

## مطالعه‌ی تجربی اثر پیچش هوای جانبی بر شعله اسپری کروسین

امیر مردانی<sup>۱\*</sup>، صادق آرازی کلات<sup>۲</sup>، امیرحسین عظیمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، amardani@sharif.edu

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، sadegh.azazi@sharif.edu

۳- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، amirhossein.azimi@alum.sharif.edu

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

در این پژوهش به مطالعه اثرات استفاده از پیچش هوای جانبی بر احتراق سوخت سنگین کروسین پرداخته شده است. در طول این پژوهش سعی شده با ایجاد پیچش در هوای جانبی تاثیرات آن بر پارامترهای هندسی و نورتایی شیمیایی شعله مورد بررسی قرار گیرد. به منظور بررسی عوامل تاثیرگذار بر ساختار شعله هم‌چون عدد پیچش، دبی هوای جانبی و نیز نوع افشانه مورد استفاده، آزمونگر احتراق مایلد دانشگاه شریف مورد ارتقاء قرار گرفته و در این پژوهش استفاده شده است. در این آزمونگر امکان تغییر دبی هوای جانبی، تغییر نوع انژکتور و تغییر فشار تزریق سوخت محیا بوده که بدین صورت بررسی پارامترهای بیان شده را مقدر می‌سازد. در مطالعه صورت گرفته به وسیله عکس برداری از شعله به صورت عادی مولفه‌های هندسی شعله هم‌چون طول، مقطع دید از مقابل، حجم معادل شعله و برخاستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با تصویربرداری به وسیله فیلترهای گذر محدود مشخصه‌های نورتایی شیمیایی شعله برای گونه‌های همچون  $\text{HCO}$ ،  $\text{N}_2\text{O}$  و  $\text{CH}$  که از گونه‌های دارای اهمیت مکانیزم احتراق کروسین می‌باشند مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه گردیده است.

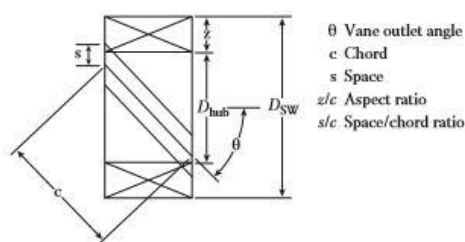
کلمات کلیدی: پیچش، احتراق، اسپری، کروسین، افشانه

### مقدمه

استفاده از پیچش هوای تزریقی به محفظه‌های احتراق در موارد بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی هوای همراه را می‌توان به دو شکل محوری بدون پیچش و محوری همراه با پیچش به داخل محفظه احتراق تزریق نمود. عدد پیچش و سرعت هوای ورودی به محفظه به عنوان دو پارامتر عمده کنترل کننده شکل جریان در محفظه احتراق در نظر گرفته می‌شود که نمونه‌ای از اثرات افزودن پیچش به جریان هوای جانبی بر خطوط سرعت ثابت میدان جریان در شکل ۱ نمایش داده شده است. با تغییر در مقدار این دو پارامتر تغییرات عمده‌ای در شکل جریان و نیز در کیفیت اختلاط سوخت و اکسیدکننده و سایر موارد مرتبط همچون میدان دمایی محفظه و در نهایت مشخصه‌های احتراق ایجاد خواهد شد. با در نظر گرفتن اثرات گفته شده، تغییر در سرعت و عدد پیچش جریان منجر به دگرگونی دو شاخصه مهم دیگر شعله یعنی میزان پایداری و همچنین تشکیل یا عدم تشکیل شعله می‌گردد.

میزان پیچش به وسیله عدد پیچش<sup>۱</sup> که یک عدد بی بعد متناسب با مومنوم وارد شده به جریان می‌باشد سنجیده شده و با حرف S نشان داده می‌شود. عدد پیچش بیانگر نسبت شار محوری مومنوم پیچش به میزان شار محوری مومنوم محوری، ضرب در معادل زاویه انحراف جریان می‌باشد. بر اساس میزان عدد پیچش به جریان‌هایی با اعداد پیچش بالای ۰.۶ جریان‌های پرپیچش<sup>۲</sup> و به جریان‌های با عدد پیچش کمتر از ۰.۶ جریان‌های کم پیچش<sup>۳</sup> گفته می‌شود [۱]. برای جریان‌هایی با اعداد پیچش کمتر از ۰.۴، میزان پیچش و تاثیرات آن تا حدودی ناچیز می‌باشد.

