

مدل سازی فرآیند اشتعال جرقه و تخمین محدوده اشتعال در موتورهای توربین گاز

سارا منتظری نژاد

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
s.montazerinejad@turbotec-co.com

احسان ملاحسنزاده

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
e.hassanzadeh@turbotec-co.com

محمدعلی سرودی

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

سجاد رضایت

دپارتمان محفظه، شرکت توربوتک، گروه OTC
s.rezayat@turbotec-co.com

چکیده

می‌باید. بر خلاف اشتعال اجباری، در فرآیند خوداشتعالی منبع متمرکز برای اشتعال وجود نداشته و کل مخلوط به صورت همزمان دچار آفرز می‌شود. در حال حاضر، منابع اشتعال کاربردی در موتورهای توربین گاز عمدتاً عبارتند از (الف) اشتعال جرقه^۳ (ناشی از تخلیه الکتریکی یا لیزر)، و (ب) اشتعال تورچ^۴ (شعله یا پلاسما). جرقه الکتریکی متعارف‌ترین فرم اشتعال در موتورهای توربین گاز است. سیستم اشتعال جرقه الکتریکی از سه مولفه اصلی تشکیل شده است که عبارتند از واحد مولد ولتاژ (اکسایتر)، کابل‌های رابط، و پلاگ آتشنه (شمع). به طور خلاصه، انرژی ذخیره شده در سیستم تغذیه (اکسایتر) از طریق کابل رابط به نوک پلاگ رسیده و تخلیه انرژی در پلاگ موجب تشکیل هسته پلاسما می‌گردد. الکترودها قسمت اصلی (کرنل^۵) خودپیش‌رونده در مخلوط واکنشی می‌گردند. الکترودها قسمت اصلی پلاگ (شمع) سیستم جرقه الکتریکی به شمار آمده و در این ناحیه جرقه به وجود می‌آید. ویژگی اصلی این روش اشتعال، امکان تخلیه انرژی در مدت زمانی کوتاه و به صورت متمرکز در ناحیه جرقه است. همچنین در این روش اشتعال، فرکانس، مدت و مقدار انرژی به راحتی قابل کنترل است.

مطالعات مختلف نشان داده است که تخلیه الکتریکی و تشکیل کرنل یا هسته اولیه شعله در طی سه مرحله اصلی شکست^۶، تخلیه قوس^۷ و تخلیه تابناک^۸ رخ می‌دهد که مدت هر یک از این سه مرحله وابسته به مشخصات سیستم اشتعال است. اشتعال جرقه در محفظه‌های احتراق حلقوی موتورهای توربین گاز در سه فاز مجزا انجام می‌شود. در فاز اول با شروع فرآیند تخلیه و طی مراحل شکست، تخلیه قوس و تخلیه تابناک، یک هسته شعله با سایز و دمای کافی جهت انتشار و گسترش تشکیل می‌یابد. در فاز دوم، این هسته

در این نوشتار، عملکرد اشتعال جرقه در محفظه احتراق حلقوی یک توربین گاز صنعتی با رویکردی مشتمل بر گام‌های اصلی زیر ارزیابی شده است: (الف) حل LES میدان جریان سرد (غیرواکنشی) محفظه، (ب) استفاده از نتایج LES و مدل‌سازی مسیره‌های محتمل انتشار شعله ناشی از جرقه شمع، و (ج) تکرار محاسبات و تدوین مپ اشتعال توربین. کلیه محاسبات با استفاده از متان خالص به عنوان سوخت انجام گردیده است. با استفاده از این روش می‌توان آثاری از قبیل مکان شمع و مشخصات سیستم اشتعال، و شرایط محیطی و کاری توربین بر عملکرد اشتعال موتور را با دقتی مطلوب مورد ارزیابی قرار داد و ماهیت تصادفی اشتعال جرقه را به نحوی مناسب مدل‌سازی کرد. با استفاده از این ابزار همچنین می‌توان تاثیر نوع و ترکیب سوخت بر عملکرد سیستم اشتعال توربین گاز را مطالعه نمود. همچنین بررسی دقیق اثر ساختار هندسی محفظه و برنر بر احتمال اشتعال نیز با استفاده از این ابزار قابل انجام است. کلمات کلیدی: توربین گاز، اشتعال جرقه، احتمال اشتعال، محدوده اشتعال رقیق، مدل‌سازی محاسباتی

مقدمه

اشتعال را می‌توان فرآیند انتقال مواد قابل احتراق از حالت غیرواکنشی به حالت احتراق خودنگه‌دار دانست. اشتعال، فرآیندی ذاتاً ناپایا بوده با تعامل پیچیده‌ای از پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی همراه است. اشتعال در یک محیط واکنشی به دو طریق کلی قابل حصول است که عبارتند از اشتعال اجباری^۱ (القایی) و خوداشتعالی^۲. اشتعال اجباری عبارتست از فرآیند آفرز محلی بخشی از یک مخلوط با استفاده از محرک‌های خارجی. در طی این فرآیند، به طور معمول حجم کوچکی از مخلوط توسط سیستم اشتعال مشتعل شده و در صورت وجود شرایط لازم، شعله به طور خود به خود در کل سیستم گسترش

