

اثر میزان پیچش جریان بر احتمال اشتعال موفق و نحوه انتشار هسته اولیه شعله در مشعل پیچشی دوگانه امیرکبیر

حمیدرضا تاجیک، صادق تابع جماعت*، علیرضا فضل‌الهی قمشی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، sadegh@aut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳)

چکیده: در این مقاله، تأثیر میزان پیچش جریان بر الگوی اختلاط، احتمال اشتعال موفق و نحوه انتشار شعله در یک مشعل گازی غیرپیش‌آمیخته با سوخت گاز طبیعی، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، تصویربرداری دیجیتال و سرعت بالا، اندازه‌گیری، و مورد بررسی قرار گرفت. نقشه‌های احتمال اشتعال موفق با تغییر موقعیت جایگاه جرقه‌زن در جهات محوری و شعاعی اندازه‌گیری و میدان جریان و الگوی اختلاط با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شدند. به منظور بررسی نحوه انتشار هسته اولیه شعله، تصویربرداری دیجیتال با سرعت بالا مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نمودارهای احتمال اشتعال موفق سه ناحیه تعریف شد. اولین ناحیه تحت عنوان ناحیه غیرمؤثر نام‌گذاری شده است که در آن احتمال موفقیت اشتعال کمتر از ۲۰ درصد است. ناحیه دوم ناحیه گذار نام دارد که در آن احتمال اشتعال موفق بین ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد است و موفقیت اشتعال به مقدار زیاد به موقعیت جرقه‌زن وابسته است. ناحیه سوم ناحیه احتمال بالا است که در آن احتمال موفقیت اشتعال بیشتر از ۸۰ درصد است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزایش عدد پیچش جریان باعث افزایش نرخ اختلاط می‌شود، اما باعث بهبود توزیع احتمال اشتعال موفق نمی‌شود. در واقع، با مقادیر عدد پیچش بالا، ناحیه احتمال بالا کوچک می‌شود، اما در جریان‌های با مقادیر عدد پیچش کمتر، ناحیه احتمال بالا توزیع گسترده‌تری در خروجی مشعل داشته، و ویژگی‌های اشتعالی بهتری را شامل می‌شود.

کلیدواژه‌گان: اشتعال، شعله پیچشی، احتراق غیرپیش‌آمیخته، انتشار شعله، شبیه‌سازی عددی

مقدمه

گرچه بهره‌برداری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر رو به افزایش و در حال توسعه می‌باشند، اما بخش بزرگی از نیازمندی‌های انرژی در جهان هنوز به سوخت‌های فسیلی و فرآیند احتراق وابسته است. پدیده اشتعال^۱ بخش جدایی‌ناپذیر از فرایند احتراق و تولید انرژی گرمایی است، به عبارتی بدون اشتعال، احتراقی صورت نمی‌گیرد و در واقع انرژی گرمایی و حرارت حاصل از فرایند احتراق وجود نخواهد داشت. نیاز به انرژی حرارتی حاصل از فرایند احتراق سوخت‌های فسیلی از نیازهای اساسی است، از این‌رو اهمیت پدیده اشتعال و پژوهش بر روی این موضوع در حوزه تبدیل انرژی مشهود است. این مسئله از منظر دسترسی به دانش لازم جهت طراحی و بهینه‌سازی مشعل‌ها برای عملکرد بهینه در جریان‌های رقیق^۲ از سوخت و کاهش آلاینده‌گی و افزایش قابلیت اطمینان و اشتعال مجدد حائز اهمیت است.

رخداده اشتعال در یک دسته‌بندی کلی به دو نوع اصلی تقسیم می‌شود. اشتعال می‌تواند از طریق تحریک عامل بیرونی^۳ یا به صورت خود اشتعالی^۴ رخ دهد. اشتعال از طریق تحریک عامل بیرونی بسته به نوع منبع و چگونگی تأمین انرژی لازم جهت اشتعال، به انواع مختلف دسته‌بندی می‌شود از جمله می‌توان به اشتعال لیزری، جت پلاسما، صفحه داغ، تورچ، مواد آتش‌زنه

^۱ Ignition

^۲ Lean

^۳ Force Ignition

^۴ Auto Ignition

شیمیایی و جرقه الکتریکی اشاره کرد. استفاده از جرقه الکتریکی در حال حاضر پرکاربردترین روش اشتعال است. در این روش اعمال انرژی اولیه باعث شکست مولکول‌ها به ذرات باردار^۱ و ایجاد گذرگاهی رسانا برای انتقال انرژی الکتریکی بین دو الکترود می‌شود. این جریان سبب می‌شود تا انرژی به مخلوط گازی انتقال یابد. انرژی انتقال یافته سبب افزایش بسیار سریع دمای گاز و تولید موج شوک می‌شود، این افزایش دما منجر به اشتعال مخلوط سوخت بین دو الکترود و تشکیل هسته شعله^۲ شده سپس مرحله انتشار^۳ شعله اتفاق افتاده و شعله پایدار تشکیل می‌شود [۱، ۲].

اشتعال پدیده‌ای گذرا و تصادفی^۴ است. طبیعت تصادفی پدیده اشتعال، به شکل واضحی در مطالعات متعدد مشخص و در مقالات بسیاری گزارش شده است. از این منظر نقشه‌های احتمال اشتعال موفق جهت کمی‌سازی راندمان اشتعال تعریف شده است. آنالیز دقیق پدیده اشتعال نشان می‌دهد که اشتعال موفق تنها تحت تأثیر متغیرهای جریان در محل اعمال جرقه نیست، بلکه شرایط جریان در طول مسیر هسته شعله پس از جرقه و تشکیل هسته نیز بسیار مؤثر است [۳]. تصادفی بودن اشتعال، از تغییرات در قدرت و مقدار انرژی منتقل شده به مخلوط قابل اشتعال [۴]، آشفستگی جریان، تغییرات در میدان جریان، و میزان اختلاط سوخت و هوا در محل اعمال جرقه [۵] و ابعاد متغیرهای جریان نظیر گردابه‌ها در محفظه احتراق [۶] نشأت می‌گیرد. در پژوهش‌های اولیه، بیرچ و همکاران [۷] و همچنین اسمیت و همکاران [۸] احتمال اشتعال در جریان جت آشفته صرف‌نظر از اینکه به شعله پایدار منجر شود (اشتعال موفق) یا نشود را با حضور مخلوط قابل اشتعال در موقعیت اعمال جرقه مرتبط دانستند. حضور مخلوط قابل اشتعال به‌عنوان ضریب اشتعال‌پذیری^۵ (FF) تعریف شده که از رابطه (۱) [۷ و ۸] بدست می‌آید:

$$FF = \int_{\xi_{lean}}^{\xi_{rich}} P(\psi) d\psi \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه ξ_{lean} و ξ_{rich} به ترتیب کسر مخلوط^۶ حد اشتعال‌پذیری غنی و رقیق و $P(\psi)$ تابع چگالی احتمال^۷ PDF برای کسر مخلوط می‌باشند.

از نقطه نظر پژوهش عددی ویژگی گذرا و تصادفی بودن پدیده اشتعال ایجاب می‌کند که از رویکرد شبیه‌سازی بر مبنای گردابه‌های بزرگ^۸ (LES) استفاده شود، اگرچه ثابت شده است پیش‌بینی احتمال اشتعال از روش (LES) امکان‌پذیر است [۹]، اما ایجاد نقشه‌های احتمال اشتعال به واسطه هزینه‌های زیاد محاسباتی، از طریق شبیه‌سازی مراحل مختلف پدیده اشتعال در هر نقطه از نقشه، در عمل بسیار پرهزینه و تقریباً امکان‌پذیر نیست. مطالعات و پژوهش‌های زیادی در چند دهه اخیر با موضوع اشتعال انجام شده است که به‌طور محسوسی درک این پدیده در حوزه‌های مختلف را افزایش داده‌اند. از جمله احمد و همکاران، اثر سرعت جریان گاز، نسبت هم‌ارزی^۹ و یکنواختی جریان گاز را بر اشتعال در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته مورد بررسی قرار دادند. او در یک سری مطالعات تجربی نشان داد که احتمال اشتعال با کاهش میانگین غلظت استوکیومتری در پایین‌دست جریان به تندی به سمت صفر کاهش می‌یابد [۱۰] و همچنین نشان داد در صورت استفاده از جسم مسدودکننده^{۱۰} و چرخاننده^{۱۱} به صورت هم‌زمان، محدوده اشتعال‌پذیری به محدوده پایداری شعله نزدیک خواهد شد [۱۱]، و توزیع کسر مخلوط موضعی به صورت واضح بر روی اشتعال‌پذیری تأثیر دارد [۱۲]. بورگوین و همکاران، دینامیک اشتعال در یک مشعل حلقوی شامل ۱۶ مشعل پیش‌آمیخته چرخشی و محصور بین دو شیشه کوارتز هم‌مرکز را بررسی نمودند [۱۳].

¹ Ion

² Kernel

³ Propagation

⁴ Stochastic

⁵ Flammability Factor

⁶ Mixture Fraction

⁷ Probability Density Function

⁸ Large Eddy Simulation

⁹ Equivalence Ratio

¹⁰ Bluff Body

¹¹ Swirler

ثوفیتو احتمال اشتعال در جریان آشفته غیرپیش‌آمیخته را بررسی و مدلی را جهت پیش‌بینی، ارائه کرد [۱۴] ماستراکوس به صورت مروری اشتعال در جریان‌های آشفته و غیر پیش‌آمیخته را از منظر خود اشتعالی و اشتعال اجباری مورد بررسی قرار داد [۱]. کوردیر یک مشعل پیچشی با ورودی جریان پیش‌مخلوط متان و هوا جهت مطالعه تجربی اثر موقعیت جرقه بر روی موفقیت اشتعال و جزئیات تشکیل شعله پایدار پس از اعمال جرقه را طراحی نمود. این مشعل قابلیت کار در دو عدد پیچشی^۱ متفاوت جهت برآورد تأثیر میزان پیچش جریان بر فرایند اشتعال را داشت [۶]. او و همکارانش میدان جریان سرد را با دقت اندازه‌گیری نمودند و همچنین نقشه‌های احتمال اشتعال با اعمال انرژی با مقدار معین را بدست‌آوردند. علاوه بر این در این مطالعه از طریق انطباق زمانی تغییرات فشار در محفظه احتراق با تصاویر سرعت بالای همزمان، نشان داده شد که موفقیت اشتعال با شرایط و مشخصات جریان کنترل می‌شود و همچنین رشد هسته شعله در مراحل اولیه وابسته به مسیر حرکت آن در محفظه احتراق است. شن و همکاران، فرایند اشتعال در شعله‌ی پیش‌آمیخته پیچشی را در یک محفظه احتراق مورد مطالعه قرار دادند. او با بررسی راندمان احتراق از طریق تحلیل ترکیب گازهای حاصل از احتراق دریافت، با کاهش نسبت هم ارزی کارایی احتراق کاهش می‌یابد. همچنین از تکنیک‌های تصویربرداری و اندازه‌گیری شدت نور و پردازش تصویر جهت مشخص کردن شرایط پایداری نسبی شعله استفاده نمود [۱۵].

علاوه بر پژوهش‌های تجربی، پژوهش‌های زیادی بر مبنای محاسبات عددی در خصوص اشتعال انجام شده است. تعدادی از محققین جوانب مختلف تشکیل هسته شعله و انتشار آن را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم^۲ (DNS) بررسی نمودند. از جمله ریچاردسون که با بررسی عددی اشتعال اجباری در جریان متقابل آرام مخلوط هوا و متان غیر پیش‌آمیخته دریافت، پراکندگی زیاد و اشتعال‌پذیری موضعی مخلوط منجر به از دست رفتن اشتعال می‌شود [۱۶] و همچنین نشان داد شرایط نفوذ ذرات واکنشگر و همرفت، برای رسیدن شعله به پایداری پس از اعمال جرقه بسیار مهم هستند [۱۷]. تعداد دیگری از پژوهشگران فرایند اشتعال را با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی بر مبنای گردابه‌های بزرگ (LES) مورد بررسی قرار دادند. لاکاز در بررسی اشتعال جرقه‌ای جت آشفته متان، نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی عددی از روش (LES) را با نتایج تجربی مقایسه نمود و سازگاری بسیار خوبی در زمینه انتشار و پایداری شعله مشاهده کرد [۱۸]. تریانتالیفیدیز از طریق شبیه‌سازی به روش (LES)، اشتعال جرقه‌ای یک شعله غیر پیش‌آمیخته متان با حضور جسم مسدودکننده را مورد مطالعه قرارداد و دریافت اندازه جرقه و موقعیت آن بر انتشار و توسعه آن مؤثر است [۱۹]. عیدی عطارزاده فرایند اشتعال مخلوط پیش‌آمیخته متان و هوا را در ساختار پیچشی با استفاده از روش (LES) با رویکرد احتراقی شعله ضخیم بررسی نمود و دریافت قسمت‌های مسطح شعله در راستای سرعت، بیشترین آزادسازی حرارت و به تبع آن انتشار پایدار شعله را دارند [۲۰]. جونز داده‌های به دست آمده از روش (LES) را با نتایج تجربی به دست آمده در شعله پیش‌آمیخته در خصوص رشد هسته‌ی شعله، انتشار شعله سه‌گانه و پایداری آن مقایسه نمود [۲۱].

در هر صورت با همه این موارد پژوهش‌های اساسی و مطالعات دقیق با ملاحظات میدان جریان و حتی تمرکز بر سامانه اشتعال تاکنون به‌صورت محدود انجام شده است، به نحوی که به‌طور معمول موقعیت سامانه اشتعال در محفظه توربین گازی تنها بر مبنای قابلیت دسترسی برای تعمیر نگهداری و تعویض آن، نه بر مبنای الگوی اختلاط جریان تعیین می‌شود. اشتعال در جریان‌های پیچشی کمتر مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته است با توجه به کارایی بالا و کاربرد فزاینده این نوع مشعل، در این پژوهش، اشتعال در جریان پیچشی مورد توجه قرار گرفته است.

تجهیزات آزمون

شکل ۱ شماتیک تجهیزات آزمون بکار رفته در این پژوهش را نمایش می‌دهد. تمام فرایند اندازه‌گیری احتمال اشتعال موفق توسط سامانه داده برداری^۳ (DAQ) بصورت خودکار انجام می‌شود. به منظور اندازه‌گیری احتمال اشتعال موفق در هر نقطه از

^۱ Swirl Number

^۲ Direct Numerical simulation

^۳ Data Acquisition System

میدان جریان، ابتدا شیر برقی به محض دریافت فرمان، جریان سوخت را برقرار می‌کند. پس از گذشت مدت زمان ۲ ثانیه جریان به حالت پایدار می‌رسد و سپس فرمان تولید جرقه الکتریکی به سامانه تولید جرقه ارسال می‌شود. ۲ ثانیه پس از اعمال جرقه، شیر برقی فرمان قطع را از سامانه دریافت می‌کند. در این بازه زمانی، در صورتی که جرقه منجر به تشکیل شعله پایدار شود، پیام تشکیل شعله توسط تشخیص‌دهنده شعله^۱ به سامانه داده‌برداری ارسال می‌شود. در ادامه به مدت دو ثانیه فرصت داده می‌شود که مخلوط نسوخته و محصولات احتراق باقی‌مانده در محیط، توسط هواکش تخلیه شود. این فرایند N بار تکرار می‌شود. سپس جرقه‌زن به نقطه بعدی منتقل و تا زمانی که تمام نقاط مدنظر در میدان جریان پوشش داده شود، این فرایند تکرار می‌شود.