برای پیچاندن هوای محوری مقدار عدد پیچش را می‌توان از رابطه ۱ بدست آورد. در رابطه ۱،  $G_m$  شار محوری مومنوم زاویه ای<sup>۴</sup> و  $G_T$  تراست محوری<sup>۵</sup> می‌باشد

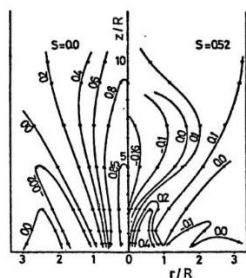


شکل ۱ - مشخصات هندسی مورد استفاده برای محاسبه عدد پیچش

مربوط به پیچاندن هوای محوری [۱]

$$S_N = \frac{2}{3} \frac{1 - (D_{hub}/D_{sw})^3}{1 - (D_{hub}/D_{sw})^2} \tan \theta \quad (1)$$

از جریان‌های دارای پیچش در صنعت استفاده‌های بسیاری می‌گردد که برای مثال می‌توان از موارد غیر احتراقی همچون تولید کننده و تقویت کننده‌های گردابه، جداکننده‌های سائیکلونی<sup>۶</sup>، تورنادو و ... و از موارد احتراقی نیز به انواع کوره‌ها، دیگ‌های بخار، موتورهای دیزلی، موتورهای توربین گاز اشاره نمود [۲]. در اکثر کاربردهای احتراقی پیچش هوا به یکی از علت‌های افزایش پایداری، کاهش حجم محفظه احتراق، تغییر در شدت احتراق، کنترل آلاینده‌ها و ... مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱: خطوط سرعت ثابت در جریان احتراقی برای اعداد پیچش ۰ (بدون)

پیچش) و ۰.۵۲ (همراه با پیچش) [۲].

با استفاده از عدد پیچش مناسب می‌توان تولید آلاینده‌هایی از جمله اکسیدهای نیتروژن، منو اکسید کربن و نیز دی اکسید کربن را تا حد مناسبی کاهش داد [۲]. با افزایش میزان پیچش به دلیل وجود نیروی گریز

4 Axial flux of angular momentum

5 Axial thrust

6 Cyclone separator

1 Swirl number

2 High swirl

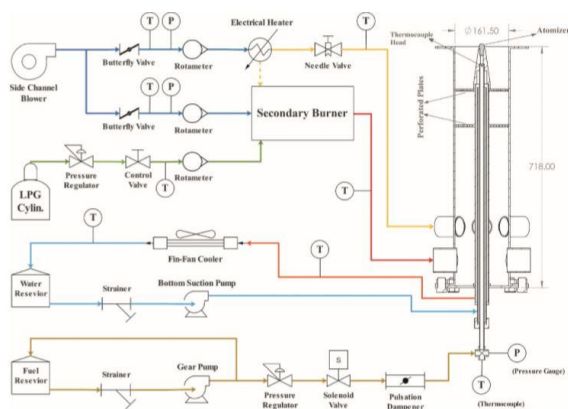
3 Low swirl

نرخ سوخت تزریق شده طول شعله به صورت خطی افزایش یافته اما با افزایش میزان فشار محفظه احتراق به صورت توانی کاهش می‌یابد. خلیل و همکاران به بررسی احتراق در رژیم CDC<sup>4</sup> برای سوخت JP8 (سوختی بر پایه کروسین و برخی افزودنی‌ها که برای مصارف نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد) و به صورت همزمان بر روی سوخت اتانول پرداخته‌اند. ایشان در تحقیقات خود از یک آزمونگر مجهز به پیچاننده هوا استفاده نموده و همچنین جهت رقیق‌سازی اکسیژن از تزریق میزان مشخصی گازهای نیتروژن و منواکسید کربن به جریان هوای اصلی استفاده نموده است.

در مقاله جاری به مطالعه تجربی افزودن یک گرداننده هوا به جریان محوری در یک مشعل آزمایشگاهی با اسپری سوخت کرو سین پرداخته شده است. این تحقیق در ادامه کار مردانی و همکاران می‌باشد [۸]. در مطالعه تجربی هوا به صورت هم محور با تزریق سوخت کروسین مایع وارد میدان احتراق شده و آن را دربر گرفته است. ایشان به مطالعات اثرات پیش گرم و رقیق سازی هوای ورودی محوری پرداخته و ساختار و پایداری شعله را مطالعه نموده‌اند. در تحقیق جاری با افزودن مکانیزم پیچش هوای جانبی به آزمونگر گروه مردانی و همکاران در کنار بررسی پایداری شعله کروسین، مشخصات هندسی و نورتایی شیمیایی شعله نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