³ Spark ignition

⁴ Torch ignition

⁵ Kernel

⁶ Breakdown

⁷ Arc discharge

⁸ Glow discharge

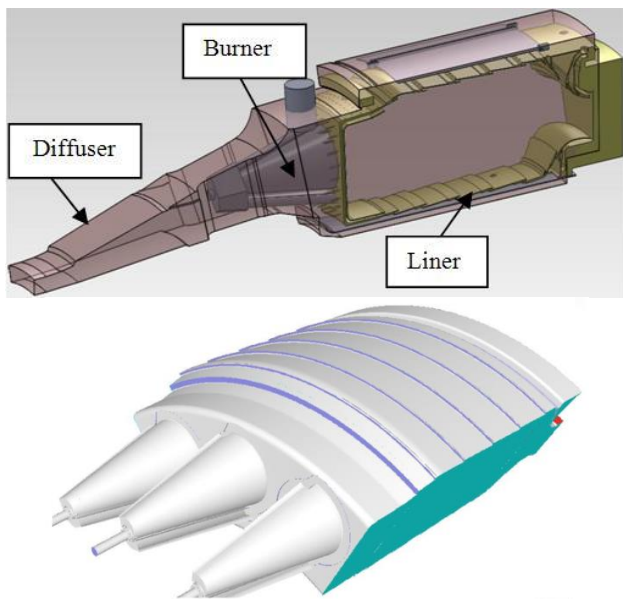
¹ Forced (induced) ignition

² Self- or auto-ignition

است. اتوماتای سلولی شامل یک شبکه منظم از سلول‌ها می‌باشد که هر یک تعداد محدودی از حالات را دارند (مثلا سرد یا سوخته). با تعریف قوانینی که حالت سلول را از حالت سرد به حالت سوخته تبدیل می‌کنند، می‌توان انتشار شعله را مدل‌سازی نمود. حل CFD میانگین زمانی جریان سرد به عنوان ورودی مدل مورد نیاز می‌باشد که این حل CFD می‌تواند از طریق حل RANS یا از طریق میانگین‌گیری زمانی حل‌های LES تولید شود. سپس مدل از رویکرد مونت کارلو^{۱۲} برای شناسایی محدوده کامل حرکت‌های محتمل ذرات شعله پس از تولید هسته جرقه استفاده نموده و در واقع فاز گسترش شعله از فرآیند اشتعال را مدل‌سازی می‌کند. معادلات حاکم بر حرکت ذرات، همان معادلات استاندارد توصیف لاگرانژی اختلاط آشفته است. در مطالعات پیشین جزئیات مدل و صحت‌گذاری نتایج آن در یک برنر آزمایشگاهی ارایه گردیده [۹] و نحوه کاربرد این روش در تخمین عملکرد اشتعال یک توربین گاز صنعتی در این نوشتار ارایه شده است.

هندسه و شرایط کاری

هدف از انجام این مطالعه تعیین محدوده اشتعال محفظه احتراق یک توربین صنعتی با سوخت گاز طبیعی می‌باشد. محفظه احتراق توربین گاز مزبور از نوع حلقوی بوده و دارای ۱۸ عدد برنر است. نمایی از مقطع تک برنری محفظه احتراق مزبور در شکل ۱ ارایه شده است. البته محاسبات مربوط به محدوده اشتعال، با استفاده از پیکربندی محفظه احتراق سه برنری (قطاع ۶۰ درجه محفظه احتراق اصلی) انجام گرفته است. نمایی از مقطع سه برنری نیز در شکل ۱ ارایه گردیده است.



شکل ۱ - نمایی از مقطع تک برنری به همراه دیفیوزر ورودی (بالا) و قطاع سه برنری بدون دیفیوزر (پایین) محفظه احتراق حلقوی

شعله گسترش یافته و انتشار پیوسته شعله از این هسته به تمام ناحیه اصلی احتراق برنر مورد نظر صورت می‌پذیرد. در نهایت در فاز سوم، شعله از برنر مشتعل به سایر برنرها منتقل شده و کل فضای احتراق با شعله پر می‌شود و در انتهای این فاز اشتعال عرضی^۹، شعله در تمام برنرهای فضای احتراق پایدار می‌گردد.

به دلیل حضور آشفته‌گی در غالب سامانه‌های احتراق کاربردی، اشتعال پدیده‌ای ذاتا تصادفی است. بنابراین برای کمی‌سازی و ارزیابی این پدیده، از ابزار آماری استفاده می‌شود. بدین منظور عموماً دو متغیر آماری مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از انرژی کمینه اشتعال^{۱۰} (MIE) و احتمال اشتعال (P_{ign}). متغیر احتمالاتی MIE نشان دهنده حداقل مقدار انرژی مورد نیاز جهت حصول ۵۰٪ اشتعال موفق بوده و برای تعیین آن باید آزمایش‌های اشتعال را به تعداد زیادی برای یک شرایط تست معین تکرار نمود. این متغیر عموماً در ارزیابی عملکرد اشتعال جرقه در سیستم‌های پیش‌آمیخته مورد استفاده قرار گرفته و تعیین آن نیز در شرایط کاملاً پیش‌آمیخته صورت می‌پذیرد [۱]. از سوی دیگر، متغیر P_{ign} عموماً در محیط‌های غیر پیش‌آمیخته مورد استفاده قرار گرفته و برای تعیین آن باید تعداد رخداد‌های اشتعال موفق را بر تعداد کل تلاش‌های جرقه‌زنی تقسیم نمود [۲].

برای ارزیابی عددی احتمال اشتعال در میدان‌های جریان آشفته دو رویکرد مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در رویکرد اول، فرآیند اشتعال از انتهای فاز تخلیه انرژی و تشکیل کرنل اولیه تا پایدارسازی نهایی شعله مستقیماً شبیه‌سازی می‌گردد [۳]. به دلیل نیاز به تکرار محاسبات برای شرایط اولیه مختلف جهت محاسبه احتمال اشتعال، پیاده‌سازی این روش در سیستم‌های صنعتی بسیار زمان‌بر خواهد بود. در رویکرد دوم، تنها یک حل عددی جریان غیرواکنشی مورد استفاده قرار گرفته و احتمال اشتعال با استفاده از خروجی‌های همین حل محاسبه می‌گردد [۵و۴]. اگرچه در این روش فرضیات مختلفی اعمال می‌گردد ولیکن مطالعات قبلی نشان داده که استفاده از رویکرد مزبور به جواب‌های مهندسی قابل قبول منجر می‌گردد.

پس از بررسی جامع رویکردهای مختلف مدل‌سازی فرآیند اشتعال جرقه و بررسی مزایا و معایب این رویکردها، در این نوشتار مدلی مهندسی برای تخمین عملکرد سیستم اشتعال جرقه و تدوین محدوده اشتعال برای کاربردهای توربین گاز انتخاب و پیاده‌سازی شده است. روش مزبور پیش‌تر برای ارزیابی سیستم جرقه‌زن در محفظه احتراق توربین‌های گاز صنعتی [۶] و هوایی [۷و۸] به کار گرفته شده است. در مدل حاضر مواردی از قبیل اتفاقی بودن کسر مخلوط و سرعت در حین جابجا شدن شعله توسط جریان، محدوده‌های شعله‌وری و سرعت‌های سوزش لایه‌ای، خاموشی محلی هسته شعله ناشی از نرخ کرنش آشفته بالا، و انتشار شعله توسط سرعت میانگین و سرعت اغتشاشی لحاظ گردیده است. چنین نیازمندی‌هایی مناسب جریان‌های دارای نواحی بازچرخش مشابه محفظه‌های احتراق توربین گاز است.

ایده اصلی مدل حاضر بر مبنای مفهوم اتوماتای سلولی^{۱۱} بوده که قبلاً در شبیه‌سازی انتشار شعله‌های پیش‌آمیخته مورد استفاده قرار گرفته

⁹ Cross-ignition or light-around

¹⁰ Minimum ignition energy

¹¹ Cellular automata

¹² Monte Carlo

شرایط محیطی مورد بررسی شامل دمای محیط ۱۰- تا ۵۰+ درجه سانتی‌گراد و فشار محیط ۰/۸ تا ۱/۰ بار بوده و درصد رطوبت معادل شرایط استاندارد (۶۰٪) انتخاب گردیده است. سوخت گاز طبیعی نیز معادل متان خالص فرض شده است. مطالعات پیشین نشان داده است که سوخت متان خالص نسبت به تمام انواع ترکیبات گاز طبیعی خط لوله ایران، کمترین میزان واکنش‌پذیری را داشته و با استفاده از این سوخت می‌توان "حداقل" احتمال اشتعال را برای تمام خانواده‌های سوخت گاز طبیعی ایران محاسبه نمود [۱۰].