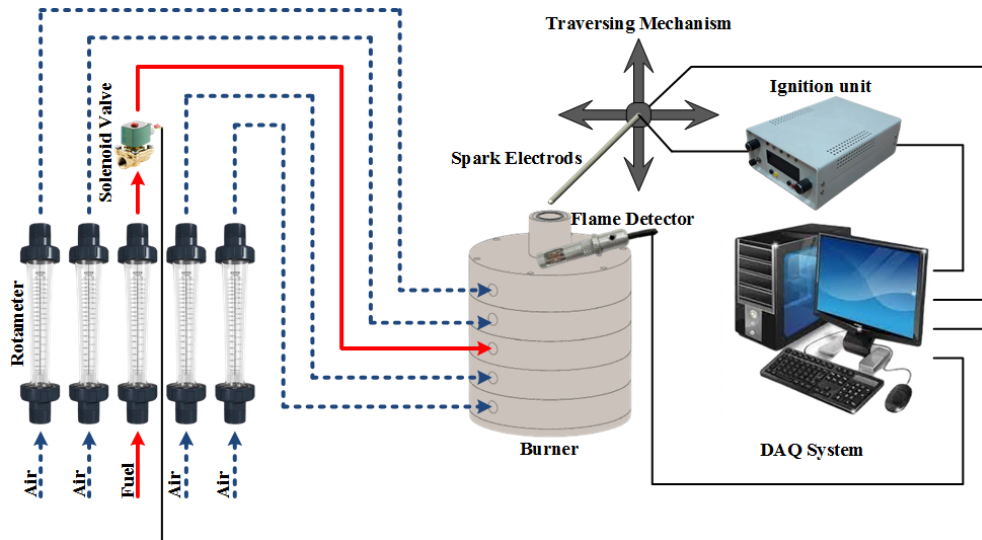


Figure 1- Schematic of test rig
شکل ۱- شماتیک بستر آزمون

الکترودها به واسطه یک لوله سرامیکی به سامانه جابجاگر^۲ دو بعدی با قابلیت جابجایی در دو جهت شعاعی و محوری، متصل هستند. این سامانه جابجاگر دارای دو موتور پله‌ای با زاویه پله‌ای ۱/۸ درجه و نسبت ۱ به ۲۰۰ است، که با توجه به گام پیچ بال اسکرو ۱ میلی‌متر دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر را در جابجایی فراهم می‌نمایند. احتمال اشتعال موفق برای هر نقطه (P_I)، از تقسیم تعداد اشتعال موفق مشاهده شده (J) بر تعداد جرقه‌های اعمال شده (N) در آن نقطه به دست می‌آید. خطای عدم اطمینان آماری (انحراف معیار)، برای این احتمال از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۸]، با توجه به اینکه در این پژوهش $N = 25$ است، خطای عدم اطمینان برای احتمال ۵۰ درصد اشتعال موفق معادل ۱۰ درصد خواهد بود.

$$\sigma = \sqrt{P_I(1 - P_I)/N} \quad \text{رابطه (۲)}$$

مقدار دبی حجمی سوخت با استفاده از روتامتر با محدوده اندازه‌گیری بین ۱۰ تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه و مقادیر دبی حجمی هوا با روتامترهایی با محدوده اندازه‌گیری بین ۲۰ تا ۲۰۰ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شوند. این روتامترها توسط شرکت سازنده به ترتیب با دقت ۲ و ۵ لیتر بر دقیقه درجه‌بندی شده‌اند. فشار مسیر جریان عبوری از هر روتامتر توسط گیج‌های فشاری که بلافاصله بعد از روتامترها نصب شده‌اند اندازه‌گیری شده است. این مقادیر برای محاسبه ضریب اصلاح فشار روتامترها اندازه‌گیری می‌شود. خطای اندازه‌گیری دبی سوخت و هوا بر اساس اعلام سازنده حداکثر ۵ درصد است.

¹ Flame Detector

² Traversing Mechanism

مشعل

شکل ۲ طرح‌واره مشعل مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مشعل با قابلیت پیچش دوگانه دانشگاه امیرکبیر که به اختصار^۱ ADSB نامیده می‌شود. جریان پیچشی هوا از دو مسیر مرکزی^۲ با قطر ۲۰ میلی‌متر و مسیر حلقوی^۳ با قطر داخلی ۲۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۳۳ میلی‌متر و جریان بدون پیچش سوخت از مسیر حلقوی باریک با قطر داخلی ۲۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۴ میلی‌متر (شیاری به عرض ۱ میلی‌متر) واقع بین مسیرهای هوا، وارد میدان جریان می‌شوند. خروجی مشعل به عنوان ارتفاع صفر ($h = 0$) در نظر گرفته شده است. گاز طبیعی به عنوان سوخت در این پژوهش استفاده می‌شود و ترکیب آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

دو ورودی هوا با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم در پایین مشعل (ورودی‌های شماره ۱) جریان محوری هوا در مسیر مرکزی مشعل را تأمین می‌نمایند. جریان پیچشی از طریق هشت کانال مماسی^۴ با قطر ۳ میلی‌متر که با سطح افق زاویه ۱۵ درجه دارند و چرخاننده مسیر مرکزی را تشکیل می‌دهند، به جریان محوری افزوده می‌شود.

جدول ۱- ترکیب سوخت برحسب درصد حجمی

Species		Mole fraction
Name	Chemical formula	[%]
methane	CH ₄	87.7
ethane	C ₂ H ₆	4.7
nitrogen	N ₂	4.7
propane	C ₃ H ₈	1.74
butane	C ₄ H ₁₀	0.79
pentane	C ₅ H ₁₂	0.23
hexane	C ₆ H ₁₄	0.08
carbon dioxide	CO ₂	0.05

این چرخاننده در ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر پایین‌تر از دهانه خروجی مشعل ($h = 0$) قرار گرفته است، و هوای ورودی آن از طریق ورودی‌های شماره ۲ تأمین می‌شود. جریان محوری هوا در مسیر حلقوی از دو ورودی هوا (ورودی‌های شماره ۴) که درست بالای ورودی سوخت قرار دارند تأمین می‌شود. جریان پیچشی هوا در مسیر حلقوی توسط ده کانال مماسی با قطر ۳ میلی‌متر که چرخاننده مسیر حلقوی را تشکیل می‌دهند به جریان محوری افزوده می‌شود. ترکیب جریان‌های محوری و پیچشی در هر مسیر با توجه به دبی آن‌ها امکان ایجاد جریان با عدد پیچش دلخواه را فراهم می‌نماید.

¹ Amirkabir Double Swirl Burner

² Central Path

³ Annular Path

⁴ Tangential

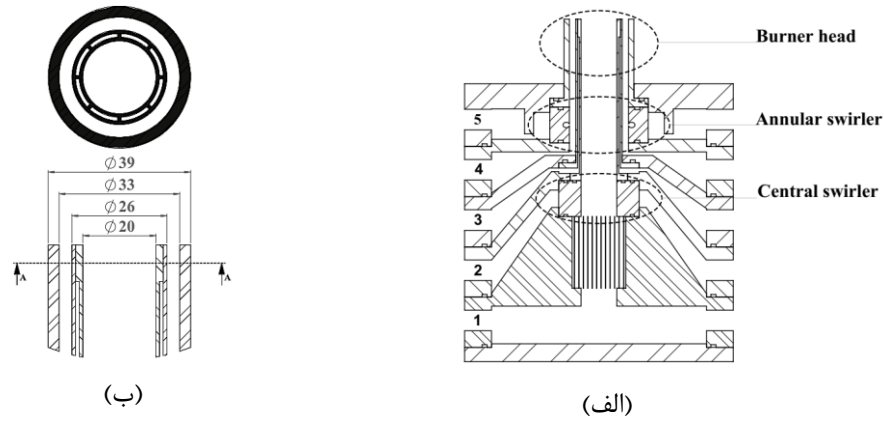


Figure 2- (a) Schematic drawing of the ADSB; (b) Burner head
 شکل ۲- (الف) نقشه شماتیک مشعل ADSB؛ (ب) جزئیات دهانه خروجی مشعل

سامانه اشتعال

در این پژوهش یک سامانه اشتعال توسعه داده شده است. این سامانه قابلیت تولید جرقه با مقدار انرژی و زمان اعمال^۱ مشخص را دارا است. در شکل ۳ بلوک دیاگرام این سامانه نشان داده شده است. مشخصات این سامانه عبارتند از: ولتاژ شکست متغیر تا ۸ کیلوولت، حداکثر جریان الکتریکی ۱۰۰۰ میلی‌آمپر، انرژی جرقه قابل تنظیم در محدوده ۰ تا ۶۰۰ میلی‌ژول و مدت زمان اعمال جرقه قابل تنظیم در محدوده ۳۰۰ تا ۶۰۰ میکروثانیه.

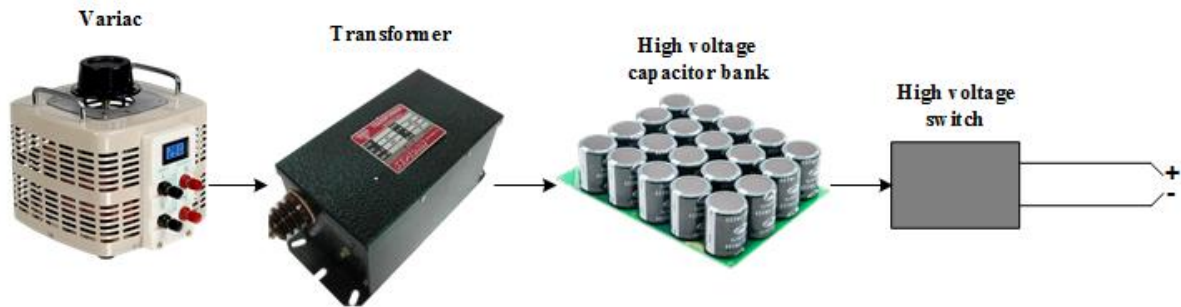


Figure 3- Block diagram of ignition unit
 شکل ۳- بلوک دیاگرام سامانه اشتعال

الکترودها از جنس تنگستن به قطر ۰/۵ میلی‌متر بوده و فاصله آن‌ها^۲ از یکدیگر ۲ میلی‌متر است. در این پژوهش برای تمام آزمون‌ها مدت زمان اعمال جرقه ۵۰۰ میکروثانیه و مقدار انرژی آن ۳۰۰ میلی‌ژول است. به دلیل تشعشع و تشکیل موج شوک و سایر موارد اتلاف، بطور معمول تنها ۳۰ درصد از مقدار انرژی اعمال شده به مخلوط گاز قابل اشتعال منتقل می‌شود [۲۲، ۱۰] با این وجود، با توجه به حداقل انرژی مورد نیاز برای اشتعال^۳ گاز متان که ۶/۴ میلی‌ژول است [۲۲]، انرژی کافی برای اطمینان از تأمین انرژی اشتعال در دسترس خواهد بود. در ضمن برای حداقل شدن اثر الکترودها بر میدان جریان، آن‌ها بصورت مایل مطابق شکل ۴ در جریان قرار داده می‌شوند.

¹ Duration

² Spark Gap

³ Minimum Ignition Energy (MIE)

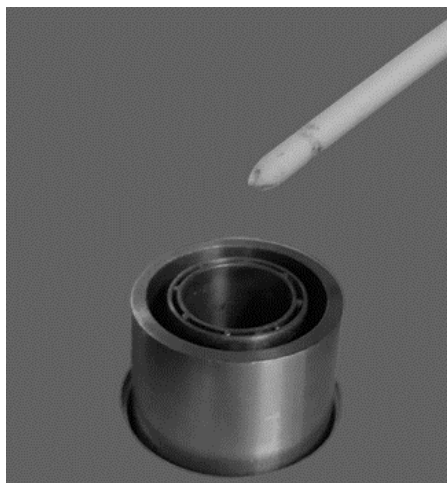


Figure 4- Electrode placement at nozzle exit

شکل ۴- نحوه قرارگیری الکترود در خروجی مشعل به منظور کاهش اثرگذاری روی جریان بالادست

سیستم آشکارسازی و تصویربرداری

به منظور ثبت تصاویر دیجیتال از شعله در حالت پایدار از دوربین Canon – G16 استفاده شده است. برای درک بهتر از تغییرات شکل شعله در اثر تغییر پارامترهای مورد نظر، شکل شعله با استفاده از ۲۰۰ تصویر پی‌درپی ثبت شده است. و سپس با استفاده از یک کد پردازش تصویر، مقادیر متوسط و لحظه‌ای برخواستگی شعله^۱، عرض و ارتفاع شعله، برای این تصاویر محاسبه شده است. زمان نوردهی^۲ مورد استفاده به منظور ثبت این تصاویر یک صدم ثانیه تعیین شد به طوری که هر تصویر به شکل مناسب پدیده‌ها را فریز نماید.

همچنین به منظور ثبت تصاویر پیشروی و انتشار شعله (از لحظه تولید جرقه تا لحظه پایداری) از دوربین سرعت بالای Chronos 1.4 استفاده شد. در این حالت نرخ تصویربرداری ۳۰۰۰ فریم‌برثانیه با زمان نوردهی ۳۲۸ میکروثانیه است. تصاویر حاصل از این فرایند توسط کد پردازش تصاویر دیگری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و چگونگی انتشار شعله شامل مسیر حرکت^۳ و رشد هسته شعله تا مرحله تشکیل شعله پایدار مورد توجه قرار گرفت.

شرایط آزمون

در این پژوهش چهار حالت عملکردی مشعل مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات سوخت و جریان در هر یک از این شرایط عملکردی در جدول ۲ ارائه شده است. همه اندازه‌گیری‌ها در شرایط محیطی (دمای $T = 298 [K]$ و $P_{atm} = 0.9 [bar]$) انجام شده است. در همه آزمایش‌ها نسبت هم ارزی کل یکسان و برابر با $\phi_{global} = 0.8$ است. میدان جریان و الگوی اختلاط در تمامی شرایط عملکردی مذکور ($Sw05, Sw07, Sw09, Sw11$) بصورت عددی و نقشه‌های احتمال اشتعال موفق برای هر یک بصورت تجربی بدست آمده است. عدد پیچش (Sw) برای هر شعله از پروفایل سرعت در خروجی مشعل که از محاسبات عددی بدست می‌آید از رابطه (۳) [۲۳] محاسبه می‌شود. در این رابطه از اثرات فشار در محاسبه مومنتم‌های محوری و پیچشی صرف‌نظر شده است.

$$Sw = \frac{\int_0^R 2\pi uwrdr}{\int_0^R 2\pi u^2 r dr} \quad \text{رابطه (۳)}$$

¹ Lift Off

² Exposure Time

³ Trajectory

در این رابطه u سرعت محوری و W سرعت مماسی هر دو بر حسب متربرثانیه و r شعاع بر حسب متر است. عدد پیچش برای حالت‌های مورد مطالعه در آخرین ستون جدول نمایش داده شده است. عدد رینولدز بر مبنای جریان سرد خروجی از دهانه مشعل و قطر خارجی آن محاسبه و حدود ۱۶۰۰۰ برای تمام حالت‌ها است.

جدول ۲- شرایط عملکردی مشعل در فرایند آزمون
Table 2- Parameters of the seven investigated flames

Case ID	Central air		Annular air		Fuel [g/min]	ϕ_{global} [-]	Sw [-]
	Axial	Tangential	Axial	Tangential			
		[g/min]		[g/min]			
Sw05	81.2	74.8	187.5	132.4	24.1	0.8	0.51
Sw07	68.2	88.2	164.1	148.7		0.8	0.70
Sw09	49.1	109.0	147.7	172.1		0.8	0.90
Sw11	30.4	130.8	131.8	190.7		0.8	1.08

روش مدل‌سازی عددی

معادلات حاکم

شبیه‌سازی جریان‌های پیچشی به دلیل پیچیدگی آئرو‌دینامیکی جریان همواره می‌تواند با چالش‌هایی همراه باشد [۲۴]. موضوع احتراق نیز به خودی خود مسأله‌ای چالش برانگیز و بسیار پیچیده است؛ که تعداد بسیار زیادی از معادلات دیفرانسیل غیرخطی را در دل خود جای می‌دهد. از دیدگاه دقت محاسباتی استفاده از مدل‌ها و مکانیسم‌های شیمیایی دربرگیرنده جزئیات فراوان، امری ایده‌آل به نظر می‌رسد. اما این موضوع پیامد هزینه سنگین محاسباتی علی‌الخصوص در محفظه احتراق‌های با ساختار هندسی پیچیده را در پی دارد. چالش‌های اصلی در مدل‌سازی احتراق آشفته، یافتن راه‌حلی برای محاسبه نرخ واکنش متوسط^۱ و گنجاندن اثر مکانیسم‌های شیمیایی درون مدل است [۲۵]. با این وجود در پژوهش حاضر شبیه‌سازی هیدرو‌دینامیک جریان و الگوی اختلاط سوخت و اکسنده مورد توجه بوده و فرایند شبیه‌سازی تنها به لحظه قبل از آغاز واکنش‌ها می‌پردازد.

به منظور شبیه‌سازی جریان مشعل از معادلات متوسط‌گیری شده ناپراستوکس در کنار معادلات مربوط به مدل‌سازی ترم‌های اغتشاشی و اختلاط گونه‌های شیمیایی استفاده شده است. که در این بخش به طور خلاصه ارائه می‌شود.

معادله بقاء جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad \text{رابطه (۴)}$$

رابطه (۴) فرم کلی معادله بقاء جرم را نشان می‌دهد که برای جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر صادق است. S_m معرف جرم افزوده شده به سیستم از طریق تبدیل فاز و یا چشمه‌های تعریف شده توسط کاربر است.