### روش انجام پژوهش

به منظور مطالعه بر احتراق سوخت‌های مایع در شرایط پیش گرم سازی شده و رقیق‌سازی شده و در نهایت دستیابی به رژیم احتراقی مایلد در آزمایشگاه احتراق پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف، در سال ۱۳۹۷ اقدام به طراحی و ساخت یک آزمونگر متناسب با محقق سازی شرایط گفته شده گردیده است [۹]. آزمونگر ساخته شده SMSTR<sup>۵</sup> نامگذاری گردید که بیانگر آزمونگر (اسپری) احتراق مایلد دانشگاه شریف می‌باشد. این آزمونگر خود شامل تعدادی زیرسامانه‌های مختلف از جمله سامانه تامین هوا، سامانه پیش احتراقی (به منظور رقیق سازی و پیش گرم سازی)، سیستم پاشش سوخت مایع، سیستم اشتعال، سیستم داده برداری و نیز سیستم خنک کاری می‌باشد که در شکل ۳ شماتیکی از نحوه چینش اجزاء سیستم و ارتباط آنها با یکدیگر نمایش داده شده است.



شکل ۳: ساختار آزمونگر احتراق مایلد دانشگاه صنعتی شریف و زیرسامانه‌های آن [۸].

از مرکز، سیال تمایل به دور شدن از محور مرکزی محفظه را دارد که این مسئله سبب ایجاد افت فشار در نواحی مرکزی می‌گردد. در صورتی که میزان پیچش از حد مشخصی بیشتر گردد با ایجاد کاهش فشار بیشتر در محور مرکزی، جریان به سمت عقب بازگشته و شاهد ایجاد جریان بازگشتی در محفظه احتراق خواهیم بود. پدیده بازگشت جریان در جریان‌های پیچشی را پدیده شکست گردابه<sup>۱</sup> می‌نامند [۲]. علاوه بر بازگشت جریان در مرکز در گوشه‌های بیرونی جریان نیز شاهد بازگشت جریان به سمت عقب خواهیم بود. در این صورت دو ناحیه مجزای دارای جریان‌های بازگشتی در میدان جریان به وجود خواهد آمد. ناحیه مرکزی که در آن بازگشت جریان رخ می‌دهد را ناحیه بازگشتی داخلی<sup>۲</sup> و ناحیه مربوط به گوشه‌های خارجی جریان که در آن بازگشت جریان رخ می‌دهد را ناحیه بازگشتی خارجی<sup>۳</sup> می‌نامند. نواحی بازگشتی داخلی و خارجی در جریان پیچشی در شکل ۲ نمایش داده شده است. اثرات عدد پیچش بر میدان سرعت توسط منسوری و همکاران [۴] مطالعه شده است. نتایج ایشان حاکی از آن است که با افزایش عدد پیچش جریان در محفظه احتراق تاثیرات چشم‌گیری در خطوط جریان و همچنین میدان دمایی جریان به وجود خواهد آمد.



شکل ۲: محل قرار گیری نواحی پیچشی خارجی و داخلی [۴]

مطالعات در زمینه استفاده از پیچش هوای جانبی از سال‌های میانه صده نوزدهم میلادی مورد توجه محققان در حوزه احتراق قرار گرفته است. سیرد و همکاران در سال ۱۹۷۴ در قالب یک مقاله بازنگاری به بررسی و ارائه تحقیقات صورت گرفته بر استفاده از جریان پیچشی پرداخته و به خصوص تاثیر پیچش جریان را بر پایداری احتراق مورد بررسی قرار داده‌اند [۵] که در تحقیقات این گروه پایداری شعله سوخت کروسین با استفاده از مکانیزم پیچش هوای جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. فیکما و همکاران در سال ۱۹۹۰ به بررسی اثر اضافه کردن پیچش به جریان بر حد خاموشی شعله پرداخته‌اند. ایشان در تحقیقات خود نشان دادند اضافه کردن حتی میزان کمی پیچش به جریان هوای جانبی سبب بهبود قابل توجه در پایداری احتراق و افزایش حد خاموشی شعله می‌گردد [۶]. در تحقیقات جاری حد خاموشی شعله برای حالت دارای مکانیزم پیچش هوای جانبی و در تحقیقات گروه مردانی و عظیمی حد خاموشی شعله برای حالت بدون پیچش هوای جانبی مورد بررسی قرار گرفته است.