سیستم اشتعال جرقه

در این مطالعه دو نوع سیستم اشتعال مورد ارزیابی قرار گرفته که هر دو سیستم اشتعال از خانواده خازنی انرژی‌بالا و ولتاژپایین (۲ کیلوولت) می‌باشند. سیستم اشتعال اول محصول شرکت Vibro-Meter است. انرژی اکسایتر این سامانه ۸ ژول و نرخ جرقه‌زنی آن دو جرقه در ثانیه می‌باشد. نوع پلاگ مورد استفاده نیز از نوع تخلیه سطح با آتش فرورفته^{۱۳} می‌باشد. سیستم اشتعال دوم محصول شرکت SMITSVONK بوده و انرژی اکسایتر و نرخ جرقه‌زنی آن به ترتیب ۱۲ ژول و سه جرقه در ثانیه می‌باشد. پلاگ مورد استفاده در این سیستم اشتعال نیز از نوع تخلیه سطح با آتش همسطح^{۱۴} می‌باشد. در شکل ۲ جزئیات دو سیستم اشتعال مزبور مقایسه شده و شکل پلوم جرقه هر دو سیستم نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تمام محاسبات فرض شده است که تنها ۲۵٪ انرژی اکسایتر به جرقه منتقل می‌گردد. بدین ترتیب با داشتن مشخصات میدان جریان و فرض کرنل کروی شکل می‌توان به راحتی سایز کرنل اولیه را محاسبه نمود. با استفاده از فرضیات مرجع [۱۱] در شرایط جرقه‌زنی توربین مورد مطالعه، قطر کرنل اولیه برای دو سیستم اشتعال ۸ و ۱۲ ژولی مورد نظر به ترتیب حدود ۲۵ و ۲۹ میلی‌متر تخمین زده شده است. همچنین با استفاده از روش مرجع [۵] مشخص شده است که در شرایط کاری توربین مورد نظر و به دلیل بالا بودن انرژی اکسایتر همواره کرنل اولیه تشکیل می‌گردد. از سوی دیگر تنها اشتعال برنر شماره ۶ (برنر میانی در مقطع سه‌برنری شکل ۱) در کانون توجه بوده و اشتعال عرضی کل محفظه در این مطالعه مورد توجه قرار نگرفته است. به بیان علمی‌تر، تمرکز این مطالعه بر فاز دوم اشتعال جرقه بوده است.

همان‌گونه که اشاره گردید، محفظه احتراق مورد بحث از نوع حلقوی و دارای ۱۸ عدد برنر DLE از نوع EV می‌باشد. این برنر دارای دو مسیر سوخت‌رسانی مجزا موسوم به مسیرهای پایلوت و اصلی می‌باشد. در طی فرآیند اشتعال، مسیر جریان گاز اشتعال (برنر شماره ۶) با باز شدن شیر مرتبط تا فشار کامل پر می‌شود. پس از پر شدن مسیر، پلاگ جرقه شروع به کار نموده و با باز شدن شیرهای مربوطه، گاز به قسمت اصلی برنر شماره ۶ هدایت می‌شود. شعله برنر شماره ۶ به وسیله دتکتور شعله مانیتور شده و در صورت تشخیص حضور شعله، جریان سوخت گاز از مسیر اصلی برنر شماره ۶ به مسیر پایلوت آن منتقل می‌شود. در نهایت اشتعال عرضی در تمام محفظه صورت می‌گیرد. مدت زمان حصول اشتعال برنر شماره ۶ حداکثر ۱۰ ثانیه و مدت زمان اشتعال عرضی کل محفظه حداکثر ۳ ثانیه می‌باشد. برای اشتعال ابتدا بایستی ترکیب مناسبی از سوخت و هوا تامین شود. کنترل نسبت سوخت و هوا در اولین راهاندازی توربین و به صورت دستی انجام پذیر است. مطابق اطلاعات توربین، با استفاده از سیستم اشتعال Vibro-Meter حدود ۲۵ گرم بر ثانیه گاز طبیعی برای اشتعال در شرایط ایزو مورد نیاز است.

رویکرد مدل‌سازی

گام‌های اساسی در مدل تصادفی اشتعال جرقه به روش تعقیب ذره مونت‌کارلو در مرجع [۶] ارائه شده است. مدل تصادفی اشتعال جرقه در چند گام اصلی اجرا می‌گردد. ابتدا میدان جریان با سلول‌های شبکه منظم با سایز منتج از حل عددی میدان جریان شبکه‌بندی می‌گردد. این سلول‌های شبکه می‌توانند سه حالت سرد، سوخته و یا خارج از ناحیه شعله‌وری داشته باشند. در ابتدا تمام سلول‌های قرار گرفته در ناحیه شعله‌وری، در حالت سرد قرار دارند. شبیه‌سازی با تعریف یک حجم جرقه در دامنه حل شروع می‌شود. حجم اولیه جرقه از ویژگی‌های سیستم اشتعال مورد استفاده و یا داده‌های تجربی به دست می‌آید. سلول‌هایی که با حجم جرقه مرز مشترک دارند، در صورتی که در ناحیه‌ی شعله‌وری قرار گرفته باشند، به حالت سوخته تبدیل شده و هر کدام از آنها یک ذره شعله آزاد می‌کنند. در صورتی که سلولی که با جرقه مرز مشترک دارد بیرون از ناحیه‌ی شعله‌وری قرار گرفته باشد، سلول، ذره‌ای غیرفعال با دمای بالا تولید خواهد کرد.

ذرات ایجاد شده با استفاده از مدل معادله دیفرانسیل تصادفی لانژوین^{۱۵} ساده‌شده درون میدان جریان سرد تعقیب می‌شوند که برای حل عددی این معادله تصادفی از رویکرد اویلر-مارویاما^{۱۶} استفاده شده است. برای ذرات غیرفعال، علاوه بر معادله‌ی مذکور، معادله‌ی حافظه گرمایی^{۱۷} نیز حل می‌گردد. در این صورت به ذره فرصتی داده می‌شود تا قبل از خاموش شدن به ناحیه‌ی شعله‌وری بازگردد. در واقع ذره تا زمانی که دمایی بالاتر از یک دمای بحرانی پیش فرض داشته باشد، روشن خواهد بود. این زمان به سرعت حرکت و کسر مخلوط ذره وابسته می‌باشد.