^۱ Mean Reaction Rate

معادله بقاء ممنتوم

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_{eff} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\bar{\tau}_{eff} = \mu_{eff} [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I] \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۵)، P فشار استاتیکی، $\bar{\tau}_{eff}$ تانسور تنش، \vec{F} نیروهای خارجی، $\rho \vec{g}$ نیروی ناشی از جاذبه و μ_{eff} ویسکوزیته مؤثر (مجموع ویسکوزیته‌های سیال و اغتشاشی) است.

مدل‌سازی اغتشاش با استفاده از روش *RSM*

مدل *RSM*، معادلات ترانسپورت مربوط به تنش‌های رینولدز را به همراه یک معادله برای نرخ اتلاف حل می‌نماید و از این طریق معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس را تکمیل می‌نماید. این بدان معناست که ۵ معادله ترانسپورت اضافی برای جریان‌های دوبعدی و هفت معادله برای جریان‌های سه‌بعدی باید حل شود.

با توجه به اینکه مدل *RSM* به طور خاص اثر انحنای خطوط جریان، پیچش، چرخش و تغییرات سریع در نرخ کرنش را مدنظر قرار می‌دهد، پتانسیل پیش‌بینی دقیق‌تر جریان‌های با پیچیدگی بالا را دارا است. در واقع دستیابی به نتایج قابل قبول در مدل‌سازی جریان‌های دربرگیرنده تنش‌های رینولدز ناهمسانگرد^۱، مستلزم بکارگیری این مدل اغتشاشی است. از جمله این جریان‌ها می‌توان به جریان‌های با میزان پیچش بالا در محفظه‌های احتراق اشاره نمود. با این وجود استفاده از این مدل اغتشاشی برای مدل‌سازی جریان‌هایی که در دسته جریان‌های با پیچیدگی بالا قرار نمی‌گیرند، از لحاظ هزینه محاسباتی امری معقول به نظر نمی‌آید.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_k} &= -\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + P(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \\ &- \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) + P \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \\ &- 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \epsilon_{jkm}) + S \end{aligned} \quad \text{رابطه (۸)}$$

می‌توان

رابطه (۸) را به شکل زیر بازنویسی نمود.

$$\frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} + F_{ij} + S \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹) جملات C_{ij} ، $D_{T,ij}$ ، P_{ij} و F_{ij} نیاز به مدل‌سازی ندارند. هرچند به منظور بسته شدن معادلات، ترم‌های

^۱ Anisotropic

ϵ_{ij} و Φ_{ij} ، G_{ij} ، $D_{T,ij}$ نیازمند مدل‌سازی هستند.

ترم مربوط به ترانسپورت انتشار اغتشاشی ($D_{T,ij}$) با استفاده از مدل گرادیان-پخش دالی وهارلو [۲۶] مدل‌سازی می‌شود. این مدل با توجه به بروز ناپایداری عددی توسط گروه فلونت^۱ به صورت رابطه (۱۰) ساده‌سازی شده است.

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right); \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

جمله فشار-کرنش (Φ_{ij}) نیز با توجه به فرض فشار-کرنش خطی که توسط گیسون و لاندن [۲۷]، فو و همکاران [۲۸] و لاندن [۲۹ و ۳۰]، پیشنهاد شده، مدل‌سازی شده است. در این فرضیه جمله فشار-کرنش به صورت رابطه (۱۱) به چند بخش تفکیک می‌شود؛ که به ترتیب شامل جملات فشار-کرنش گند، فشار کرنش سریع و جمله انعکاس دیواره است و هر کدام از این جملات به صورت جداگانه نیازمند مدل‌سازی می‌باشند. جمله فشار-کرنش گند ($\Phi_{ij,1}$) به صورت رابطه (۱۲) و جمله فشار-کرنش سریع ($\Phi_{ij,2}$) به شکل رابطه (۱۳) معادل‌سازی می‌شوند. جمله مربوط به انعکاس دیواره تعیین‌کننده توزیع تنش عمودی در نزدیکی دیواره است و به استهلاک تنش نرمال عمود بر دیواره و افزایش تنش‌های موازی با دیواره می‌انجامد. این جمله به صورت رابطه (۱۴) مدل می‌شود که در آن π_k مؤلفه x_k مربوط به بردار یکه عمود بر دیواره و d فاصله عمودی تا دیواره است.

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2} + \Phi_{ij,w} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\Phi_{ij,1} \equiv C_1 \rho \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right]; C_1 = 1.8 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\Phi_{ij,2} \equiv -C_2 \left[(P_{ij} + F_{ij} + G_{ij} - C_{ij}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} (P_{kk} + G_{kk} - C_{kk}) \right]; C_2 = 0.6 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\Phi_{ij,w} = C_1'' \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{u'_k u'_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_i u'_k n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k n_i n_k} \right) \frac{C_l k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon d} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$+ C_2'' \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{\phi_{km,2} n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{\phi_{ik,2} n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{\phi_{jk,2} n_i n_k} \right) \frac{C_l k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon d}; C_1'' = 0.5, C_2'' = 0.3$$

$$C_l = C_\mu^{\frac{3}{4}} / \kappa; c_\mu = 0.09, \kappa = 0.4187 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

همچنین تانسور اتلاف (ϵ_{ij}) به واسطه رابطه (۱۶) مدل‌سازی می‌شود.

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \epsilon + Y_M); Y_M = 2 \rho \epsilon M_t^2; M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}; a = \sqrt{\gamma R T} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

نگاهی به معادلات فوق نشان دهنده وجود جملات مربوط به انرژی جنبشی اغتشاشی (k) و نرخ اتلاف اغتشاشی (ϵ) در مدل‌های ارائه شده است. لذا تکمیل این معادلات مستلزم یافتن مقادیر مربوط به این پارامترها است. انرژی جنبشی اغتشاشی با توجه به تانسور تنش رینولدر به صورت رابطه (۱۷) قابل محاسبه است. اما جهت محاسبه نرخ اتلاف از معادله ترانسپورته استفاده می‌شود که تقریباً مشابه معادله ترانسپورت ϵ در مدل Standard K - ϵ است؛ که به صورت رابطه (۱۸) ارائه شده است.

^۱ Fluent

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{3\epsilon} G_{ii}] \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_\epsilon = 1$

مدل سازی اختلاط با استفاده از روش Composition PDF Transport

یک جایگزین برای رینولدز-میانگین گیری از معادلات بقاء گونه‌های شیمیایی و معادله بقاء انرژی، استخراج یک معادله انتقال برای تابع چگالی احتمال مشترک تک نقطه‌ای آنها (*PDF*) است. در واقع این تابع احتمال که با P نشان داده می‌شود، کسری از زمان است که سیال در هر حالت ترموشیمیایی (گونه شیمیایی و دما) صرف می‌کند. بنابراین P دارای $N + 1$ بُعد برای N گونه شیمیایی و دما است. بنابراین با دانستن *PDF* در هر نقطه از میدان محاسباتی می‌توان حالت ترموشیمیایی (شامل مقادیر میانگین و نوسانات دما، گونه‌های شیمیایی، نرخ واکنش‌های شیمیایی) را در آن نقطه محاسبه نمود. این معادله انتقال به صورت زیر استخراج شده است.

$$\frac{\partial(\rho P)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i P)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho S_k P)}{\partial \psi_k} = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \langle u_i'' | \psi \rangle P] + \frac{\partial}{\partial \psi_k} \left[\rho \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial J_{i,k}}{\partial x_i} \middle| \psi \right\rangle P \right] \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در رابطه (۱۹)، P تابع احتمال تک نقطه‌ای، ρ چگالی سیال، u_i بردار سرعت متوسط، S_k نرخ واکنش گونه شیمیایی k ، ψ بردار ترکیب شیمیایی، u_i'' بردار سرعت نوسانی و $J_{i,k}$ بردار شار دیفیوژن مولکولی است.

ترم‌های سمت چپ رابطه (۱۹) بسته هستند ولی ترم‌های سمت راست نیاز به مدل سازی دارند. ترم‌های سمت چپ معادله به ترتیب نرخ زمانی تغییر *PDF*، تغییر *PDF* در اثر جابجایی توسط میدان جریان متوسط و تغییر *PDF* به واسطه واکنش‌های شیمیایی هستند. ترم‌های سمت راست معادله نیز به ترتیب بیانگر تغییر *PDF* متأثر از شار اسکالر اغتشاشی و اختلاط/دیفیوژن مولکولی هستند.

در نرم افزار فلونت مدل سازی ترم تغییر ناشی از شار اسکالر اغتشاشی با استفاده از فرض گرادیان-پخش به صورت رابطه (۲۰) مدل سازی می‌شود.

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \langle u_i'' | \psi \rangle P] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\rho \mu_t}{Sc_t} \frac{\partial P}{\partial x_i} \right] \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

از آنجایی که *PDF* به صورت نقطه تکی توصیف شده است، در محاسبات مربوط به هر سلول محاسباتی اطلاعات نقاط همسایه استفاده نمی‌شود و تمام عبارات دربرگیرنده گرادیان، از جمله اختلاط مولکولی، بسته نمی‌شوند نیاز به مدل سازی دارند. این مدل سازی در برخی از کاربردها، نظیر احتراق که در کوچکترین مقیاس‌های مولکولی رخ می‌دهد؛ بسیار حائز اهمیت است. با این وجود مدل سازی اختلاط در روش‌های *PDF* به سادگی ممکن نیست.

یکی از روش‌های مدل سازی اختلاط گونه‌های شیمیایی و حرارت استفاده از مدل $EMST^1$ است. یکی از مدل‌هایی است که محلی بودن اختلاط مولکولی را در نظر می‌گیرد و لذا دارای دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها است. با این وجود استفاده از این مدل اختلاط مولکولی منجر به افزایش هزینه محاسباتی نیز می‌شود [۳۱-۳۲]

به طور خلاصه در این مدل سازی از الگوریتم Simple به منظور حل معادلات $RANS^2$ در کنار مدل اغتشاشی RSM و مدل $CPDF$ به منظور پیش‌بینی چگونگی اختلاط گونه‌های شیمیایی (که به آن‌ها اشاره شد) استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی معادلات از روش $QUICK^3$ استفاده شده است. این روش در شبکه‌های با سازمان^۴ توسعه یافته در مسیر جریان

¹ Euclidean Minimum Spanning Tree

² Reynolds Averaged Navier Stokes

³ Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics

⁴ Structured

منجر به نتایج با دقت بالاتری می‌شود؛ و در شبکه‌های بی‌سازمان^۱ به صورت خودکار از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده می‌نماید. شبیه‌سازی به صورت ضمنی^۲، در فضای متقارن محوری و به صورت پایا^۳ صورت گرفته است. به منظور بررسی همگرایی، دو معیار کاهش میزان باقیمانده‌های حل عددی به کمتر از $0/0001$ و عدم تغییر مقادیر باقیمانده‌ها در هر تکرار مورد بررسی قرار گرفت.

میدان محاسباتی و شرایط مرزی

در شکل ۵، میدان محاسباتی، شرایط مرزی و شبکه محاسباتی ارائه شده است. به منظور شبکه‌بندی میدان محاسباتی از شبکه بدون‌سازمان با الگوی مربعی استفاده شده است. به منظور کاهش اثر مرزهای بیرونی روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی طول و عرض میدان محاسباتی به ترتیب ۳۰ و ۱۵ برابر قطر چرخاننده مرکزی در نظر گرفته شده است. با توجه به هندسه سه‌بعدی ورودی‌های چرخاننده‌های مرکزی و کناری امکان مدل‌سازی مستقیم آن‌ها در شبیه‌سازی متقارن محوری وجود ندارد. به منظور رفع این مشکل مساحت کانال‌های ورودی هوای محاسبه شده و شیارهای حلقوی با مساحت معادل نقش تزریق جریان به درون چرخاننده مرکزی و کناری را در ایفا می‌کند. پیش‌تر بنیم و همکاران از ایده‌ای مشابه برای شبیه‌سازی جریان پیچشی درون یک مشعل استفاده کرده بودند [۳۳]. عرض این شیارهای حلقوی با در چرخاننده‌های مرکزی و کناری به ترتیب $1/08$ و $1/67$ میلی‌متر است. در واقع در این مدل‌سازی فرض بر این است که چرخاننده‌های شعاعی دارای عملکردی ایده‌آل بوده و جهت جریان خروجی از آن‌ها کاملاً با هندسه چرخاننده‌ها منطبق است. با توجه به این موضوع زاویه ورود جریان از چرخاننده‌های شعاعی به ورودی‌های مرکزی و کناری با توجه به هندسه آن‌ها استخراج می‌شود. روی تمامی ورودی‌ها شامل ورودی‌های مماسی و محوری چرخاننده‌ها و همچنین ورودی سوخت، از شرط مرزی دبی جرمی استفاده شده است. روی تمامی دیواره‌ها شامل دیواره بیرونی مشعل و کف میز آزمون شرط عدم لغزش اعمال شده است با توجه به اهمیت دیواره‌های داخلی مشعل در مدل‌سازی ساختار جریان روی دیواره‌های داخلی مشعل شرط $Y^+ < 1$ همواره برقرار است. تمامی مرزهای خروجی به صورت مرز فشار ثابت با فشار نسبی صفر مدل‌سازی شده‌اند.

به منظور بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی از سه شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی متفاوت مطابق با جدول ۳ برای شبیه‌سازی جریان خروجی از مشعل در شرایط عملکردی SW11 استفاده شده است. علت این انتخاب، وجود ناپایداری‌هایی از جمله شکست گردابه در جریان‌های پر پیچش است که نیازمند دقت بیشتر در فرایند تولید شبکه است. شبکه درشت شامل ۲۷۵۰۰ سلول در چرخاننده مرکزی، ۵۱۷۵ سلول در چرخاننده کناری، ۱۰۰ سلول در مسیر ورود سوخت، ۱۴۹۴۸۰ سلول در خارج مشعل و در مجموع شامل ۱۸۲۲۵۵ سلول است. تعداد کلی سلول‌ها برای شبکه‌های متوسط و ریز به ترتیب ۷۲۹۰۲۰ و ۲۹۱۶۰۸۰ است. در فرایند تولید شبکه درشت به این نکته توجه شده است که سایز بزرگ‌ترین سلول درون چرخاننده‌های مرکزی و کناری بیش از $0/2$ میلی‌متر نباشد. این مقدار برای شبکه‌های متوسط و ریز به ترتیب $0/1$ و $0/05$ میلی‌متر است. در شکل ۶، شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹ به ترتیب نمودار تغییرات سرعت‌های محوری، شعاعی و مماسی و کسر مخلوط در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ میل‌متر از خروجی مشعل برای شبکه‌های درشت، متوسط و ریز ارائه شده است. همانگونه که در این نمودارها مشخص است، افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی علی‌رغم افزایش شدید هزینه محاسباتی، تغییرات قابل‌توجهی در نحوه پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی جریان و اختلاط سوخت و اکند ایفا نکرده است. با توجه به این نتایج از شبکه درشت به منظور انجام سایر شبیه‌سازی بهره گرفته شده است.