ژی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی شکل و اندازه شعله برای شعله غیر پیش مخلوط و مغشوش در جریان پیچشی به صورت تجربی پرداخته‌اند. در این پژوهش بازه وسیعی از متغیرها همچون نرخ هوای ورودی، نرخ سوخت ورودی، فشار محفظه احتراق و سرعت خروجی نازل مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. همچنین برای مقایسه نتایج تجربی بدست آمده برای پروفیل شعله از شبیه‌سازی‌های عددی و برای پیش بینی طول شعله از روابط تئوری استفاده شده است. در این پژوهش مشاهده گردید با افزایش

<sup>4</sup> Colorless Distributed Combustion

<sup>5</sup> Sharif MILD Spray Test Rig

<sup>1</sup> Vortex breakdown

<sup>2</sup> Inner recirculation zone (IRZ)

<sup>3</sup> Outer recirculation zone (ORZ)

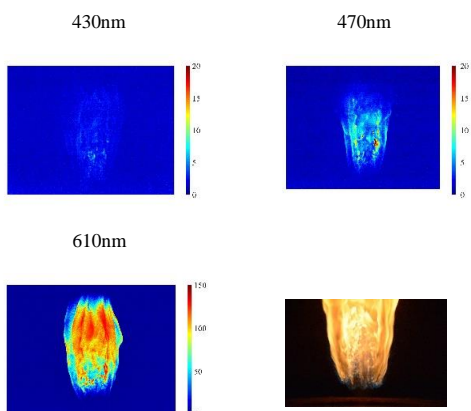
جدول ۱: مقدار دبی هوای جانبی مورد آزمایش در شرایط مختلف آزمون و با افشانه‌های متفاوت

شرایط تست	نوع افشانه	عدد پیچش هوای جانبی	دبی هوای جانبی مورد آزمایش (متر مکعب بر ساعت)
۱	30SS	۰,۴-۰,۶-۰,۸	۴۰-۸۰-۱۲۰-۱۶۰
۲	30B	۰,۴-۰,۶-۰,۸	۲۰۰-۲۴۰-۲۸۰
۳	60SS	۰,۴-۰,۶-۰,۸	

### نتیجه گیری

#### مقایسه شعله دارای پیچش با شعله بدون پیچش

در شکل ۵ تصاویر شعله بدون تزریق هوای پیچشی ارائه شده است. مطابق مشاهدات آزمایشگاهی شعله طول نسبتاً زیادی داشته و نسبت منظری (در این پژوهش به نسبت بیشینه ارتفاع شعله به بیشینه عرض آن نسبت منظری گفته می‌شود). جزء بالاترین مقادیر دیده شده (حدود ۵) در شعله‌های مورد آزمایش می‌باشد. این شعله دارای شاخه‌های نسبتاً صاف بود و بازگشت جریان در آن رخ نمی‌دهد. رنگ شعله تقریباً در تمامی نواحی زرد رنگ بوده به استثنای لبه‌های پایینی آن که به رنگ آبی می‌باشد. شعله یاد شده میزان برخاستگی نسبت به سایر موارد بیشتر بوده و شعله هیچ گونه تما سی با سرم شعل ندارد. با افزایش دبی هوای جانبی شعله به سرعت دچار ناپایداری شده و در نهایت در دبی‌های زیر ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت خاموش می‌گردد. در این شعله می‌توان ساختار دوگانه و ایجاد جبهه داخلی و خارجی شعله را به دلیل نفوذ هوا به قسمت داخل شعله مشاهده نمود.



شکل ۵: تصاویر مربوط به شعله ساده (تصویر عادی و فیلترها)

با ایجاد پیچش در هوای جانبی در بیشتر شرایط طول شعله کاهش پیدا خواهد کرد. این کاهش به خصوص در دبی‌های بالاتر و اعداد پیچش بیشتر میزان قابل توجه‌تری دارد. این مسئله را می‌توان در تصاویر شکل ۶ برای شعله در شرایط بدون پیچش، دارای پیچش در دبی‌های جانبی میانی و دارای پیچش در دبی‌های بالای هوای جانبی مشاهده نمود.