شکل ۲ - مقایسه مولفه‌های دو سیستم اشتعال مورد بررسی و سایز پلوم آنها

¹⁵ Langevin

¹⁶ Euler-Maruyama

¹⁷ Thermal memory

¹³ Sunken fire surface discharge plug

¹⁴ Flush fire surface discharge plug

هوای خنک‌کاری محفظه به صورت شیار در نظر گرفته شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها در حالت غیرواکنشی و با حضور سوخت انجام شده‌اند.

سوخت در این محفظه سه برنری تنها از مسیر اصلی برنر مرکزی تزریق می‌گردد. در ورودی‌های هوا از پروفیل‌های مناسب استفاده شده و تمام خواص به صورت تابعی از دما فرض شده‌اند. برای حل عددی ابتدا شبیه‌سازی RANS پایای محفظه با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ Realizable انجام گردیده است. کلیه گسسته‌سازی‌های مکانی با روش QUICK صورت گرفته به جز متغیر فشار که گسسته‌سازی آن از نوع مرتبه دوم است. پس از استخراج نتایج حل پایا، شبیه‌سازی LES انجام گرفته است. در شبیه‌سازی‌های LES نیز گسسته‌سازی مکانی مونتوم و انرژئی با روش تفاضل مرکزی محدودشده (BCD) و فشار با روش گسسته‌سازی مرتبه دوم صورت گرفته و سایر متغیرها با روش QUICK گسسته‌سازی شده‌اند. گسسته‌سازی زمانی نیز با روش مرتبه دوم ضمنی انجام گرفته است. برای همگرایی هر گام زمانی ۱۰ تکرار لحاظ شده و کل زمان محاسبات حدود ۰/۰۲ ثانیه بوده است (حدود ۳ برابر زمان جابجایی یا L/U). در اجرای حل ناپایا ابتدا معادل ۰/۰۲ ثانیه حل انجام شده تا نوسانات آشفته به نحو مطلوب تولید گردد و آثار ناشی از حل اولیه نیز حذف شود. سپس به مدت ۰/۰۲ نیز حل ادامه یافته و در طول این مدت نمونه‌برداری از میدان حل و میانگین‌گیری فعال شده است. کلیه شبیه‌سازی‌های ناپایا با گام زمانی 2×10^{-5} ثانیه (گام زمانی بی‌بعد حدود $t/U.D=0/01$) انجام شده است و بدین ترتیب ۱۰۰۰ گام زمانی قبل از میانگین‌گیری و ۱۰۰۰ گام زمانی در طی میانگین‌گیری حل شده است.

سایز شبکه محاسباتی نیز به دقت انتخاب گردیده تا پدیده‌های کلیدی به صورت کامل مدل‌سازی شوند. بدین منظور حداکثر سایز مش در برنر و خروجی آن و همچنین در لایه‌های برشی و نواحی اختلاط محفظه حدود ۱ میلی‌متر و در ناحیه پایدارسازی شعله کمتر از ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. همچنین حداقل حدود ۱۰ سلول در خروجی سوراخ‌های سوخت لحاظ شده تا تزریق و اختلاط سوخت با دقت مناسبی مدل‌سازی شود. حداکثر سایز بی‌بعد شبکه (Δ_{max}/D) در ناحیه اصلی احتراق نیز کمتر از ۰/۰۲ انتخاب گردیده است. در شبیه‌سازی عددی، آشفتگی LES با مدل زیرشبکه اسمگورینسکی-لیلی^{۲۱} مدل‌سازی شده است.

شرایط مرزی در ورودی‌های سوخت و هوا جهت مدل‌سازی جریان سرد محفظه احتراق توربین گاز مورد نظر، شامل شرط مرزی پروفیل دبی و جهت جریان در شکاف‌های برنر، نرخ جریان جرمی در سوراخ‌های خنک‌کاری و شرط مرزی گرادیان فشار صفر در خروجی می‌باشد. پروفیل دبی در شکاف‌های برنر با مدل‌سازی کامل محفظه و دیفیوزر به دست آمده است. با توجه به مورد نیاز بودن حل سرد میدان جریان و ثابت بودن دما در کل میدان، شرط مرزی معادله انتقال انرژئی در دیواره‌ها اثری در حل نداشته و از این رو دیواره‌ها آدیاباتیک و با فرض عدم لغزش مدل شده‌اند. شرایط کاری محفظه در لحظه اشتعال نیز از اطلاعات میدانی توربین گاز و شبیه‌سازی دینامیکی سیکل حاصل گردیده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، دستگاه معادلات حاکم با استفاده از روش SIMPLE و براساس شیوه فشارمینا حل شده‌اند.

سرعت و کسر مخلوط ذره دارای مقادیر میانگین و مولفه اتفاقی است که از حل CFD تعیین می‌شوند. در هر نقطه در طی مسیر ذره، امکان خاموش شدن ذره وجود دارد و در صورت خاموش شدن، محاسبات ذره نیز متوقف خواهد شد. معیار خاموشی ذرات فعال بر اساس عدد کارلویتز^{۱۸} تعیین می‌شود که مبنای محاسبه آن ویژگی‌های آشفتگی و نسبت هم‌ارزی می‌باشد. هر زمان که یک ذره، یک سلول شبکه در حالت سرد را ملاقات می‌نماید، آن سلول به حالت گرم تغییر وضعیت داده و یک ذره جدید، با سرعت و کسر مخلوط خود، از مرکز سلول شبکه گسیل شده و سپس پیمایش اتفاقی یا تصادفی خود را دنبال می‌کند. در این شرایط نیز اگر ذره شعله (فعال) از محدوده شعله‌وری خارج شود، تبدیل به یک ذره غیرفعال شده و برای آن ذره نیز معادله حافظه‌ی گرمایی حل خواهد شد.

در طی شبیه‌سازی، نسبت تعداد سلول‌هایی که در حالت سوخته قرار دارند به کل تعداد سلول‌های شبکه (یعنی کسر حجم مشتعل شده) به صورت تابعی از زمان محاسبه می‌گردد. این نسبت فاکتور پیشرفت اشتعال نامیده می‌شود (Π_{ign}). در انتهای شبیه‌سازی، فاکتور پیشرفت اشتعال با یک مقدار آستانه مقایسه می‌شود تا حصول اشتعال موفق مورد ارزیابی قرار گیرد.

محاسبات چندین بار تکرار می‌شود. با تکرار این محاسبات برای موقعیت‌های مختلف جرعه، نقشه یا مپ احتمال اشتعال تولید شده و سپس می‌توان این نقشه را مستقیماً با نتایج تجربی مقایسه نمود. علاوه بر این برای یک نقطه اشتعال ثابت نیز می‌توان اثر عوامل مختلف از قبیل مشخصات سیستم اشتعال، نوع و ترکیب سوخت، و شرایط محیطی و کاری توربین بر عملکرد سیستم اشتعال را نیز مورد بررسی قرار داد.