جدول ۳ - تعداد سلول‌های محاسباتی مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی

Table 3- cell count used for numerical simulation

In the Burner	Out of the	Total
---------------	------------	-------

¹ Unstructured

² Implicit

³ Steady

Number of Cells	Inner Swirler	Outer Swirler	Fuel Line	Burner	
Coarse	27500	5175	100	149480	182255
Medium	110000	20700	400	597920	729020
Fine	440000	82800	1600	2391680	2916080

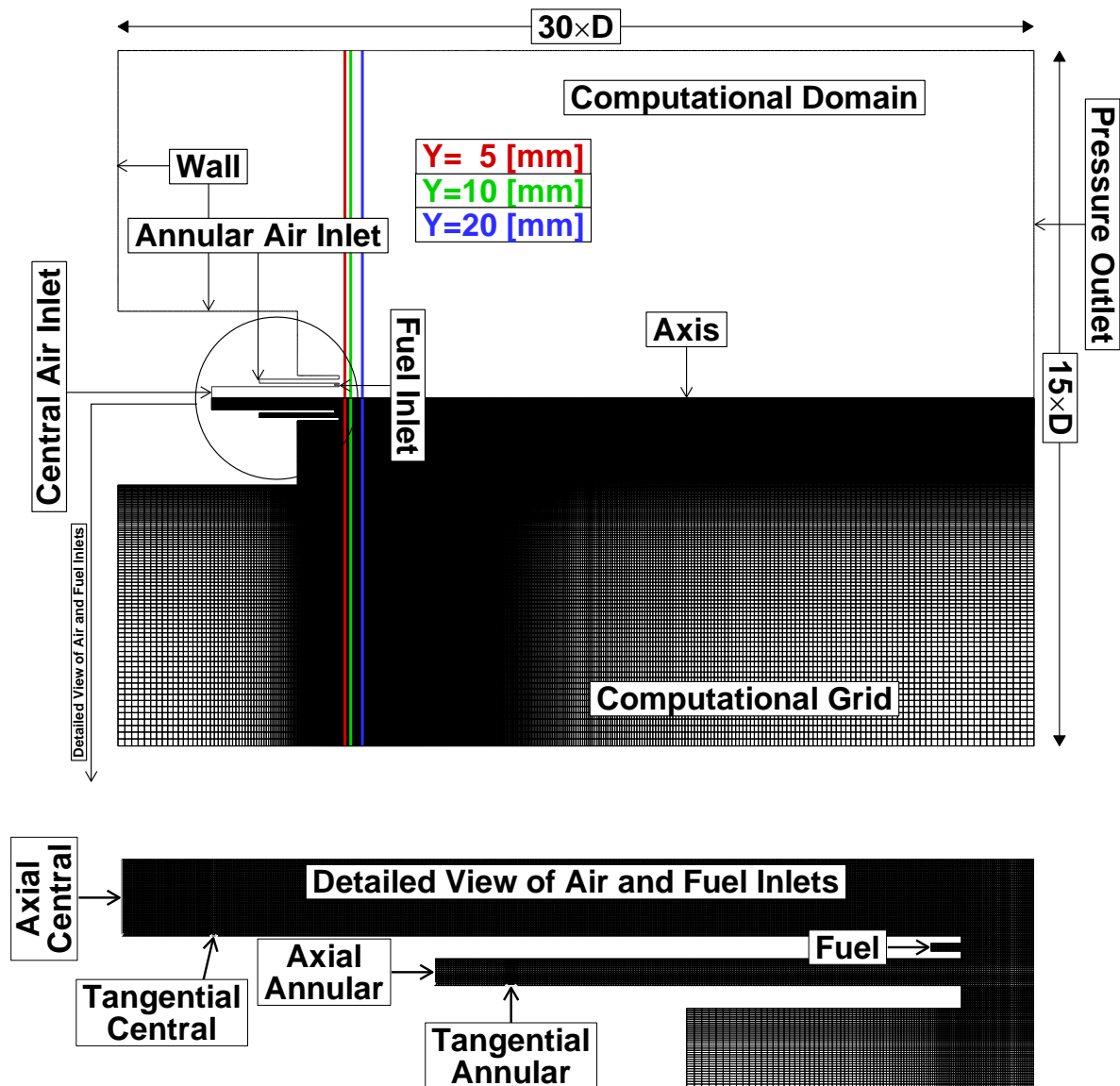


Figure 5- Computational domain and boundary conditions

شکل ۵- شبکه، میدان محاسباتی و شرایط مرزی به کارگرفته شده در فرآیند مدل سازی

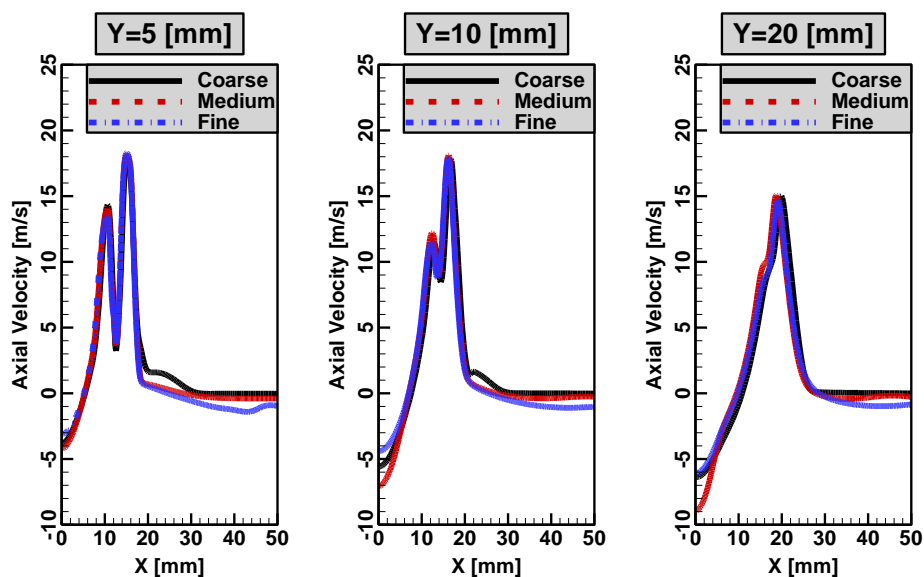


Figure 6- comparison of axial velocity for coarse, medium and fine grids at the axial sections

شکل ۶- نمودار تغییرات سرعت محوری بر حسب فاصله از محور مشعل در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری از خروجی مشعل برای شبکه درشت، متوسط و ریز

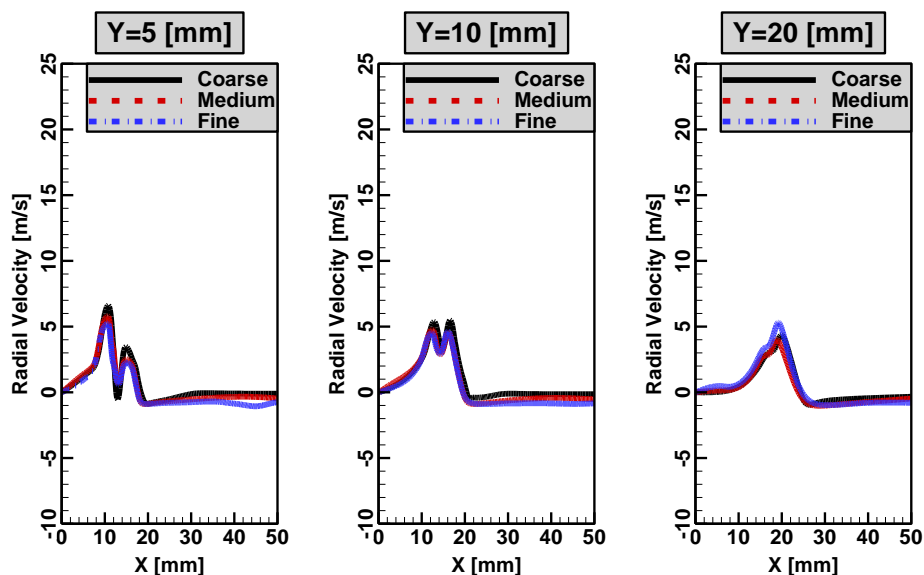


Figure 7- comparison of radial velocity for coarse, medium and fine grids at the axial sections

شکل ۷- نمودار تغییرات سرعت شعاعی بر حسب فاصله از محور مشعل در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری از خروجی مشعل برای شبکه درشت، متوسط و ریز

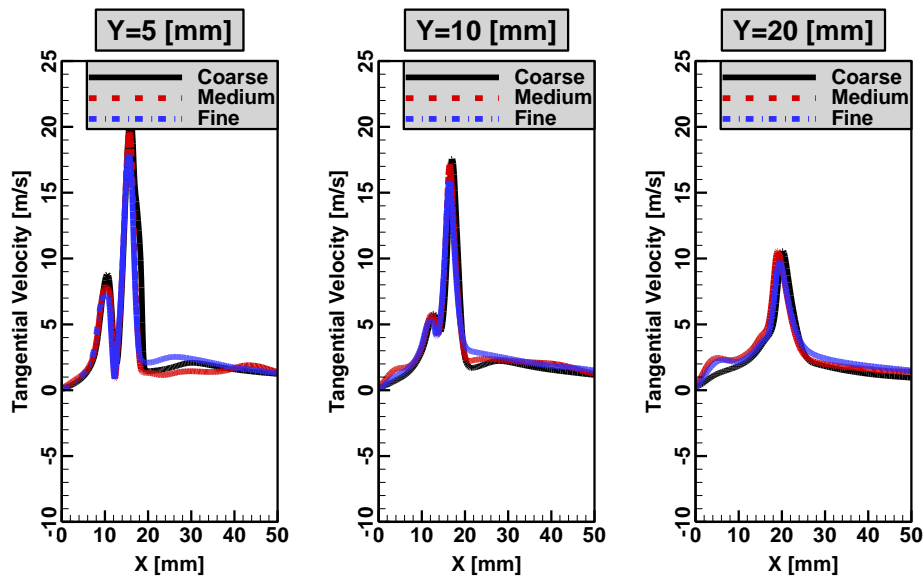


Figure 8- comparison of tangential velocity for coarse, medium and fine grids at the axial sections

شکل ۸- نمودار تغییرات سرعت مماسی بر حسب فاصله از محور مشعل در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری از خروجی مشعل برای شبکه درشت، متوسط و ریز

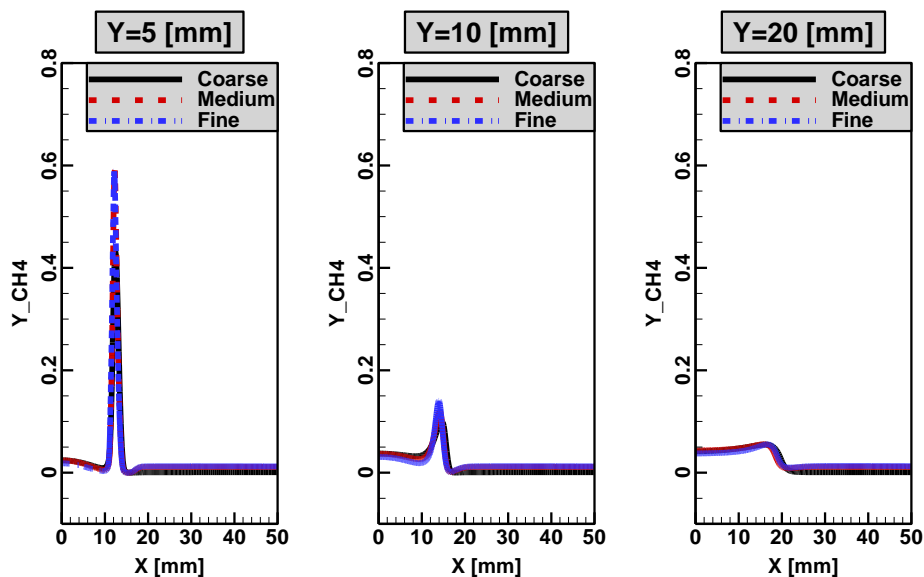


Figure 9- comparison of CH_4 mass fraction for coarse, medium and fine grids at the axial sections

شکل ۹- نمودار تغییرات کسر جرمی گاز متان بر حسب فاصله از محور مشعل در فواصل ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری از خروجی مشعل برای شبکه درشت، متوسط و ریز

در این مقاله از شبیه‌سازی عددی به عنوان ابزاری به منظور پر کردن خلاء ابزار اندازه‌گیری میدان جریان و الگوی اختلاط استفاده شده است. با توجه به اینکه مجموعه داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت جریان و کسر مخلوط که بتوان مستقیماً از آن به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی بهره برد وجود ندارد. به منظور صحت‌سنجی بر نتایج شبیه‌سازی می‌توان به نتایجی که پیش‌تر توسط یکی از مردانی و فضل‌الهی [۳۴، ۳۵] ارائه شده است استناد کرد. در مقاله مذکور جریان درون یک محفظه احتراق با الگوی جریانی مشابه با مشعل به کار گرفته شده در مطالعه حاضر مورد شبیه‌سازی و صحت‌سنجی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر نیز روشی کاملاً مشابه با مورد ذکر شده به کار گرفته شده است که می‌توان مؤیدی بر صحت نتایج شبیه‌سازی‌های مقاله کنونی باشد.

تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش نتایج آرایه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. ابتدا به، محدوده پایداری و آشکارسازی^۱ شعله‌ها پرداخته می‌شود و پارامترهای هندسی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن میدان جریان سرد و الگوی اختلاط که با روش عددی محاسبه شده است ارائه شده، پس از آن ضریب اشتعال‌پذیری و احتمال اشتعال موفق بررسی می‌شود، و در انتها به چگونگی انتشار شعله و تشکیل شعله پایدار پرداخته می‌شود.

حد پایین پایداری شعله‌ها

در هر یک از شرایط عملکردی مشعل، حد پایین پایداری شعله به معنای کمترین مقدار سوخت (یا نسبت هم‌ارزی سوخت و اکسنده) است که به ازای آن شعله پایدار تشکیل می‌شود. در واقع در نسبت‌های هم‌ارزی پایین‌تر از این مقدار، شعله بصورت پایدار تشکیل نخواهد شد و تنها به ازای مقادیر بالاتر، شعله پایدار تشکیل می‌شود. به منظور اندازه‌گیری حد پایین پایداری، در هر یک از شرایط عملکردی ابتدا مشعل را با مقدار زیادی سوخت روشن کرده و سپس به تدریج مقدار سوخت را کاهش می‌دهیم تا جایی که شعله خاموش شود. مقدار سوخت در این لحظه معادل مرز پایداری است. در واقع در هر یک از شرایط عملکردی، در مقادیر سوخت بیشتر از حد پایداری مشعل روشن می‌شود و در مقادیر کمتر مشعل روشن نخواهد شد. شکل ۱۰ نمودار تغییرات حد پایین پایداری^۲ که بر اساس نسبت هم‌ارزی کل (ϕ_{global})، بدست آمده را بر حسب عدد پیچش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت با افزایش عدد پیچش از ۰/۵ تا حدود ۰/۹ حد پایین پایداری کاهش می‌یابد. این موضوع با افزایش میزان اختلاط در جریان‌های با عدد پیچش بالا توجیه می‌شود. برای حالت ($Sw05$) حداقل نسبت هم‌ارزی کل برای ایجاد شعله پایدار، ۰/۶۹ است، در حالیکه این مقدار برای حالت ($Sw09$)، ۰/۵۳ است. با افزایش بیشتر عدد پیچش، حد پایین پایداری به ۰/۵۸ برای حالت ($Sw11$) می‌رسد. در واقع حالت $Sw09$ دارای کمترین حد پایین پایداری است که تحلیل این موضوع با توجه به الگوی اختلاط در بخش ۰ آرایه می‌شود.

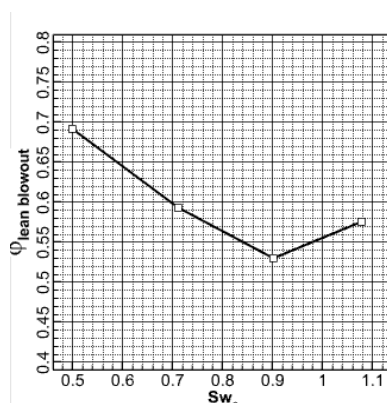


Figure 10- variations of lean blow out limit versus swirl number

شکل ۱۰- نمودار حد پایین پایداری بر حسب عدد پیچش

آشکارسازی شعله‌ها

در شکل ۱۱، تصاویر شعله‌های پایدار مربوط به شرایط عملکردی مذکور در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در این شکل اثر افزایش عدد پیچش $Sw = 0.5 \sim 1.1$ بر ساختار شعله نمایش داده شده است. ردیف بالا شامل تصاویر لحظه‌ای است که با زمان نوردهی یک صدم ثانیه ثبت شده‌اند. تصاویر ردیف پایین میانگین ۲۰۰ تصویر لحظه‌ای است و در واقع نشان‌دهنده شکل ظاهری شعله است که توسط چشم قابل رویت است. بررسی این تصاویر نشان می‌دهد که افزایش عدد پیچش باعث کاهش اندازه برخاستگی و ارتفاع شعله می‌شود. همانطور که در نمودار شکل ۱۲ مشخص است شعله‌ها با فاصله از دهانه مشعل

¹ Visualization

² Lower Stability Limit

تشکیل می‌شوند، این برخاستگی در شعله‌ی با بیشترین عدد پیچش ۶ میلی‌متر و برای شعله با کمترین عدد پیچش، ۳۰ میلی‌متر است، و ارتفاع شعله از $h = 115$ [mm] برای حالت کمترین عدد پیچش تا $h = 65$ [mm] برای حالت بیشترین عدد پیچش متغیر است. شعله‌ها کاملاً پایدار هستند بجز شعله‌ی با عدد پیچش پایین که نزدیک به محدوده خاموشی رقیق قرار دارد. به عبارتی با افزایش عدد پیچش فرایند اختلاط بهبود یافته و اختلاط در فاصله کمتری از دهانه مشعل کامل می‌شود و منجر به کوتاه‌تر شدن شعله و پایداری آن خواهد شد. نوارهای خطا^۱ در شکل ۱۲ جهت کمی‌سازی نوسانات برخاستگی و ارتفاع شعله استفاده شده‌اند. مشاهده می‌شود هرچه عدد پیچش بیشتر باشد باعث پایداری بیشتر شعله و کمتر شدن نوسانات مرزهای شعله می‌شود. تمام شعله‌ها، عملکردی پایدار دارند و با توجه به رقیق بودن کلی، شعله بدون دوده بوده و شعله به رنگ آبی دیده می‌شود. با دقت در تصاویر می‌توان دریافت که در حالت‌های با عدد پیچش کم، شعله بشکل حرف V و دارای شدت نور کمتر و یکنواخت‌تر بوده، در حالی که با افزایش عدد پیچش، شکل شعله به تدریج به شکل حرف U تغییر یافته و شدت نور بیشتر با تمرکز در لبه‌های شعله مشاهده می‌شود.