در تحقیقات جاری به منظور بررسی اثرات افزودن پیچش به هوای جانبی در احتراق اسپری سوخت مایع کروسین سه پیچاننده هوای محوری با سه عدد پیچش ۰,۴، ۰,۶ و ۰,۸ طراحی و ساخته گردید که این پیچاننده‌های هوای محوری در ابتدای محل تزریق سوخت نصب می‌گردند. تصاویر مربوط به پیچاننده های هوای جانبی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: تصاویر مربوط به پیچاننده‌های هوا به ترتیب از سمت راست با اعداد پیچش ۰,۴، ۰,۶ و ۰,۸ به همراه پایه و صفحه پوشاننده پایه پیچاننده هوا

در این آزمونگر همان گونه که در شکل ۳ نمایش داده شده است. دما و فشار سوخت، آب و هوا در نقاط مختلف آزمونگر توسط ترموکوپل‌های نوع K و نیز فشارسنج‌های بردن<sup>۱</sup> سنجیده شده است. همچنین به وسیله یک دستگاه آنالیز گاز تستو<sup>۲</sup> ۳۲۷ ترکیبات هوای جانبی تحلیل شده و همچنین با استفاده از دستگاه سیم داغ (مدل YK-2004AH) سرعت محوری هوای جانبی در طول شعاع خروجی هوا مورد بررسی قرار گرفته است. سوخت توسط افشانه فشاری-چرخشی تزریق می‌شود و در مجموع سه نوع افشانه بررسی شده است.

به منظور تهیه تصاویر شعله از یک دستگاه دوربین دیجیتال نیکون مدل D7100 استفاده شده است. بر روی دوربین مذکور از لنز " AF-S DX NIKKOR 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR" استفاده شده که به فیلتر UV نیز تجهیز شده است، با بهره‌گیری از فیلترهای گذر محدود<sup>۳</sup> (در ناحیه‌ی طیف مرئی) برای طول موجهای ۴۳۰ و ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر توزیع اجزا شیمیایی در ناحیه‌ی واکنشی به صورت کیفی مشخص شده است. افشانه‌های سوخت مورد استفاده در این پژوهش افشانه‌های 30B و 60SS.30SS می‌باشند که در این بین افشانه‌های نوع SS و B به ترتیب دارای الگوی پاشش سوخت نیمه توپر و توپر می‌باشند که بدین شکل می‌توان اثرات تغییر در الگوی پاشش افشانه بر شعله را مطالعه نمود. همچنین سعی شده تا با استفاده از افشانه‌هایی با زوایای پاشش ۳۰ و ۶۰ درجه اثرات تغییر در زاویه پاشش نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

#### آزمایشات صورت گرفته

در این پژوهش برای شرایط گوناگون آزمایشی و با توجه به محدودیت‌های آزمونگر و تجهیزات آزمایشی اثرات تغییر در دبی هوای جانبی و تغییر در افشانه پاشش سوخت در سه عدد پیچش متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط مختلف مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

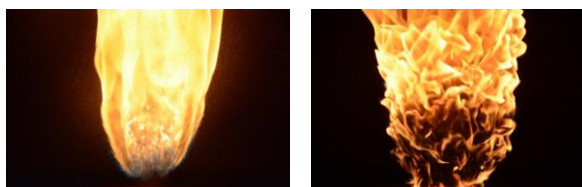
<sup>3</sup> Bandpass Optical Filters

<sup>1</sup> Bourdon

<sup>2</sup> Testo

ساعت (که به دلیل محدودیت تجهیزات بیشینه توان آزمایشگاهی می باشد و حد خاموشی شعله بیش از این عدد می باشد) پایدار هستند. در نتیجه افزودن پیچش تاثیر بسیار چشم گیری در پایداری و خاموش نشدن شعله داشته است. البته شعله با عدد پیچش پایین و دبی هوای جانبی بالا با وجود خاموش نشدن شعله به نظر می رسد دچار تغییر ساختار شده و به نوعی وجود احتراق ناقص در این شرایط گمان می رود.

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می گردد شکل پایه شعله در حالت ساده V شکل بوده و از امتداد خط پاشش سوخت شروع می گردد. با افزودن پیچش به هوای جانبی در دبی های بالای هوای جانبی و اعداد پیچش بالا شعله حجیم تر شده و به سمت پایین حرکت می کند و در نهایت لبه های شعله به سمت صفحه پوشاننده بالای افشانه سوخت کشیده شده و پایین شعله حالت پهن تری به خود می گیرد.



شکل ۹: مقایسه شکل پایه شعله در حات همراه با پیچش هوای جانبی (سمت راست) و بدون پیچش هوای جانبی (سمت چپ)

در تصاویر مربوط به فیلترهای گذر محدود با ایجاد پیچش در هوای جانبی در اکثر موارد می توان به وسیع تر شدن ناحیه واکنش، بیشتر شدن شدت واکنش و ایجاد نقاط با تابش بسیار شدید بیشتر اشاره نمود. با در نظر گرفتن نتایج مربوط به فیلترهای ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر می توان گفت با افزایش عدد پیچش ناحیه واکنشی تقویت شده و در همین حین به سمت پایین کشیده شده است و پهن تر نیز گردیده است. تصاویر بدست آمده از فیلترهای ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر که می توانند به ترتیب بیان گر شدت احتراق، دمای شعله و میزان آزاد سازی حرارت در نظر گرفته شوند در شکل ۱۰ برای حالت بدون پیچش هوای جانبی و همراه با پیچش هوای جانبی نمایش داده شده و می توانند مورد مقایسه قرار گیرند.