لازم به ذکر است که در مدل حاضر، اثر خاموشی تقابلی (HOQ)^{۱۹} و خاموشی مجاورتی (SWQ)^{۲۰} در اثر تقابل جبهه شعله و دیواره لحاظ گردیده و حدی برای نزدیک شدن ذرات به دیواره در نظر گرفته شده است. در صورتی که فاصله ذرات از دیواره کمتر از مقدار مذکور گردد، حالت ذره به خاموش تبدیل می‌گردد.

برای پیاده‌سازی این مدل، ابتدا میانگین حل LES جریان سرد در محفظه با استفاده از نرم‌افزار FLUENT تولید شده و سپس با استفاده از کد مدل‌سازی تصادفی اشتعال جرعه که در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه یافته، عملکرد اشتعال محفظه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش محاسباتی

شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق سه‌برنری توربین گاز مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام شده است. بدین منظور شبکه محاسباتی با سایز ۲۰ میلیون سلول برای محفظه سه‌برنری تولید شده است. نحوه توزیع سلول‌های شبکه به نحوی بوده است که تعداد سلول‌های بخش میانی محفظه (مربوط به برنر تزریق سوخت اشتعال یا برنر شماره ۶) دو برابر بخش‌های طرفین محفظه شود. به منظور کاستن از تعداد سلول‌های شبکه و حجم محاسبات، سوراخ‌های

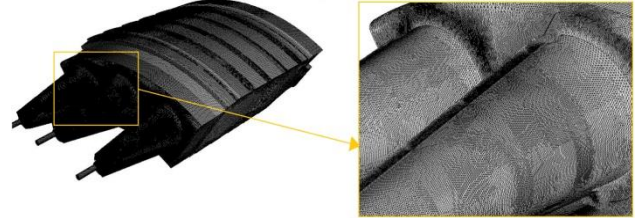
¹⁸ Karlovitz

¹⁹ Head-on quenching

²⁰ Side-wall quenching

²¹ Smagorinsky-Lilly

محاسبات با بهره‌گیری از سیستمی متشکل از ۹۶ پردازنده AMD با توان پردازش 4/2 GHz و حافظه 128 GB صورت پذیرفته است. نمایی از شبکه محاسباتی مورد استفاده در شکل ۳ ارایه گردیده است. نحوه تشکیل نواحی بازچرخش در محفظه سه برنری نیز در شکل ۴ ارایه شده است.



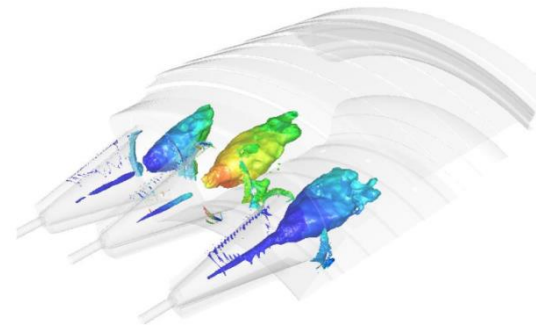
شکل ۳ - نمایی از جزئیات شبکه محاسباتی مورد استفاده برای حل LES

همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، مدل‌سازی تعقیب ذرات در میدان جریان نیازمند شبکه باسازمان می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در هندسه محفظه احتراق مورد نظر، جهت تولید شبکه‌ای با مشخصه مذکور، از نرم‌افزار OpenFOAM استفاده شده است. این هندسه با استفاده از حل‌گر تولید شبکه snappyHexMesh از مجموعه حل‌گرهای موجود در کتابخانه‌های OpenFOAM تولید شده است.

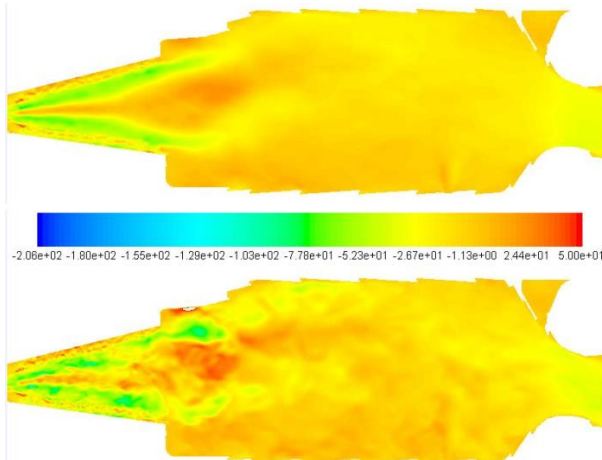
همچنین جهت کاستن از حجم محاسبات، تنها ناحیه اصلی اشتعال در محاسبات در نظر گرفته شده است. این ناحیه شامل ناحیه اصلی برنر شماره ۶ بوده و جزئیات آن در بخش آتی ارایه شده است.

پس از استخراج داده‌های مورد نظر از حل CFD، نتایج بر روی شبکه با سازمان میان‌یابی شده و به صورت ساختار درختی در نرم‌افزار MATLAB ذخیره می‌گردد. این ساختار درختی به عنوان ورودی کد مدل‌سازی تصادفی اشتعال جرقه جهت محاسبات تعقیب ذرات ذخیره می‌گردد.

اعتبارسنجی کد مورد نظر در با استفاده از یک برنر آزمایشگاهی انجام و در مرجع [۹] گزارش شده است.

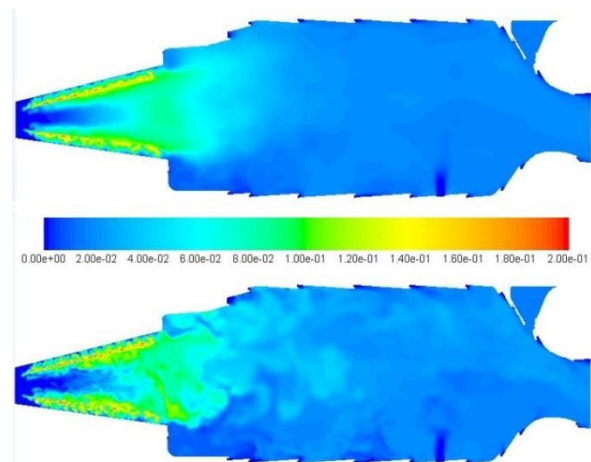


شکل ۴ - نمایی از هندسه محفظه سه برنری به همراه نواحی بازچرخش رنگ شده با کسر مخلوط سوخت (سوخت در لحظه اشتعال تنها از برنر میانی تزریق می‌گردد)