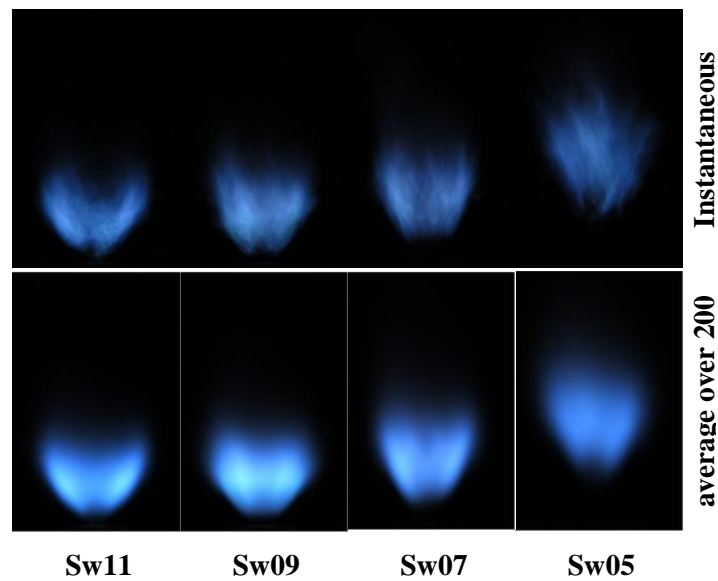


Figure 11- Ignited flame image (Image domain is 100×150 [mm])- first row: instantaneous; second row: average.

شکل ۱۱- تصاویر شعله (میدان تصویربرداری 100×150 [mm]) - ردیف اول: تصویر لحظه‌ای؛ ردیف دوم: تصویر میانگین

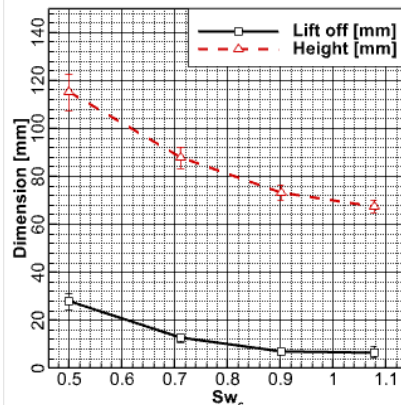


Figure 12- Flame lift off and height

شکل ۱۲- نمودار تغییرات برخاستگی و ارتفاع شعله بر حسب عدد پیچش

¹ Error Bar

میدان جریان

در شکل ۱۳ نقشه خطوط جریان، منتج از شبیه‌سازی دوبعدی میدان جریان سرد در خروجی مشعل برای حالت Sw11 نمایش داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود شاخصه اصلی میدان جریان، ناحیه پیچش درونی^۱ (IRZ) در میانه جریان است که در راستای محور جریان بدلیل شکست گردابه‌ای^۲ ایجاد می‌شود. علاوه بر این، همانطور که در شکل دیده می‌شود یک ناحیه پیچش بیرونی^۳ (ORZ) بسیار بزرگ در این میدان جریان وجود دارد که ناشی از اندازه حرکت^۴ جریان اصلی خروجی از دهانه مشعل است. یک لایه برشی درونی^۵ (ISL) بین ناحیه پیچش درونی (IRZ) و جریان ورودی و یک لایه برشی بیرونی^۶ (OSL) بین جریان ورودی و ناحیه پیچش بیرونی (ORZ) وجود دارد به نحوی که جریان ورودی سوخت توسط لایه‌های برشی درونی و بیرونی احاطه شده است. شکل ۱۴ الگوی محاسبه شده توزیع سرعت محوری^۷ جریان، برای چهار حالت مختلف را نمایش می‌دهد. سرعت‌های منفی در مرکز جریان نمایانگر ناحیه‌های پیچش درونی (IRZ) است که منتج از شکست گردابه می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش عدد پیچش (Sw) حباب ناحیه پیچشی از دهانه مشعل دورتر می‌شود. برای جریان (Sw09) حباب از ارتفاع $h = 7.5$ [mm] شروع و قطر آن کمی کاهش می‌یابد، بطور مشابه برای جریان (Sw07) ناحیه پیچشی به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند و از ارتفاع $h = 41.3$ [mm] شروع می‌شود. در حالت (Sw05) که کمترین عدد پیچش را دارد ساختار جریان مشابه جریان جت متقارن در خروجی مشعل عمل می‌نماید. اثر جریان پیچشی ناچیز و ناپایداری پیچشی به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند، افزایش قطر ناشی از آن به اندازه حالت‌های دیگر نیست و در نهایت منجر به تشکیل حباب پیچشی در پایین دست جریان با فاصله زیاد از دهانه مشعل می‌شود که در شکل قابل مشاهده نیست.

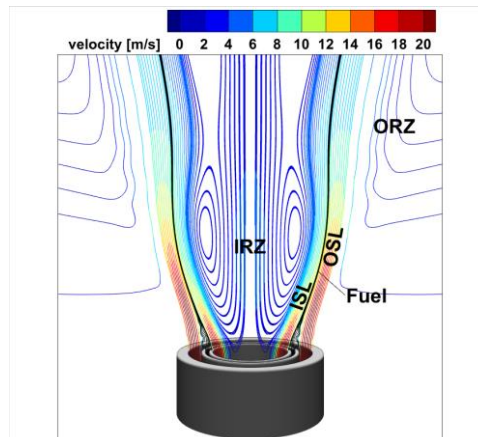


Figure 13- streak lines of visualized velocity field

شکل ۱۳- پیکربندی کلی جریان با استفاده از خطوط جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی برای حالت Sw11

از آنجایی که دینامیک شکست گردابه به میزان پیچش جریان وابسته است، بزرگتر بودن ناحیه پیچش درونی (IRZ) با افزایش عدد پیچش قابل توضیح است.

¹ Internal Recirculation zone

² Vortex Breakdown

³ Outer Recirculation Zone

⁴ Momentum

⁵ Inner Shear Layer

⁶ Outer Shear Layer

⁷ Axial Velocity

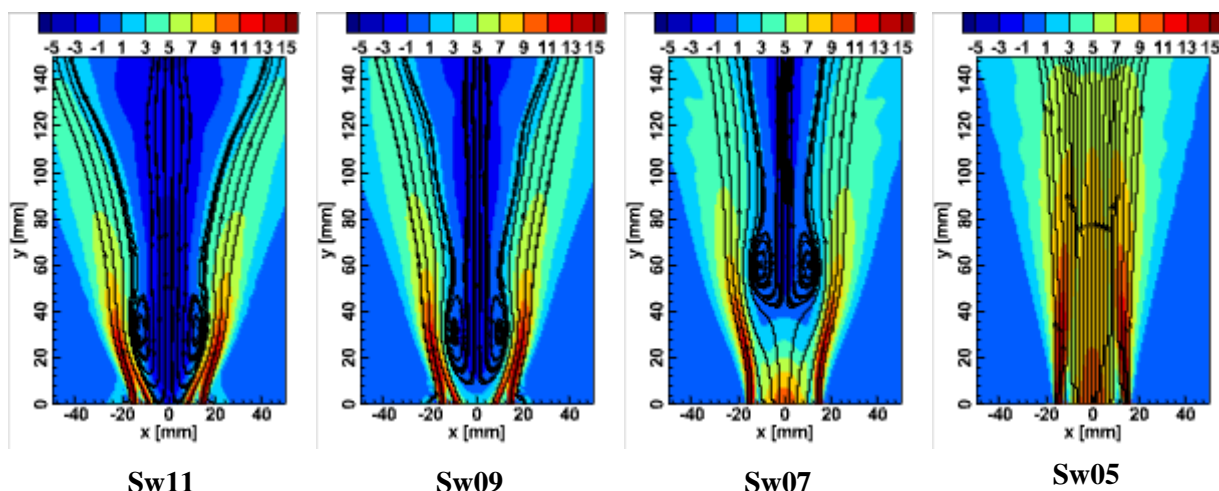


Figure 14- Contours of axial velocity superimposed with streamlines

شکل ۱۴- توزیع سرعت محوری و خطوط جریان در نزدیکی نازل خروجی مشعل بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

الگوی اختلاط

برای درک الگوی اختلاط و ارتباط آن با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری احتمال اشتعال، توزیع کسر مخلوط^۱ با استفاده از مدل CPDF (به عنوان جایگزینی برای حل معادلات بقاء گونه‌های شیمیایی و معادله انرژی) بصورت عددی محاسبه شده است. شکل ۱۵ کسر مخلوط میانگین ($\bar{\xi}$) برای چهار حالت جریان در مجاورت دهانه مشعل را نشان می‌دهد. کسر مخلوط در حالت استوکیومتری ($\xi_{st} = 0.059$) با خطوط سیاه رنگ مشخص شده‌اند، و خطوط نقطه چین جهت نمایش موقعیت نقاط با میانگین کسر مخلوط کل (ξ_{global}) استفاده شده‌اند. از الگوی اختلاط در حالت Sw11 مشاهده می‌شود بیشترین مقدار سوخت در ناحیه پیچش درونی (IRZ) محبوس شده و در ناحیه پیچش بیرونی (ORZ) اثری از سوخت یافت نمی‌شود. در واقع لایه (OSL) بعنوان حفاظی مابین جریان سوخت و ناحیه (ORZ) عمل می‌نماید و مانع نفوذ سوخت به این ناحیه می‌شود. در شرایط عملکردی Sw11 مقدار متوسط کسر مخلوط در ناحیه IRZ بیشتر از کسر مخلوط کل (ξ_{global}) است. بنابراین احتمال تشکیل ناحیه با دمای بالاتر از دمای آدیاباتیک کل ($T_{ad,global}$) را در این ناحیه امکان‌پذیر نموده که می‌تواند تأثیر مثبتی بر اشتعال و پایداری شعله داشته باشد. در شرایط Sw11 بیشترین مقدار کسر مخلوط متوسط در مجاورت دهانه خروجی سوخت مشاهده می‌شود و همانگونه که انتظار می‌رود به سرعت به کمتر از کسر مخلوط استوکیومتری $\xi_{st} = 0.059$ در پایین دست جریان در یک فاصله حدود 34 [mm] از دهانه مشعل کاهش می‌یابد. این مسئله نشان می‌دهد که عمل اختلاط به خوبی برای این حالت انجام شده است. در نواحی فراتر از لایه OSL، درون ناحیه ORZ تقریباً فقط هوا وجود دارد و مقدار سوخت نزدیک به صفر است. کسر مخلوط درون ناحیه IRZ به شدت به تغییر عدد پیچش حساس است. بطور کلی افزایش عدد پیچش منتج به افزایش نرخ اختلاط سوخت خواهد شد. در جریان Sw11 انتقال از حالت مخلوط غنی از سوخت^۲ به رقیق به سرعت و نزدیک به دهانه مشعل اتفاق می‌افتد. مخلوط غنی مانند یک حلقه که قطر آن به اندازه خروجی سوخت است عمل می‌نماید و با پیشروی به سمت پایین دست جریان قطرش به تدریج افزایش می‌یابد. علاوه بر این، گرادیان بالای سرعت بین ناحیه IRZ و لایه ISL تمایل نفوذ سوخت به سمت لایه برشی داخلی را نسبت به لایه برشی بیرونی بیشتر می‌کند. در هر صورت مقدار بالای پیچش درون ناحیه IRZ کسر مخلوط را در راستای شعاعی سرعت کاهش می‌دهد و به همین دلیل مخلوط غنی فرصت رسیدن به محور مشعل را ندارد و آن را قطع نمی‌کند. در واقع محور مرکزی هیچ‌گاه در معرض مخلوط استوکیومتری قرار نمی‌گیرد. کاهش عدد پیچش در جریان Sw09 باعث کاهش سرعت اختلاط می‌شود از این‌رو سوخت فرصت خواهد داشت درون ناحیه IRZ بیشتر به سمت پایین دست جریان نفوذ کند. مشابه با حالت Sw11،

¹ Mixture Fraction

² Rich Mixture

جریان $Sw09$ گردایان بالای سرعت در لایه ISL باعث نفوذ سوخت به درون ناحیه IRZ می‌شود در حالی که قدرت ناحیه پیچشی به اندازه کافی زیاد نیست تا مانع رسیدن مخلوط غنی به محور مشعل شود. عبارتی مخلوط غنی نه تنها محور مشعل را احاطه کرده است بلکه بخش‌هایی از محور را نیز در جاییکه نقطه سکون وجود دارد، پوشانده است و این دلیل آنست که چرا جریان در شرایط $Sw09$ (همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شد) کمترین حد پایداری را دارد. ویژگی مهم دیگر این جریان که باید به آن اشاره نمود آنست که به دلیل حضور مخلوط در حالت استوکیومتری در نزدیکی محور مشعل، شعله در حالت $Sw09$ در مقایسه با حالت $Sw11$ شعله‌ای با پهنای بیشتر خواهد بود. در واقع انبساط مخلوط استوکیومتری موجود در نزدیکی محور منجر به این می‌شود که شعله $Sw09$ عرض بیشتری نسبت به $Sw11$ داشته باشد. همانطور که پیش از این ذکر شد برای حالت $Sw07$ ناحیه IRZ نسبت به حالت $Sw09$ و $Sw11$ بسمت پایین دست حرکت می‌کند، به عبارتی ناحیه IRZ از ارتفاع $h = 41.3$ [mm] شروع می‌شود. در این حالت حلقه سوخت در معرض هوای ورودی و در ارتباط با لایه های برشی ISL و OSL رقیق می‌شود به نحوی که در ارتفاع $h = 42.2$ [mm] حوالی شروع ناحیه IRZ اختلاط کامل می‌شود. تقویت عملیات اختلاط در این ناحیه (IRZ) باعث کاهش کسر مخلوط به حدود مقدار رقیق^۱ و سخت‌تر شدن احتمال ایجاد شعله پایدار خواهد شد که این مسئله دلیل بالاتر بودن حد پایداری جریان $Sw07$ نسبت به جریان‌های $Sw09$ و $Sw11$ است، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شد. در حالت $Sw05$ سوخت رفتاری شبیه به جریان جت دارد که در معرض هوای ورودی ناشی از لایه‌های برشی درونی و بیرونی است. در این حالت ناحیه IRZ با فاصله زیاد از دهانه مشعل در پایین دست جریان تشکیل می‌شود، و کم بودن گردایان سرعت درون لایه‌های برشی ISL و OSL نسبت به سایر حالت‌ها، باعث تأخیر در اختلاط سوخت و هوا شده و اختلاط در ارتفاع حدود $h = 71.9$ [mm] کامل می‌شود، و تنها سازوکار برای پایداری شعله، ناحیه پیچشی ضعیفی است که در فاصله دور در پایین دست جریان و خارج از شکل است. بنابراین شدت جریان سوخت بیشتری برای افزایش کسر مخلوط در ناحیه IRZ نیاز است تا احتمال تشکیل شعله پایدار افزایش یابد.