#### اثرات تغییر افشانه سوخت

نتایج بررسی مشخصه طول شعله برای افشانه های متفاوت در دبی های متفاوت هوای جانبی نشان می دهد میزان طول شعله در افشانه های 30B و 30SS که دارای زاویه یکسان و الگوهای پاشش متفاوت می باشند یکسان می باشد. از این موضوع که در نمودارهای شکل ۱۱ برای عدد پیچش ۰،۸ نیز به خوبی مشاهده می گردد می توان عدم تاثیر تغییر الگوی پاشش بر طول شعله را نتیجه گرفت. افشانه 60SS با داشتن زاویه بازتر نسبت به دو افشانه دیگر میزان طول شعله کمتری را نیز تجربه می کند. با افزایش زاویه پاشش سوخت، احتمالاً جریان هوای همراه هنگام برخورد به جت سوخت زاویه بیشتری داشته و میزان نفوذ آن به داخل جت سوخت بیشتر می باشد. نفوذ هوا به داخل جت سوخت سبب بهبود اختلاط سوخت و هوا شده و احتراق را بهبود می بخشد که این امر می تواند منجر به کاهش طول شعله گردد.



شکل ۶: مقایسه طول شعله برای شعله در شرایط بدون پیچش (سمت چپ)، دارای پیچش در دبی های هوای جانبی میانی (وسط) و دارای پیچش در دبی های بالای هوای جانبی (سمت راست)

میزان برخاستگی ابتدای شعله از سر مشعل با ایجاد پیچش در هوای جانبی در تمامی شرایط تست شده کاهش می یابد. این کاهش در اعداد پیچش بالاتر و دبی های بالاتر هوای جانبی سبب شده شعله کامل به سر مشعل چسبیده و در صورت پایین تر بودن سطح پیچاننده هوا از سر مشعل می تواند حتی شعله را به قسمت پایین تر از سر مشعل نیز بکشد. این موضوع را می توان در تصاویر شکل ۷ برای شعله در شرایط بدون پیچش، دارای پیچش در دبی های هوای جانبی پایین و دارای پیچش در دبی های بالای هوای جانبی مشاهده نمود.



شکل ۷: مقایسه برخاستگی شعله برای شعله در شرایط بدون پیچش (سمت چپ)، دارای پیچش در دبی های هوای جانبی میانی (وسط) و دارای پیچش در دبی های بالای هوای جانبی (سمت راست)

همچنین با افزودن پیچش به هوای جانبی شاخه های صاف شعله در شعله ساده دچار چین خوردگی می گردند. این چین خوردگی ها در دبی های کم و اعداد پیچش کم چین های درشت و کم تعداد بوده و با افزایش دبی هوا و افزایش عدد پیچش این چین ها ریزتر و تعداد آنها بیشتر می شود. احتمالاً می توان افزایش این چین خوردگی ها را معادل با افزایش سطح شعله دانست. در تصاویر شکل ۸ می توان میزان چین خوردگی شعله در شرایط بدون پیچش، دارای پیچش در دبی های هوای جانبی پایین و دارای پیچش در دبی های بالای هوای جانبی مشاهده نمود.



شکل ۸: مقایسه طول شعله برای شعله در شرایط بدون پیچش (سمت چپ)، دارای پیچش در دبی های هوای جانبی میانی (وسط) و دارای پیچش در دبی های بالای هوای جانبی (سمت راست)

با توجه به کاهش طول شعله با ایجاد پیچش و نیز مشاهده این امر که با ایجاد پیچش عرض شعله در بیشتر موارد افزایش یافته و یا ثابت می ماند می توان به این موضوع اشاره نمود که نسبت منظری در شعله با افزایش دبی هوا و افزایش عدد پیچش کاهش می یابد.