شکل ۶- مقادیر میانگین (بالا) و لحظه‌ای (پایین) سرعت محوری در صفحه طولی میانی محفظه سه برنری

همچنین در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب مقادیر میانگین و لحظه‌ای کسر مخلوط سوخت و سرعت محوری در صفحه میانی برنر شماره ۶ (برنر اشتعال) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵- مقادیر میانگین (بالا) و لحظه‌ای (پایین) کسر مخلوط سوخت در صفحه طولی میانی محفظه سه برنری

نتایج و بحث

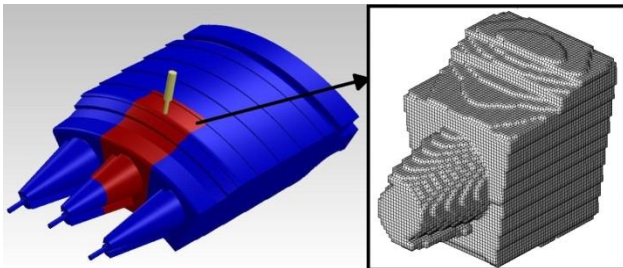
در مراحل اولیه طراحی محفظه احتراق و یا در حین پروسه بهینه‌سازی ساختار محفظه‌های موجود، ممکن است محل جرقه‌زن یا شمع متغیر فرض شود. اما در مطالعات حاضر فرض بر این است که محل جرقه‌زن ثابت خواهد ماند. با این تفاسیر محاسبات با در نظر گرفتن متغیرهای زیر ارایه شده است: (الف) نوع سیستم اشتعال (Vibro-Meter و SMITSVONK)؛ (ب) شرایط کاری توربین که به صورت دما، فشار و دبی هوای ورودی محفظه در نظر گرفته شده و در قالب یک پارامتر بار به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۲]:

$$LP = p_3^{1.75} V_{total} \cdot \exp(T_3 / 300) / n \&_{air, total} \quad (1)$$

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

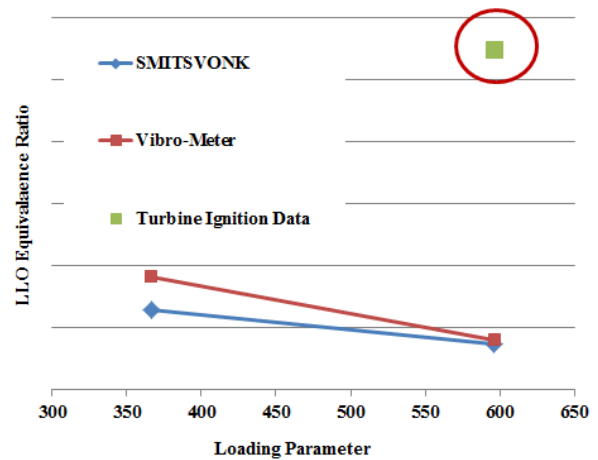
می‌توان مپ محدوده اشتعال رقیق یا ^{23}LLO توربین را تدوین کرد. نکته‌ای که باید در اینجا مورد اشاره قرار گیرد، نقطه حداقل سوخت برای شروع محاسبات است. در مورد توربین مورد نظر مشخص بود که دبی سوخت گاز طبیعی در لحظه اشتعال (در شرایط ایزو) حدود ۲۵ گرم بر ثانیه است. لذا در محاسبات حاضر مقدار سوخت از کسر کوچکی از مقدار مزبور به تدریج افزایش یافته تا مقدار دقیق دبی LLO استخراج گردد. در صورتی که اطلاعاتی در مورد دبی محدوده اشتعال توربین موجود نباشد، می‌توان ابتدا محدوده خاموشی رقیق یا ^{23}LBO را با روش مرجع [۱۳] یا سایر روش‌ها محاسبه نموده و سپس افزایش تدریجی مقدار سوخت و تکرار محاسبات را از مقدار سوخت مربوط به LBO آغاز نمود. نکته دیگر، بحث حجم محاسبات تکراری جهت تخمین محدوده اشتعال و روش‌های کاهش آن است. در این مطالعه دو روش برای کاستن از حجم محاسبات پیشنهاد شده است. رویکرد اول، کاستن از حجم محاسبات با کاهش سایز دامنه محاسبات است. بدین منظور تنها ناحیه اصلی اشتعال مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۸ نمایی از هندسه محفظه سه‌برنری به همراه محل جرقه‌زن و نیز حجم ناحیه اصلی اشتعال که در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته، نمایش داده شده است. این ناحیه به نحوی اختیار شده که حداقل تاثیر را بر فرآیند تعقیب ذرات و محاسبه احتمال اشتعال داشته باشد.



شکل ۸- هندسه محفظه سه برنری به همراه محل جرقه زن در مقابل برنر شماره ۶ و فضای اصلی اشتعال مشخص شده در فضای محفظه سه برنری (چپ) به همراه شبکه منظم تولید شده در فضای اصلی اشتعال با سایز شبکه منظم ۴ میلی‌متر (راست)

رویکرد دوم مربوط به کاستن از حجم محاسبات مربوط به حل LES است. افزایش تدریجی دبی سوخت نیازمند تکرار حل LES برای هر مقدار از دبی سوخت می‌باشد که البته این مساله حجم محاسبات را به شدت افزایش داده و ماهیت مهندسی ابزار فوق‌الذکر را مخدوش خواهد کرد. برای کاستن از حجم و زمان محاسبات روشی میان‌بر پیشنهاد و ارزیابی شده است. اساس روش پیشنهادی مبتنی بر این واقعیت است که با توجه به مقدار اندک دبی سوخت در مقایسه با دبی هوا، با تغییر دبی سوخت مشخصات کلی میدان جریان (از قبیل توزیع سرعت و ویژگی‌های آشفتمندی) چندان تغییر نمی‌کند.