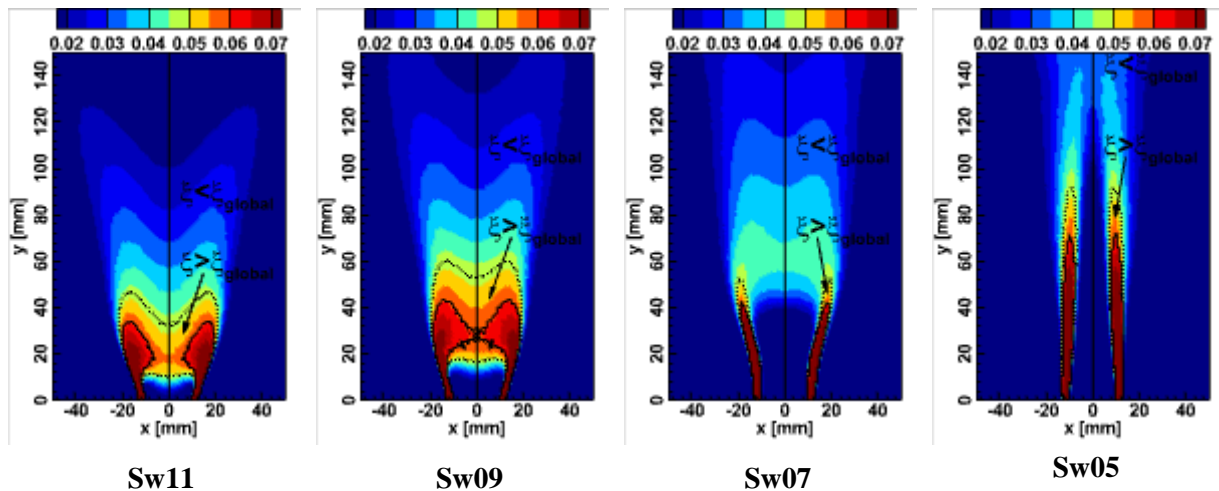


Figure 15- Contours of mean (Right) and RMSE (Left) mixture fraction

شکل ۱۵- توزیع کسر مخلوط میانگین در نزدیکی نازل خروجی مشعل بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

ضریب اشتعال پذیری

ضریب اشتعال‌پذیری نشان‌دهنده میزان قابلیت اشتعال مخلوط سوخت و اکسنده در هر نقطه از میدان جریان است. هر چه این ضریب به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد احتمال اشتعال مخلوط سوخت و اکسنده بیشتر بوده و هر چه مقدار آن به عدد صفر میل کند، این احتمال کاهش می‌یابد. با استفاده از رابطه (۲۱) که یک تابع چگالی احتمال (PDF) گاوسی^۲ است و با انتگرال‌گیری

¹ Lean Value

² Gaussian PDF

از آن در محدوده $\xi_{lean} = 0.028$ و $\xi_{rich} = 0.089$ مطابق تعریف رابطه (۱) ضریب اشتعال پذیری در هر نقطه از میدان جریان مطابق رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود [۳۶]. در روابط زیر ξ مقدار میانگین و ξ' متوسط نوسانات کسر مخلوط در هر نقطه می‌باشند.

$$PDF_G(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi'^2} \exp\left(-\frac{(\xi - \bar{\xi})^2}{2\xi'^2}\right) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$FF_G = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\xi_{rich} - \bar{\xi}}{\sqrt{2}\xi'^2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_{lean} - \bar{\xi}}{\sqrt{2}\xi'^2}\right) \right] \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

شکل ۱۶ نقشه ضریب اشتعال پذیری محاسبه شده برای چهار حالت عملکردی را نشان می‌دهد. می‌بینیم که برای حالت‌هایی که پیچش در آنها غالب است، اکثر مخلوط قابل اشتعال درون ناحیه *IRZ* قرار دارد و میانگین کسر مخلوط در این نواحی از کسر مخلوط کل (ξ_{global}) بیشتر بوده و تقریباً نزدیک به مقدار استوکیومتری است. همانطور که پیش از این ذکر شد، افزایش در عدد پیچش باعث افزایش نرخ اختلاط می‌شود. به این دلیل اشتعال پذیری در دهانه خروجی مشعل برای حالت *Sw11* زیاد و برای حالت‌های *Sw09* و *Sw07* ناحیه اشتعال پذیر با تغییر مکان ناحیه *IRZ* به سمت پایین دست جریان حرکت می‌نماید. در حالت‌های *Sw09* و *Sw11* بخاطر نرخ بالای اختلاط، کسر مخلوط به سرعت به زیر مقدار کسر مخلوط غنی (ξ_{rich}) کاهش می‌یابد و از این رو ناحیه نزدیک به دهانه خروجی مشعل در ناحیه اشتعال پذیر واقع می‌شود در حالی که برای حالت *Sw07* به دلیل نرخ پایین اختلاط، ناحیه نزدیک به دهانه خروجی مشعل، ناحیه بسیار غنی و اشتعال ناپذیر است. همانطور که پیش از این توضیح داده شد لایه برشی بیرونی *OSL* نقش مهمی در جلوگیری از نفوذ سوخت به ناحیه *ORZ* ایفا می‌نماید به نحوی که مخلوط در این ناحیه بسیار رقیق و در نتیجه غیرقابل اشتعال است و این مسئله در مصرف بهینه سوخت مؤثر است. در حالت *Sw05* ناحیه پیچش درونی *IRZ* در ارتفاع کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر مشاهده نمی‌شود و بنابراین سازوکار همرفت در اختلاط سوخت مؤثر نخواهد بود، در واقع اکثر اختلاط در اطراف مسیر حرکت سوخت و به واسطه نفوذ به لایه‌های برشی درونی و بیرونی *ISL* و *OSL* اتفاق می‌افتد. در این حالت بیشترین مقدار اشتعال پذیری (بین ۰/۸ تا ۰/۸۵) در محدوده ارتفاع (۶۵ تا ۱۰۵ میلی‌متر) است. به هر شکل، با توجه به نفوذ سوخت درون لایه‌های *ISL* و *OSL* ناحیه اشتعال پذیر تنها در اطراف این دو لایه قابل مشاهده است.

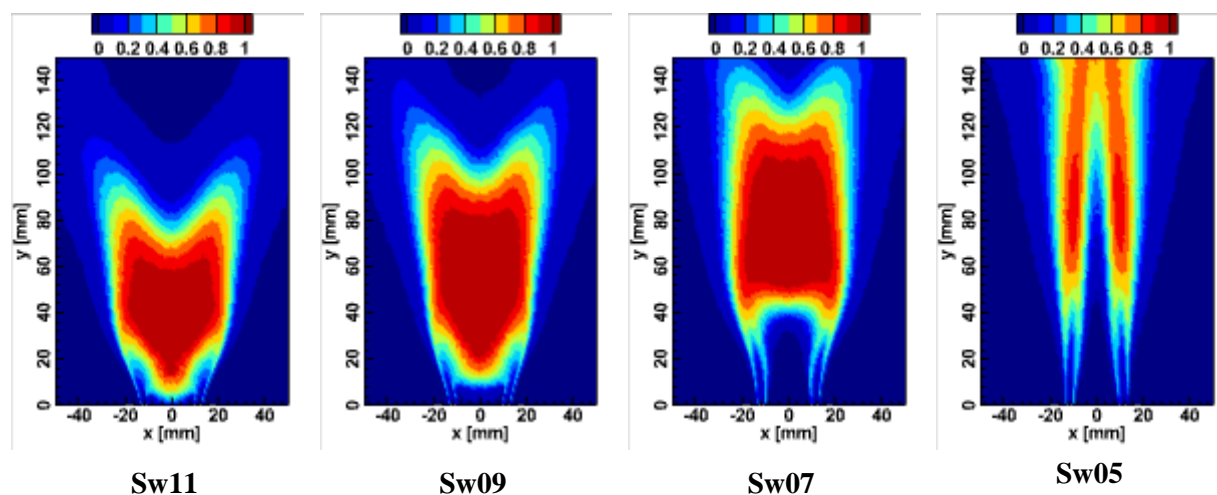


Figure 16- Contours of flammability factor calculated based on gaussian assumption

شکل ۱۶- توزیع ضریب اشتعال پذیری در نزدیکی نازل خروجی مشعل محاسبه شده با فرض تابع احتمال با توزیع گوسی

توزیع احتمال اشتعال موفق

در این بخش توزیع احتمال اشتعال موفق برای شرایط عملکردی ذکر شده در جدول ۲، ارائه شده است. پیش‌تر روش اندازه‌گیری احتمال اشتعال موفق در بخش تجهیزات آزمون، بیان شد. لازم به یادآوری است که اشتعال موفق در این پژوهش، به عنوان فرایندی تعریف می‌شود که منجر به تشکیل شعله پایدار شود. ابعاد نقشه‌های احتمال اشتعال در محدوده مرزهای قابل‌رؤیت شعله و با دقت ۲ میلی‌متر در راستای شعاعی و محوری مشعل بدست آمده‌اند. قرارگیری الکترودها در نزدیکی دهانه خروجی مشعل میدان جریان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد لذا برای جلوگیری از این سوء اثرات اندازه‌گیری احتمال اشتعال موفق در محدوده $h \geq 10$ [mm] انجام شده است. در شکل ۱۷ نقشه‌های احتمال اشتعال موفق اندازه‌گیری شده، نمایش داده شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری برای شرایط عملکردی Sw11، می‌توان نقشه احتمال اشتعال موفق را به سه ناحیه مختلف تقسیم کرد. خط مشکی رنگ و خط چین به عنوان مرز جداکننده این نواحی ترسیم شده‌اند. ناحیه خارج از خط مشکی، جایی که احتمال اشتعال موفق پایین بوده و شامل منطقه با شعاع بیشتر از $r > 20$ [mm] و ارتفاع بیشتر از $h > 35$ [mm] است. در این محدوده احتمال اشتعال موفق حداکثر ۲۰ درصد است، و به آن ناحیه **غیر مؤثر^۱** گفته می‌شود. ناحیه‌ای که بین خط مشکی و خط چین واقع شده است، به عنوان موقعیت مکانی نقاطی تعریف شده که احتمال اشتعال موفق شامل یک بازه از ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد است. در این ناحیه احتمال اشتعال موفق به شدت به موقعیت الکتروود وابسته است و هرگونه تغییر جزئی در موقعیت آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی در احتمال موفقیت اشتعال داشته باشد. این ناحیه به عنوان ناحیه **گذار^۲** شناخته می‌شود. ناحیه سوم بخش داخلی خط چین را شامل می‌شود و دربرگیرنده نقاطی است که احتمال اشتعال موفق در آن‌ها بیشتر از ۸۰ درصد است. این ناحیه تحت عنوان ناحیه **احتمال بالا^۳** تعریف می‌شود. کاهش عدد پیچش در پیکربندی Sw09 باعث کاهش ارتفاع ناحیه غیر مؤثر $h > 45$ [mm]، و افزایش احتمال اشتعال موفق شده است. ناحیه گذار بنظر کمی نسبت به حالت Sw11 باریک‌تر شده و ناحیه احتمال بالا گسترده‌تر مشاهده می‌شود. بطور کلی کاهش عدد پیچش از ۱/۱ به ۰/۹ منجر به افزایش ابعاد ناحیه احتمال بالا و بهبود عملکرد اشتعالی شده است. در وضعیت Sw07 عدد پیچش به اندازه کافی بالا نیست که بتواند ناحیه پیچش درونی IRZ را در نزدیکی دهانه خروجی مشعل حفظ نماید. در واقع اندازه حرکت محوری زیاد جریان هوای ورودی، حباب ناحیه پیچشی را بسمت پایین دست جریان می‌راند، در نتیجه اختلاط سوخت و هوا با تأخیر انجام می‌شود و همانطور که در شکل ۱۶ برای این حالت مشاهده می‌شود ضریب اشتعال‌پذیری در ارتفاع $h < 40$ [mm] تقریباً صفر است. با دقت نظر در نقشه احتمال اشتعال مشاهده می‌شود که به جز اطراف دهانه خروجی مشعل، محدوده $h < 25$ [mm] در ناحیه غیر مؤثر واقع شده است و در ارتفاع بین $h = 25 \sim 40$ [mm] انرژی اعمال شده منجر به تشکیل هسته شعله نخواهد شد ولی این انرژی می‌تواند به ناحیه IRZ در ارتفاع بین $h = 41 \sim 81$ [mm] هدایت^۴ شده و در موقعیتی که اختلاط کافی صورت گرفته و مخلوط قابل اشتعال وجود دارد، منجر به تشکیل هسته شعله شده و نهایتاً شعله‌ای پایدار ایجاد نماید. با حرکت به سمت پایین دست جریان و لبه بالایی ناحیه IRZ احتمال اشتعال موفق کاهش می‌یابد. زیرا گرچه مخلوط قابل اشتعال در این نواحی وجود دارد ولی هسته شعله تشکیل شده با توجه به میدان جریان (شکل ۱۴) ناحیه اشتعال‌پذیر را ترک کرده و نمی‌تواند منجر به شعله پایدار شود. در حالت Sw07 ناحیه احتمال بالا نسبت به حالت‌های Sw11 و Sw09 گستردگی بیشتری دارد. در وضعیت Sw05 ناحیه احتمال بالا به صورت یک حلقه باریک بالای دهانه خروجی مشعل قرار دارد. بیشترین احتمال اشتعال موفق در این حالت در ارتفاعی پایین‌تر در مقایسه با ناحیه اشتعال‌پذیر (شکل ۱۶) اتفاق می‌افتد، این مسئله ناشی از هدایت انرژی اعمال شده به وسیله جریان هوا و سوخت است. در واقع انرژی اعمال شده در ارتفاع بین $h = 25 \sim 40$ [mm] به ارتفاع بین $h = 60 \sim 100$ [mm] که مخلوط قابل اشتعال حضور دارد هدایت شده و منجر به تشکیل شعله پایدار می‌شود.

¹ Ineffective Zone² Transition Zone³ High Probability Zone⁴ Convect

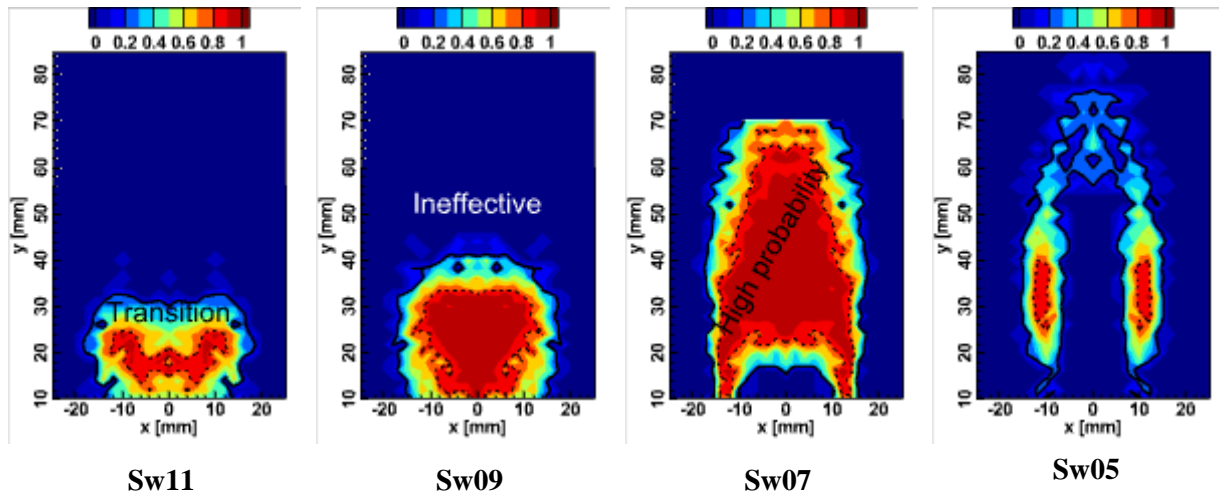


Figure 17- Contours of measured ignition probability

شکل ۱۷- توزیع احتمال اشتعال موفق اندازه‌گیری شده در نزدیکی دهانه خروجی مشعل

نحوه انتشار شعله

شکل ۱۸ تصاویر متوالی از لحظه تشکیل هسته شعله تا رسیدن به شعله پایدار را برای حالت Sw05 نشان می‌دهد. فاصله زمانی بین هر دو تصویر ۲ میلی‌ثانیه بوده و کل بازه تصویربرداری ۲۲ میلی‌ثانیه است. محل قرارگیری الکتروود در مختصات $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm] است؛ بنابراین هسته اولیه شعله نیز در محدوده این نقطه شکل گرفته و به تدریج توسعه می‌یابد. با مقایسه محل قرارگیری شعله در لحظه $t = 2$ [ms] با لحظه $t = 0$ در نگاه اول این‌گونه به نظر می‌رسد که شعله به سمت محور مشعل متمایل شده است اما با توجه به اینکه جریان دارای ماهیت پیچشی است به نظر می‌رسد که پیشروی شعله در جهت زاویه‌ای است. در واقع هسته شعله در حال چرخش پیرامون محور مشعل است. علاوه بر این، شعله دارای جابجایی در جهت محور طولی مشعل نیز است و به عبارت دیگر از دهانه مشعل فاصله بیشتری گرفته است. این موضوع نشان می‌دهد که در این شرایط عملکردی، هسته اولیه شعله درون ناحیه چرخشی داخلی قرار ندارد. البته پیش‌تر نیز به این موضوع اشاره شد که در شرایط عملکردی Sw05 میزان پیچش جریان به اندازه‌ای نیست که توانایی ایجاد ناحیه چرخشی داخلی را داشته باشد. همچنین با مقایسه ابعاد شعله در دو زمان $t = 0$ و $t = 2$ [ms] مشاهده می‌کنیم که ابعاد شعله با گذر زمان در حال رشد است به این معنا که خارج از مرز شعله مخلوط سوخت و هوای قابل اشتعال وجود دارد. در واقع می‌توان دریافت که هسته اولیه به صورت مارپیچی درون ناحیه حلقوی اشتعال‌پذیر مطابق شکل ۱۶ حرکت کرده و توسعه می‌یابد. این فرایند در گام‌های زمانی بعد ادامه می‌یابد تا زمانی که به محدوده $z = 40 \sim 60$ [mm] می‌رسد که بیشترین حد اشتعال‌پذیری قابل قبولی را شامل می‌شود و نهایتاً شعله تمامی ناحیه اشتعال‌پذیر را در بر می‌گیرد.