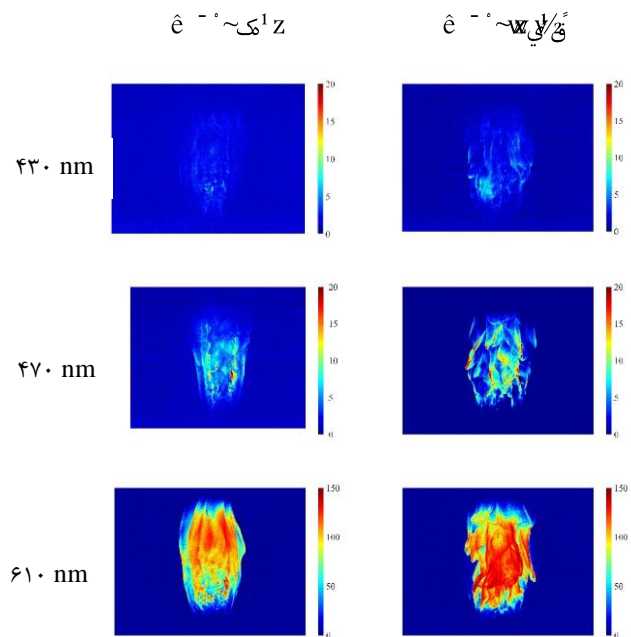
از منظر پایداری شعله با هوای محوری بدون پیچش در دبی های هوای حدود ۷۰ تا ۹۰ متر مکعب بر ساعت دچار ناپایداری شده و در این بازه و یا مقادیر بیشتر آن دچار خاموشی خواهد شد. شعله های دارای پیچش حتی شعله های دارای عدد پیچش کم تا دبی هوای جانبی ۳۰۰ متر مکعب بر

می‌توان بیشتر بودن میانگین عرض شعله در هنگام استفاده از افشانه 60SS نسبت به سایر افشانه‌ها نتیجه گرفت.

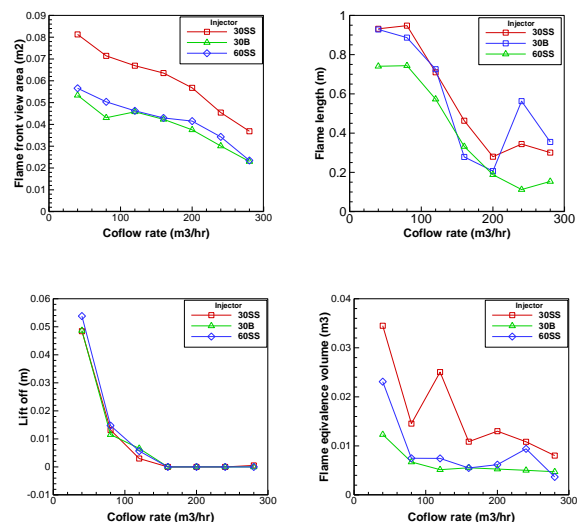
با توجه به بررسی‌های انجام گرفته بر روی حجم ناحیه محاط به شعله نیز می‌توان گفت حجم ناحیه محاط به شعله هنگام پاشش با افشانه 30SS مقدار بیشتری از حجم آن در هنگام پاشش به وسیله افشانه‌های 30B و 60SS را دارا می‌باشد. در مقایسه دو افشانه 60SS و 30B نیز می‌توان گفت به هنگام استفاده از افشانه 30B حجم ناحیه محاط به شعله در دبی‌های پایین مقدار به نسبت کمتری داشته ولی با افزایش دبی هوا میزان حجم ناحیه محاط به شعله برای این دو افشانه تقریباً رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهد که این مسئله نیز در نمودارهای شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد. کاهش پارامتر حجم محاط به شعله که نشانگر کاهش حجم محفظه مورد نیاز در هنگام طراحی می‌باشد می‌تواند حاصل بهبود احتراق در افشانه 60SS به دلیل زاویه بازتر پاشش سوخت بوده و در افشانه 30B نیز به علت بهبود احتراق به سبب استفاده از الگوی توپر باشد که در هر دو مورد سبب کاهش حجم محفظه نسبت به هنگام استفاده از افشانه 30SS گردیده است. لازم به ذکر است که در محاسبه ناحیه محاط به شعله میزان محاسبه شده متأثر از میزان بیشینه طول و عرض می‌باشد که طول شعله با استفاده از افشانه‌های گوناگون بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است و با این وجود می‌توان نتیجه‌گیری‌هایی در مورد عرض بیشینه شعله نمود. برای مثال در افشانه‌های 30SS و 30B که شعله‌ها تقریباً دارای طول برابر می‌باشند می‌توان نتیجه گرفت که بیشینه عرض شعله در افشانه 30SS بیشتر می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت در افشانه 30SS احتراق شدت کمتری داشته اما سطح گسترده‌تری را اشغال می‌نماید. نکته دیگری که می‌توان از نمودار مربوط به حجم محاط به شعله دریافت این موضوع است که در افشانه 30B حساسیت نسبت به تغییر دبی هوای جانبی کمتر از سایر افشانه‌ها بوده و در افشانه 60SS نیز حساسیت به تغییر دبی هوای جانبی کمتر از افشانه 30SS می‌باشد. این موضوع را می‌توان مرتبط با کیفیت احتراق در قسمت‌های ابتدایی شعله نیز دانست. به نظر می‌رسد هرچه کیفیت احتراق نواحی ابتدایی شعله بهتر باشد تأثیر عوامل جانبی بر ساختار شعله کم‌رنگ‌تر می‌گردد.