در رابطه (۱)، P_3 برحسب kpa، V_{total} برحسب m^3 ، T_3 برحسب k و $\dot{m}_{air,total}$ برحسب kg/s است. علاوه بر موارد فوق همانگونه که اشاره گردید، برای در نظر گرفتن یک حاشیه اطمینان در محاسبات عملکرد سیستم اشتعال، همواره فرض شده است که گاز طبیعی معادل متان خالص است. میزان رطوبت هوای محیط نیز همواره ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. محاسبات در حالات مختلف انجام گردیده و نتایج محاسبات عملکرد اشتعال (کمینه نسبت هم‌ارزی برای حصول اشتعال موفق با سیستم مورد نظر) برای دو مجموعه شرایط کاری (معادل پارامترهای بار ۳۶۷ و ۵۹۶) برای هر دو سیستم اشتعال در شکل ۷ ارایه شده و جزئیات نحوه تدوین این مپ نیز ذیلا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۷- مپ اشتعال توربین گاز مورد نظر با استفاده از دو نوع سیستم اشتعال مختلف

در مطالعات مشابه قبلی، مدل مورد بحث برای محاسبه احتمال اشتعال مورد استفاده قرار گرفته است. اما در این مطالعه رویکردی متفاوت برای کاربرد روش فوق اتخاذ شده تا به واسطه آن مپ اشتعال محفظه احتراق تدوین گردد. اساس روش مزبور به شرح زیر است. برای یک سیستم اشتعال مشخص و شرایط کاری معلوم، ابتدا فرآیند جرقه‌زنی شبیه‌سازی می‌گردد. پس از شبیه‌سازی تکراری فرآیند جرقه زنی (در این مطالعه به تعداد ۵۰ تکرار)، احتمال اشتعال برای شرایط مورد نظر محاسبه می‌گردد. چون زمان قابل قبول برای اشتعال توربین مورد بحث حدود ۱۰ ثانیه می‌باشد و از سوی دیگر فرکانس جرقه‌زنی سیستم اشتعال نیز مشخص است، لذا با فرض بدترین شرایط ممکن یعنی موفق بودن آخرین جرقه در طی ۱۰ ثانیه روشن بودن سیستم اشتعال توربین، می‌توان حداقل احتمال اشتعال قابل قبول در شرایط مورد نظر را استخراج نمود. اگر احتمال اشتعال محاسبه شده با استفاده از کد تصادفی تعقیب ذرات کمتر از احتمال قابل قبول بود، دبی سوخت اندکی افزایش یافته و محاسبات مجدداً تکرار می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان حداقل دبی سوخت قابل قبول جهت حصول اشتعال موفق را برای یک سیستم اشتعال مشخص و در شرایط کاری مورد نظر محاسبه نمود. با تکرار این روند

²² Lean light-off

²³ Lean blow-out

در نهایت در شکل ۱۰ نمونه‌ای از نتایج محاسبات تعقیب ذرات برای دو حالت اشتعال موفق و ناموفق جهت مقایسه ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۱۱ نیز نمونه نتایج ارزیابی اشتعال برنر ارتقایافته (با توزیع سوخت بهینه) با برنر اصلی مقایسه شده است. با استفاده از این ابزار می‌توان اثر تغییرات هندسی بر عملکرد اشتعال را با دقت بالایی مطالعه نمود.

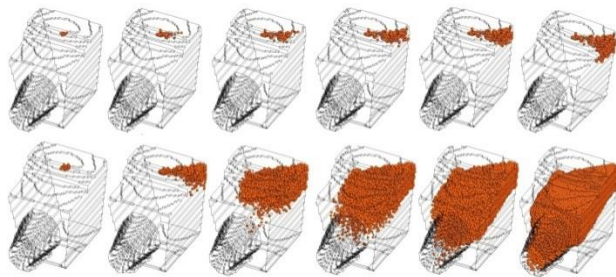
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به تخمین مهندسی محدوده اشتعال جرقه در محفظه احتراق توربین‌های گاز صنعتی پرداخت. مشخصات اصلی این روش شامل انطباق با ماهیت اشتعال، تصادفی بودن ماهیت نتایج، نتایج قابل قبول مپ احتمال اشتعال در مقایسه با نتایج تجربی، و نیز زمان قابل قبول محاسبات بود.

این روش علاوه بر توانایی استخراج مپ احتمال اشتعال جهت مکان‌یابی جرقه‌زن، قابلیت استخراج محدوده‌ی اشتعال برای یک مکان مشخص و انجام مطالعات پارامتریک برای ارزیابی تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد اشتعال محفظه احتراق توربین گاز را نیز دارا می‌باشد.

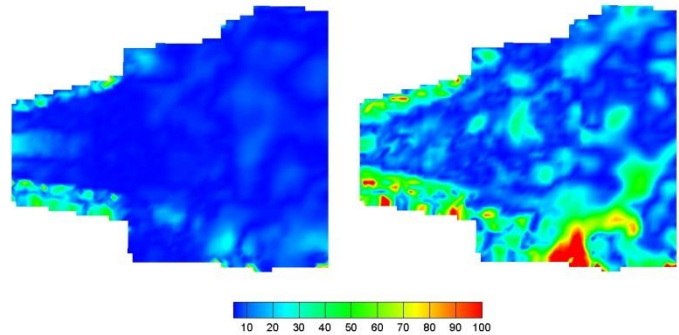
تاثیر نوع و ترکیب سوخت‌های جایگزین و تجدیدپذیر بر عملکرد سیستم اشتعال توربین گاز در مراجع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات آتی، پارامتر ضریب تصحیح ترکیب سوخت برای خانواده‌های مختلف سوخت معرفی خواهد گردید. با استفاده از این ضریب می‌توان بدون نیاز به حل مجدد میدان جریان یا اجرای مجدد کد تصادفی اشتعال، مپ محدوده اشتعال توربین را برای خانواده‌های مختلف سوخت از قبیل گازهای طبیعی [۱۰] و سرچاهی یا گازهای سنتزی [۱۴] تصحیح نمود.

در نهایت لازم به ذکر است که در این نوشتار تنها اشتعال تک‌برنری مورد توجه قرار گرفت. در ادامه این مطالعات، مدل ساده‌ای برای ارزیابی اشتعال عرضی در محفظه‌های حلقوی نیز توسعه داده شده و جزئیات آن در مرجع [۱۵] ارائه گردیده است. در مطالعات آتی، ابزار مورد بحث در این نوشتار برای ارزیابی عملکرد اشتعال عرضی نیز مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۰ - نمونه‌ای از فرآیند اشتعال ناموفق (بالا) و موفق (پایین) برای یک مجموعه از شرایط کاری ثابت با سیستم اشتعال و برنر و محفظه احتراق یکسان

همچنین فرض می‌شود که دبی سوخت تمام سلول‌های ناحیه اشتعال به صورت خطی با دبی سوخت کل ورودی به محفظه تغییر می‌کند. برای آزمودن دقت این فرضیه، سه حل LES تولید شده است به ترتیب برای مقدار اسمی سوخت و $\pm 5\%$ مقدار اسمی سوخت. سپس توزیع سوخت برای دو حالت مقایسه شده است: (الف) خروجی مستقیم حل LES در شرایط اسمی دبی سوخت، و (ب) میان‌یابی مقادیر مربوط به شرایط اسمی سوخت با توجه به نتایج حل LES مربوط به $\pm 5\%$ مقدار اسمی سوخت. میانگین اختلاف بین مقادیر میانگین و RMS کسر مخلوط سوخت منتج از دو روش فوق در کل فضای اصلی اشتعال به ترتیب کمتر از 12% و 22% بوده است. علاوه بر این، توزیع این اختلاف همانگونه که در شکل ۹ قابل مشاهده است، در ناحیه اصلی اشتعال کمتر از نواحی تزریق سوخت بوده و لذا می‌توان فرض تغییر خطی کسر مخلوط سوخت سلول‌های محاسباتی با تغییر در دبی سوخت ورودی را در شرایط مورد نظر قابل قبول دانست. با استفاده از این فرضیه تعداد محاسبات LES برای هر نقطه کاری به دو حل محدود می‌شود و نیازی به تکرار حل LES برای هر مقدار از دبی سوخت نخواهد بود.