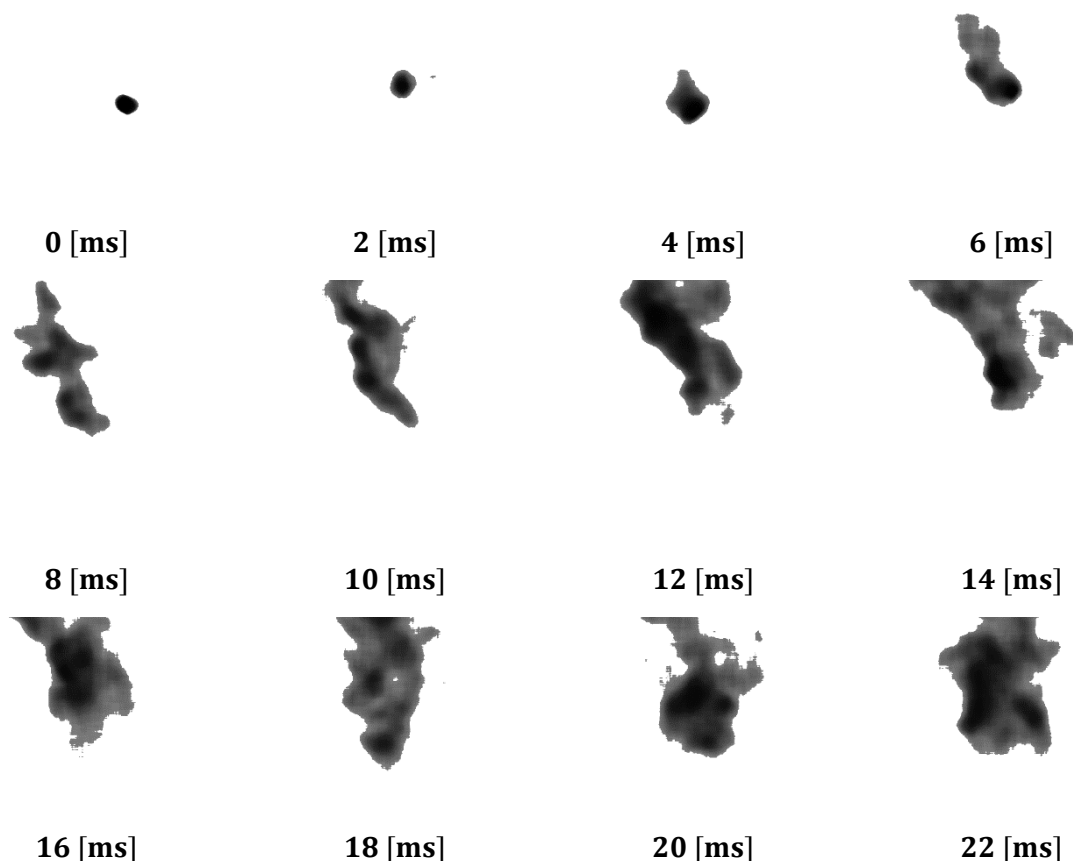


Figure 18- Instantaneous images of the ignition phenomenon for Sw05 conditions; imaging speed of 3000 fps; spark created at location $r = 10$ [mm] and $z = 20$ [mm].

شکل ۱۸- تصاویر لحظه‌ای از پدیده اشتعال برای شرایط Sw05؛ سرعت تصویربرداری ۳۰۰۰ فریم در ثانیه؛ محل ایجاد جرقه $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm]

شکل ۱۹ تصاویر متوالی از لحظه تشکیل هسته شعله تا رسیدن به شعله پایدار را برای حالت Sw07 نشان می‌دهد. به طور مشابه با جریان Sw05، تصاویر ارائه شده در این شرایط عملکردی نیز دارای فاصله زمانی ۲ میلی‌ثانیه بوده ولی بازه زمانی تصویر ارائه شده ۲۰ میلی‌ثانیه است. در این حالت نیز محل قرارگیری الکتروود و در نتیجه محل تشکیل هسته اولیه شعله، در مختصات $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm] است. مقایسه محل قرارگیری شعله در لحظه $t = 2$ [ms] با لحظه $t = 0$ نشان‌دهنده پیچش هسته اولیه حول محور مشعل و در نتیجه حرکت شعله به سمت محور از دید روبه‌رو است. نکته قابل توجه کاهش ابعاد شعله در تصویر دوم نسبت به هسته اولیه است. اما با توجه ماهیت پیچشی جریان می‌توان به بررسی فرضیه کشیدگی هسته شعله در جهت پیچش جریان نیز پرداخت. در واقع در نقطه قرارگیری شعله گرادیان لحظه‌ای سرعت پیچشی به حدی بوده که توانسته شعله را دچار کشیدگی و تغییر شکل، عمود بر زاویه دید عکس نماید. علاوه بر این، شعله دارای جابجایی اندکی در جهت محور طولی مشعل نیز بوده است. این موضوع نشان‌دهنده سرعت محوری ناچیز جریان است و می‌توان حدس زد که در این لحظه شعله در نزدیکی نقطه سکون در زیر ناحیه بازگشتی قرار دارد (شکل ۱۴). با توجه به تصویر شعله در لحظه $t = 4$ [ms] می‌بینیم که لبه بالایی شعله در معرض گرادیان سرعت بالا در جهت محوری دچار کشیدگی می‌شود. این کشیدگی به دلیل سرعت گرفتن جریان در عبور از کنار ناحیه بازگشتی است. می‌توان گفت که در این لحظه شعله در نزدیکی ناحیه بازگشتی قرار دارد؛ با این وجود هنوز وارد حباب ناحیه بازگشتی نشده و به عبارتی در حال دور زدن حباب است. در لحظه $t = 6$ [ms] شعله پس از دور زدن حباب به دلیل افت فشار موجود بعد از ناحیه بازگشتی به درون حباب بازگشتی کشیده می‌شود. در عین حال لبه پایینی شعله که در محدوده نقطه سکون زیر حباب بازگشتی قرار دارد با سوخت جدید تغذیه شده و به آرامی توسعه می‌یابد. در این حالت، وجود ناحیه کم سرعت در زیر ناحیه چرخشی و درون حباب آغازگر فرایند پایدار شدن شعله می‌شود و در ادامه شعله پایدار می‌شود.

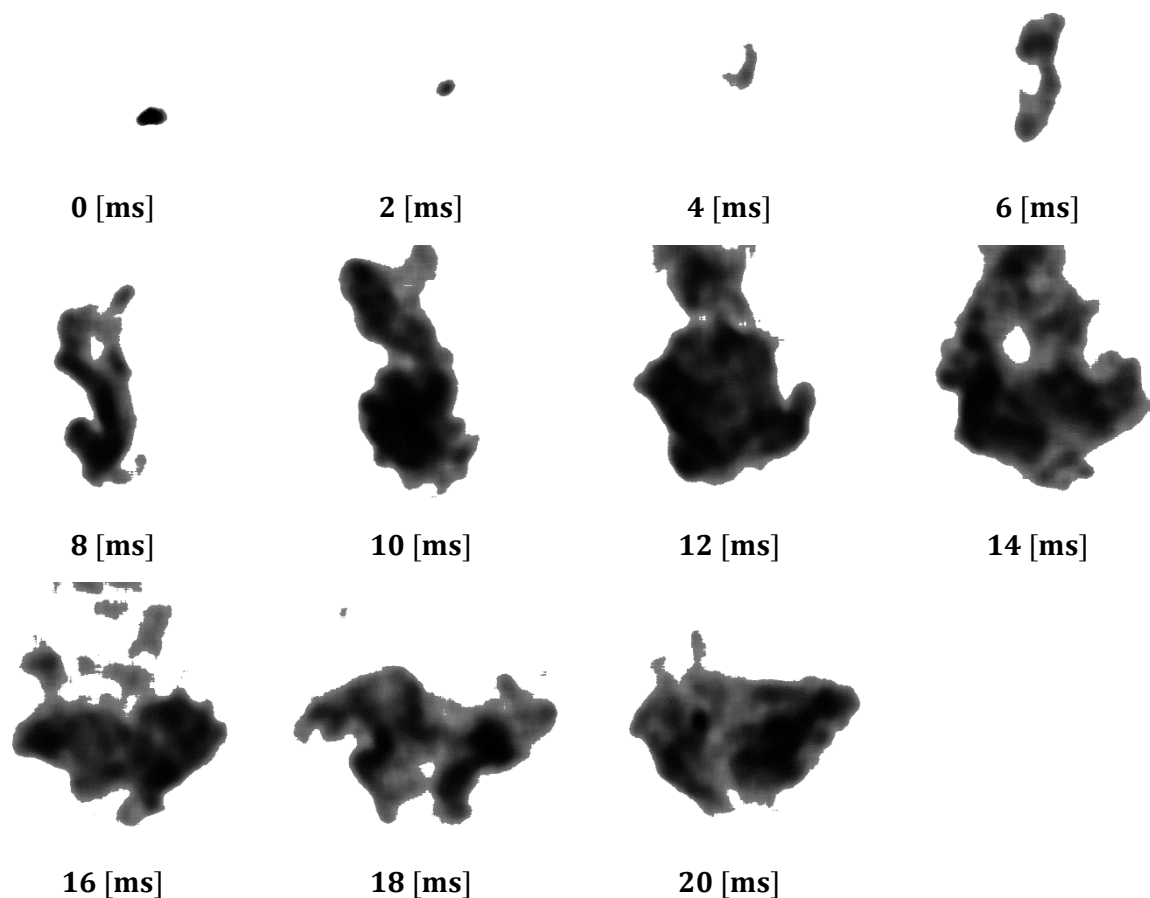


Figure 19- Instantaneous images of the ignition phenomenon for Sw07 conditions; imaging speed of 3000 fps; spark created at location $r = 10$ [mm] and $z = 20$ [mm].

شکل ۱۹- تصاویر لحظه‌ای از پدیده اشتعال برای شرایط Sw07؛ سرعت تصویربرداری ۳۰۰۰ فریم در ثانیه؛ محل ایجاد جرقه $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm]

شکل ۲۰ تصاویر متوالی از لحظه تشکیل هسته شعله تا رسیدن به شعله پایدار را برای حالت Sw09 نشان می‌دهد. تصاویر ارائه شده در این شرایط عملکردی دارای فاصله زمانی ۱ میلی‌ثانیه بوده ولی بازه زمانی تصویر ارائه شده ۱۱ میلی‌ثانیه است. در این حالت نیز محل قرارگیری الکترود و در نتیجه محل تشکیل هسته اولیه شعله، در مختصات $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm] است. مقایسه محل قرارگیری شعله در لحظه $t = 1$ [ms] با لحظه $t = 0$ نشان می‌دهد که لبه بیرونی شعله در معرض سرعت محوری مثبت و لبه داخلی آن در حوالی سرعت محوری صفر قرار دارد. این موضوع باعث شده که لبه بیرونی شعله جابجایی محوری مثبتی داشته باشد و لبه داخلی آن ساکن باشد. به علاوه ماهیت پیچشی جریان باعث پیچش شعله حول محور مشعل نیز می‌شود. به همین دلیل هسته شعله به محور نزدیک‌تر از لحظه اولیه به نظر می‌آید. مقایسه شکل شعله در لحظه $t = 2$ [ms] با لحظه $t = 1$ [ms] نشان می‌دهد که شعله در وضعیت سکون قرار داشته و جبهه شعله در تمامی جهات در حال توسعه است. در واقع در این شرایط عملکردی هسته اولیه شعله درون حباب بازگشتی قرار داشته و شرایط ایده‌آلی برای پایداری شعله برقرار است. در ادامه شعله در تمامی جهات توسعه یافته و تمام حباب بازچرخشی را در بر گرفته و پایدار می‌شود.

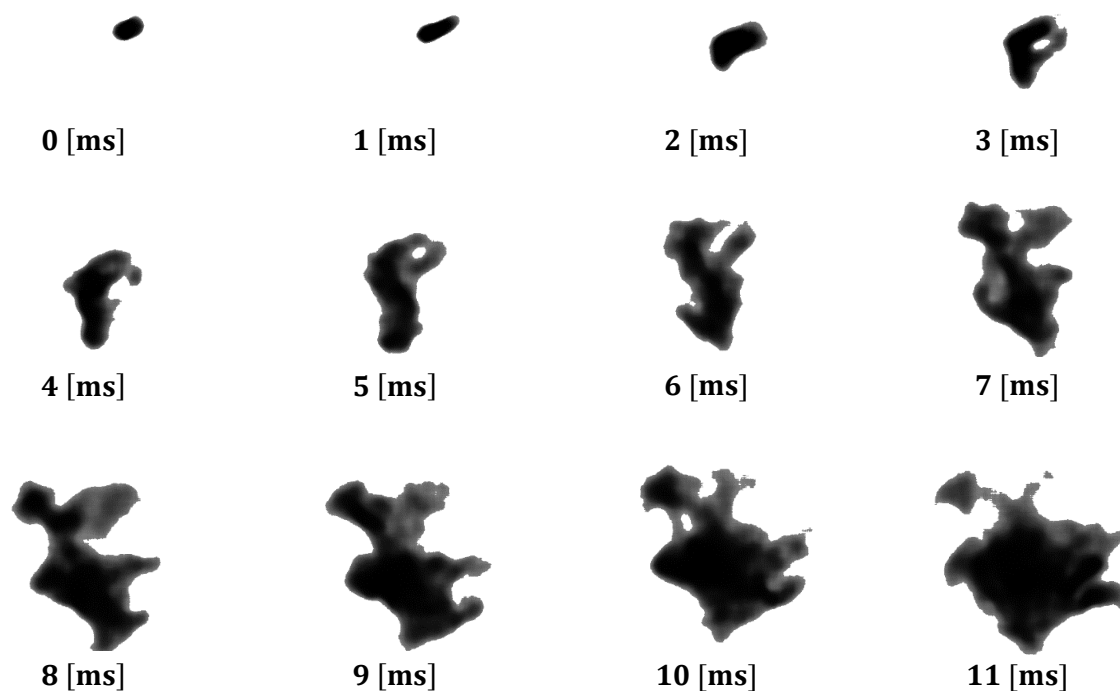


Figure 20- Instantaneous images of the ignition phenomenon for Sw09 conditions; imaging speed of 3000 fps; spark created at location $r = 10$ [mm] and $z = 20$ [mm].

شکل ۲۰- تصاویر لحظه‌ای از پدیده اشتعال برای شرایط Sw09؛ سرعت تصویربرداری ۳۰۰۰ فریم در ثانیه؛ محل ایجاد جرقه $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm]

شکل ۲۱ تصاویر متوالی از لحظه تشکیل هسته شعله تا رسیدن به شعله پایدار را برای حالت Sw11 نشان می‌دهد. تصاویر ارائه شده در این شرایط عملکردی دارای فاصله زمانی ۲ میلی‌ثانیه بوده ولی بازه زمانی تصویر ارائه شده ۲۲ میلی‌ثانیه است. در این حالت نیز مشابه با تمامی حالات قبل، محل قرارگیری الکتروود و در نتیجه محل تشکیل هسته اولیه شعله، در مختصات $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm] است. در این حالت نیز هسته اولیه شعله درون حباب بازگشتی تشکیل شده است و این امر موجب شده که شعله در معرض پایداری بوده و به سرعت به شرایط پایدار دست یابد.

