mapping of Siemens SGT600, SE-612 83 Finspong, Sweden, Siemens 2008