شکل ۹ - توزیع درصد متوسط خطا در مقادیر میانگین (چپ) و RMS (راست) کسر جرمی سوخت با اعمال فرض تغییرات خطی این متغیر با تغییر در دبی سوخت ورودی

نتایج محاسبات محدوده LLO برای دو حالت نمونه در شکل ۷ ارائه گردید. همانگونه که اشاره شد، مقدار سوخت تقریبی مربوط به اشتعال که از اطلاعات توربین استخراج گردیده نیز در حدود ۲۵ گرم بر ثانیه بوده که این مقدار مربوط به سیستم اشتعال Vibro-Meter می‌باشد.

بررسی نتایج مزبور نشان دهنده قابلیت‌های این روش برای تخمین محدوده اشتعال محفظه احتراق توربین‌های گاز صنعتی می‌باشد. همچنین با بررسی نتایج حل LES در صفحه میانی ناحیه اصلی اشتعال که به شبکه منظم ۴ میلی‌متری منتقل شده مشخص گردیده که در ناحیه مورد نظر برای جرقه‌زنی و انتشار و پایدارسازی شعله، میانگین نرخ اضمحلال آشفستگی در حدود $100,000 \text{ m}^2/\text{s}^3$ می‌باشد، لذا با توجه به راهکارهای ارائه شده در مرجع [۴] گام زمانی 0.5 میلی‌ثانیه و سایز شبکه ۴ میلی‌متر برای انجام کلیه محاسبات تعقیب ذره مورد استفاده قرار گرفته است (میانگین انرژی جنبشی آشفته در این ناحیه نیز حدود $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ بوده است).

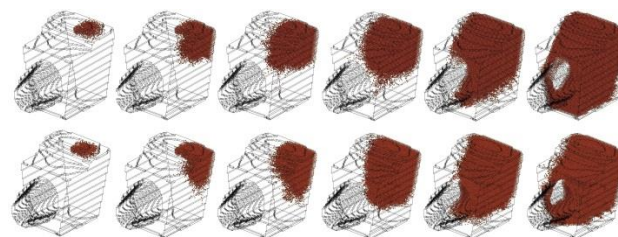
Maps by Means of a Turbulent Flame Speed Closure Approach," ASME Paper GT2010-22211, 2010.

12- Linassier, G., Viguier, C., Verdier, H., Lecourt, R., Heid, G., and Lavergne, G., "Experimental Investigations of the Ignition Performances on a Multi-sector Combustor under High Altitude Conditions," AIAA Paper 2012-0934, 2012.

13- Soroudi, M.A., Hadi Bafekr, S., Timaji, M., and Rasooli, N., "A Priori Calculation of Lean Blowout Limit in an Industrial Gas Turbine Combustor," Proceedings of the European Combustion Meeting, ECM2013, 2013.

14- Tabatabaei, A.F., and Soroudi, M.A., "A Kinetic Study of Syngas Combustion Characteristics for Gas Turbine Applications," Seventh Mediterranean Combustion Symposium (MCS-7), Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, 2011.

15- Shahsavari, M., Soroudi, M.A., and Bagheri, Y., "Development of a Simple Model to Predict Cross Ignition Probability in Annular Combustors Equipped with EV Burners," Fuel and Combustion, Submitted, 2017.



شکل ۱۱ - نمونه‌ای از فرآیند اشتعال موفق برای یک مجموعه از شرایط کاری ثابت با استفاده از سیستم اشتعال یکسان و برنرهای OEM (پایین) و ارتقا یافته (بالا)

مراجع

- 1- Bane, S.P.M., Ziegler, J.L., Boettcher, P.A., Coronel, S.A., and Shepherd, J.E., "Experimental Investigation of Spark Ignition Energy in Kerosene, Hexane, and Hydrogen," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 26, pp. 290-294, 2013.
- 2- Mastorakos, E., "Ignition of Turbulent Non-premixed Flames," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, pp. 57-97, 2009.
- 3- Escalpez, L., Riber, E., and Cuenot, B., "Ignition Probability of a Partially Premixed Burner Using LES," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 35, pp. 3133-3141, 2015.
- 4- Neophytou, A., Richardson, E.S., and Mastorakos, E., "Spark Ignition of Turbulent Recirculating Non-Premixed Gas and Spray Flames: A Model for Predicting Ignition Probability," Combustion and Flame, Vol. 159, pp. 1503-1522, 2012.
- 5- Eyssartier, A., Cuenot, B., Gicquel, L.Y.M., and Poinso, T., "Using LES to Predict Ignition Sequences and Ignition Probability of Turbulent Two-Phase Flames," Combustion and Flame, Vol. 160, pp. 1191-1207, 2013.
- 6- Soroudi, M.A., Mollahasanzadeh, E., and Rasooli, N., "Prediction of Spark Ignition Performance in an Industrial Gas Turbine Combustor," 7th European Combustion Meeting (ECM2015), Hotel Hilton, Budapest, Hungary, 2015.
- 7- Neophytou, A., Mastorakos, E., Richardson, E.S., Stow, S., and Zedda, M., "A Practical Model for the High-Altitude Relight of a Gas Turbine Combustor," MCS7, Sardinia, Italy, 2011.
- 8- Soworka, T., Gerendas, M., Eggels, R.L.G.M., and Mastorakos, E., "Numerical Investigation of Ignition Performance of a Lean Burn Combustor at Sub-Atmospheric Conditions," ASME Paper GT2014-25644, 2014.
- 9- Soroudi, M.A., Timaji, M., Rasooli, N., and Khaledi, H., "Estimation of Ignition Limit of a Model Gas Turbine Combustor Using Monte Carlo Particle Tracking Method," 2nd National Gas Turbines Conference, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2013 (in Persian).
- 10- Soroudi, M.A., and Rasooli, N., "Natural Gas Composition Effects on DLE Gas Turbine Combustor Operability and Emissions," CSME International Congress, Toronto, Canada, 2014.
- 11- Boyde, J.M., Di Domenico, M., Noll, B., and Aigner, M., "Spark Ignition Simulations and the Generation of Ignition