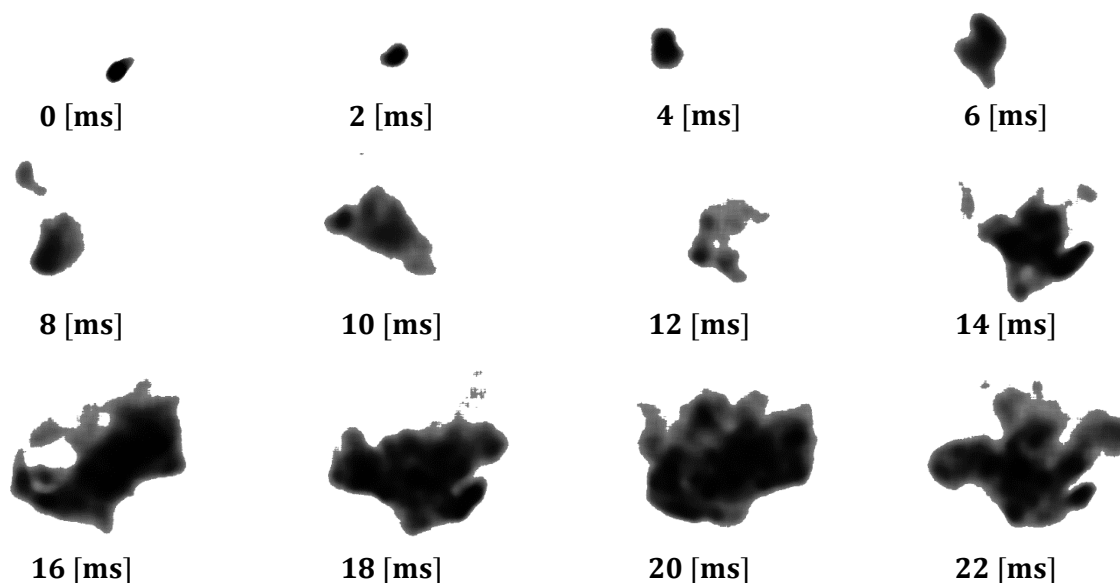


Figure 21- Instantaneous images of the ignition phenomenon for Sw11 conditions; imaging speed of 3000 fps; spark created at location $r = 10$ [mm] and $z = 20$ [mm].

شکل ۲۱- تصاویر لحظه‌ای از پدیده اشتعال برای شرایط Sw11؛ سرعت تصویربرداری ۳۰۰۰ فریم در ثانیه؛ محل ایجاد جرقه $r = 10$ [mm] و $z = 20$ [mm]

نمودار پیشروی جبهه شعله (تغییرات لبه بالایی و لبه پایینی شعله) برای شرایط عملکردی $Sw09$ ، $Sw07$ ، $Sw05$ و $Sw11$ در شکل ۲۲ ارائه شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود برای شرایط عملکردی $Sw05$ که میزان پیچش جریان به حدی نیست که توانایی ایجاد ناحیه بازگشتی در آن وجود داشته باشد، لبه پایینی شعله از اولین لحظه تشکیل شعله، همواره در حال صعود در جهت محور مشعل است. برای شرایط $Sw07$ در ابتدا، حرکت لبه پایینی به صورت صعودی بوده و پس از طی ۲ تا ۳ میلی‌ثانیه، در جهت خلاف محور توسعه می‌یابد که این موضوع به معنای رسیدن ناحیه واکنشی به ناحیه بازگشتی جریان دارد. برای شرایط عملکردی $Sw09$ و $Sw11$ ، در لحظه اولیه شعله درون ناحیه بازگشتی جریان تشکیل می‌شود و لذا از ابتدا در جهت خلاف محور توسعه می‌یابد. مرز بالایی شعله عموماً در تمامی شرایط عملکردی در حال توسعه در جهت مثبت محور است. توسعه شعله در تمامی موارد منجر به فاصله گرفتن مرز بالایی و پایینی از یکدیگر شده و به افزایش طول ناحیه واکنشی منجر می‌شود. دقت در این نمودارها نشان می‌دهد که افزایش شدت پیچش جریان منجر به کاهش نرخ توسعه مرز بالایی شعله می‌شود. در واقع هر چه میزان پیچش جریان بیشتر باشد در نزدیکی دهانه خروجی مشعل، توسعه خواهد یافت و کمتر توسط جریان به بالادست منتقل می‌شود.

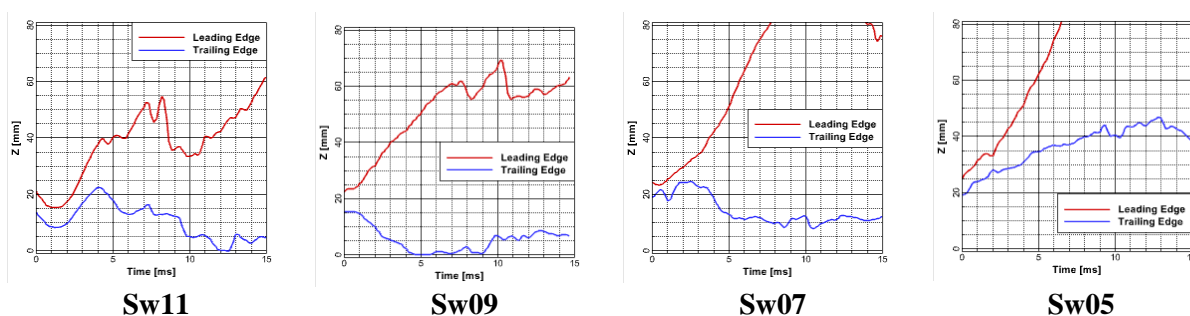


Figure 22- flame front progression along the axis for different operating conditions
 شکل ۲۲- نمودار پیشروی جبهه شعله در راستای محور برای شرایط عملکردی مختلف

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر میزان پیچش جریان بر هیدرودینامیک جریان، الگوی اختلاط، احتمال اشتعال موفق و نحوه انتشار هسته اولیه شعله در مشعل پیچشی دوگانه امیرکبیر، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا به ازای مقادیر مختلف پیچش جریان در خروجی مشعل حد پایین پایداری از طریق آزمایش اندازه‌گیری شد و سپس میدان جریان غیراحتراقی، شامل هیدرودینامیک جریان و الگوی اختلاط سوخت و اکسنده با استفاده از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار فلونت محاسبه شد. همچنین مشخصات هندسی شعله شامل برخاستگی و طول شعله در شرایط عملکردی مذکور با استفاده از تصویربرداری و پردازش تصاویر دیجیتال استخراج شد. نقشه‌های احتمال اشتعال موفق با تغییر موقعیت الکتروود جرقه‌زن، در جهات محوری و شعاعی اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور بررسی نحوه انتشار هسته اولیه شعله از تصویربرداری دیجیتال با سرعت بالا استفاده شد. در این پژوهش میدان جریان خروجی از مشعل بر اساس احتمال موفقیت اشتعال به سه نوع ناحیه تقسیم بندی شد. اولین ناحیه تحت عنوان ناحیه غیرمؤثر نام‌گذاری شد. در این ناحیه احتمال موفقیت اشتعال کمتر از ۲۰ درصد بود. ناحیه دوم ناحیه گذار نام گرفت که در آن احتمال موفقیت اشتعال بین ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد است و موفقیت اشتعال به شدت به موقعیت الکتروود جرقه‌زن وابسته است. ناحیه با احتمال موفقیت اشتعال بیشتر از ۸۰ درصد ناحیه با احتمال بالا نامیده شد. نتایج این بررسی نشان داد که افزایش میزان پیچش جریان هرچند که افزایش نرخ اختلاط را در پی دارد، اما منجر به بهبود توزیع احتمال اشتعال موفق نمی‌شود. در واقع، در مقادیر عدد پیچش بالا، منطقه احتمال بالا به شدت در نزدیکی دهانه خروجی مشعل متمرکز می‌شود در حالی که در مقادیر کمتر عدد پیچش که با ناحیه بازگشتی نیز همراه باشد، منطقه احتمال بالا توزیع گسترده‌تری داشته و ویژگی‌های بهتر اشتعالی را به دنبال دارد.

منابع

1. E. Mastorakos, 'Ignition of turbulent non-premixed flames', *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 1, pp. 57–97, Feb. 2009.
2. S. Ahmed, *Spark Ignition of Turbulent Non-Premixed Flames*, Ph.D. thesis University of Cambridge, 2006.
3. L. Esclapez, F. Collin-Bastiani, E. Riber, and B. Cuenot, 'A statistical model to predict ignition probability', *Combustion and Flame*, vol. 225, pp. 180–195, Mar. 2021.
4. M. Kono, K. Hatori, and K. Inuma, 'Investigation on ignition ability of composite sparks in flowing mixtures', *Symposium (International) on Combustion*, vol. 20, no. 1, pp. 133–140, Jan. 1985.
5. B. Sforzo, J. Kim, J. Jagoda, and J. Seitzman, 'Ignition Probability in a Stratified Turbulent Flow With a Sunken Fire Igniter', *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 137, no. 1, Aug. 2014.
6. M. Cordier, A. Vandel, G. Cabot, B. Renou, and A. M. Boukhalfa, 'Laser-Induced Spark Ignition of Premixed Confined Swirled Flames', *Combustion Science and Technology*, vol. 185, no. 3, pp. 379–407, Mar. 2013.
7. A. D. Birch, D. R. Brown, and M. G. Dodson, 'Ignition probabilities in turbulent mixing flows', in *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, pp. 1775–1780.
8. M. T. E. Smith, A. D. Birch, D. R. Brown, and M. Fairweather, 'Studies of ignition and flame propagation in turbulent jets of natural gas, propane and a gas with a high hydrogen content', *Symposium (International) on Combustion*, vol. 21, no. 1, pp. 1403–1408, Jan. 1988.
9. L. Esclapez, E. Riber, and B. Cuenot, 'Ignition probability of a partially premixed burner using LES', *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 3, pp. 3133–3141, Jan. 2015.
10. S. F. Ahmed and E. Mastorakos, 'Spark ignition of lifted turbulent jet flames', *Combustion and Flame*, vol. 146, no. 1, pp. 215–231, Jul. 2006.
11. S. F. Ahmed, R. Balachandran, T. Marchione, and E. Mastorakos, 'Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames', *Combustion and Flame*, vol. 151, no. 1, pp. 366–385, Oct. 2007.
12. S. F. Ahmed and E. Mastorakos, 'Correlation of Spark Ignition with the Local Instantaneous Mixture Fraction in a Turbulent Nonpremixed Methane Jet', *Combustion Science and Technology*, vol. 182, no. 9, pp. 1360–1368, Aug. 2010.
13. J.-F. Bourgoignie, D. Durox, T. Schuller, J. Beaunier, and S. Candel, 'Ignition dynamics of an annular combustor equipped with multiple swirling injectors', *Combustion and Flame*, vol. 160, no. 8, pp. 1398–1413, Aug. 2013.
14. A. Neophytou, E. S. Richardson, and E. Mastorakos, 'Spark ignition of turbulent recirculating non-premixed gas and spray flames: A model for predicting ignition probability', *Combustion and Flame*, vol. 159, no. 4, pp. 1503–1522, Apr. 2012.
15. W. Shen et al., 'Combustion characteristics of ignition processes for lean premixed swirling combustor under visual conditions', *Energy*, vol. 218, p. 119521, Mar. 2021.
16. E. S. Richardson and E. Mastorakos, 'NUMERICAL INVESTIGATION OF FORCED IGNITION IN LAMINAR COUNTERFLOW NON-PREMIXED METHANE-AIR FLAMES', *Combustion Science and Technology*, vol. 179, no. 1–2, pp. 21–37, Jan. 2007..
17. E. S. Richardson, N. Chakraborty, and E. Mastorakos, 'Analysis of direct numerical simulations of ignition fronts in turbulent non-premixed flames in the context of conditional moment closure', *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, no. 1, pp. 1683–1690, Jan. 2007.
18. G. Lacaze, E. Richardson, and T. Poinsot, 'Large eddy simulation of spark ignition in a turbulent methane jet', *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 10, pp. 1993–2009, Oct. 2009.
19. A. Triantafyllidis, E. Mastorakos, and R. L. G. M. Eggels, 'Large Eddy Simulations of forced ignition of a non-premixed bluff-body methane flame with Conditional Moment Closure', *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 12, pp. 2328–2345, Dec. 2009.
20. M. EidiAttarZade, S. Tabejamaat, M. Mani, and M. Farshchi, 'Numerically investigation of ignition process in a premixed methane-air swirl configuration', *Energy*, vol. 171, pp. 830–841, Mar. 2019.
21. W. P. Jones and V. N. Prasad, 'LES-pdf simulation of a spark ignited turbulent methane jet', *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 1, pp. 1355–1363, Jan. 2011.
22. R. E. Teets and J. A. Sell, 'Calorimetry of Ignition Sparks', *SAE Transactions*, vol. 97, pp. 371–383, 1988.
23. P. Weigand, W. Meier, X. R. Duan, W. Stricker, and M. Aigner, 'Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor: I. Flow field, structures, temperature, and species distributions', *Combustion and Flame*, vol. 144, no. 1, pp. 205–224, Jan. 2006.
24. Y. C. See and M. Ihme, 'Large eddy simulation of a partially-premixed gas turbine model combustor', *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, no. 2, pp. 1225–1234, Jan. 2015.
25. F. C. Christo and B. B. Dally, 'Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow', *Combustion and Flame*, vol. 142, no. 1, pp. 117–129, Jul. 2005.
26. B. J. Daly and F. H. Harlow, 'Transport Equations in Turbulence', *The Physics of Fluids*, vol. 13, no. 11, pp. 2634–2649, Nov. 1970.
27. M. M. Gibson and B. E. Launder, 'Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer', *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 86, no. 3, pp. 491–511, 1978.

28. B. Launder and M. Leschziner, 'Modelling strongly swirling recirculating jet with Reynolds stress transport closure', 6th Symposium on Turbulent Shear Flows, vol. 1, pp. 17–16, Jan. 1987.
29. B. E. Launder, 'Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows', International journal for numerical methods in fluids, vol. 9, no. 8, pp. 963–985, 1989.
30. Launder, and E. Brian, 'Second-Moment Closure: Present... and Future?', International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 10, pp. 282-300, 1989.
31. T. Poinso and D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion. Edwards, 2005.
32. F.C. Christo, and B.B. Dally, Application of Transport Pdf Approach for Modelling Mild Combustion, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Sydney, Australia, 2004.
33. A. C. Benim, S. Iqbal, A. Nahavandi, W. Meier, A. Wiedermann, and F. Joos, 'Analysis of Turbulent Swirling Flow in an Isothermal Gas Turbine Combustor Model', 2014.
34. A. Mardani and A. Fazlollahi-Ghomshi, 'Numerical Investigation of a Double-Swirled Gas Turbine Model Combustor Using a RANS Approach with Different Turbulence–Chemistry Interaction Models', Energy Fuels, vol. 30, no. 8, pp. 6764–6776, Aug. 2016.
35. A. Fazlollahi-Ghomshi and A. Mardani, 'Numerical Investigation of Reacting Flow in a Double-swirled Gas Turbine Model Combustor', Fuel and Combustion, vol. 9, no. 2, pp. 39–58, 2016 (in Persian).
36. R. W. Schefer, G. H. Evans, J. Zhang, A. J. Ruggles, and R. Greif, 'Ignitability limits for combustion of unintended hydrogen releases: Experimental and theoretical results', International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, no. 3, pp. 2426–2435, Feb. 2011.

English Abstract

The effect of swirl intensity on the probability of successful ignition and kernel propagation in the Amirkabir double swirl burner.

Hamidreza Tajik¹, Sadegh Tabejamaat^{2*}, Alireza Fazlollahi-Ghomshi³

1- Ph.D. student, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, hrtajik@aut.ac.ir

2- Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, sadegh@aut.ac.ir

3- Ph.D. student, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, fazlollahi.a@aut.ac.ir

*Corresponding author

(Received :2023/05/23, Received in revised form: 2023/07/17., Accepted: 2023/08/14)

In this article, the influences of swirl intensity on the mixing pattern, successful ignition probability, and flame propagation manner in a non-premixed gas burner with natural gas fuel have been examined by using numerical simulation and high-speed digital imaging. The ignition success probability maps were scrutinized under changing spark location in axial and radial directions. The flow field and mixing pattern were further inspected with the aid of numerical simulation. High-speed digital imaging was employed to study the initial flame kernel propagation. The ignition success probability diagrams defined three areas. The first, dubbed the ineffective zone, holds less than a 20% ignition success chance. The second, known as the transitional zone, has an ignition success probability between 20% and 80%. Ignition success here significantly depends on the spark location. The third area—the high-probability zone—has over an 80% ignition success chance. Findings from the study demonstrate an increased swirl number promotes a higher mixing rate, but it doesn't enhance the distribution of successful ignition probability. Higher swirl numbers actually reduce the high-probability zone, whereas lower swirl numbers allow a broader distribution in the burner outlet and better ignition characteristics.

Keywords: Ignition, Swirl Flame, Non-Premixed Combustion, Flame Propagation, Numerical Simulation.