در خصوص میزان برخاستگی شعله با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ می‌توان گفت برای هر سه افشانه استفاده شده در این پژوهش میزان برخاستگی تقریباً دارای مقادیر و روند یکسانی بوده و این برداشت صورت می‌گیرد که تغییر افشانه سوخت تأثیری چشم‌گیری بر میزان برخاستگی ندارد.

برای شعله‌های ایجاد شده به وسیله افشانه‌های 30SS، 30B و 60SS اقدام به تصویر برداری با فیلترهای گذر محدود ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر شده است. میزان میانگین تابش در این تصاویر فیلتر گذر محدود ۴۳۰ نانومتر به شکل کمی در نمودارهای شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با توجه به تصویر مربوط به فیلتر ۴۳۰ نانومتر مشاهده می‌شود افشانه 30SS شدت تابش کمتری نسبت به هنگام استفاده از افشانه‌های 60SS و 30B دارا می‌باشد و از طرف دیگر در تصاویر مربوط به افشانه‌های 60SS و 30B نقاط با شدت تابش بالایی بیشتر مشاهده می‌گردد. با توجه آنچه در قسمت قبلی مورد بحث قرار گرفت می‌دانیم شعله هنگام استفاده از افشانه 30SS سطح بیشتری نسبت به دو افشانه دیگر دارد و اکنون با توجه به تصاویر و نیز نمودار شکل ۱۲ می‌توان دریافت این افشانه تابش کمتری نیز نسبت به دو افشانه دیگر دارد. با در نظر گرفتن موارد یاد شده می‌توان گفت احتراق در افشانه 30B به دلیل برخورداری از الگوی پاشش توپر و اختلاط بهتر و افشانه 60SS نیز به دلیل زاویه بازتر پاشش و



شکل ۱۰: مقایسه تصاویر مربوط به فیلترهای ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر برای شعله‌های دارای پیچش هوای جانبی و بدون پیچش هوای جانبی



شکل ۱۱: نمودارهای طول، سطح دید از مقابل، حجم معادل و برخاستگی شعله با استفاده از افشانه‌های گوناگون

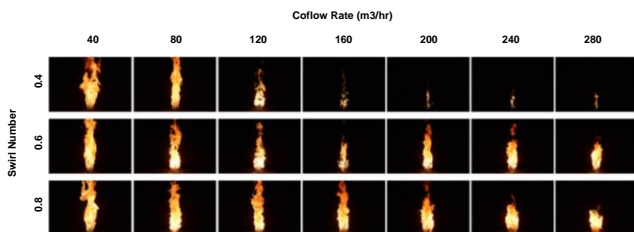
با بررسی تصاویر شعله‌های تشکیل شده به وسیله افشانه‌های مختلف نیز مشاهده می‌گردد که سطح مقطع دید از مقابل شعله نیز در هنگام استفاده از افشانه 30SS بیشتر از میزان اندازه‌گیری شده در هنگام استفاده از دو افشانه دیگر می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۱ که اطلاعات مربوط به سطح مقطع دید از مقابل را برای سه افشانه مورد استفاده را نمایش می‌دهد، میزان این پارامتر در دو افشانه 30B و 60SS تقریباً مشابه همدیگر و مقداری کمتر از مقدار آن در افشانه 30SS می‌باشد. این امر موید این موضوع است که تغییر در ساختار پاشش سوخت تأثیر ملموسی بر سطح مقطع دید از مقابل شعله نداشته در حالی که تغییر در زاویه پاشش سبب بهبود احتراق در ناحیه ابتدایی شعله شده که از نتایج آن افزایش سطح مقطع دید از مقابل شعله و حجیم‌تر شدن ناحیه شعله می‌باشد. با توجه به کاهش طول شعله و افزایش سطح دید از مقابل آن



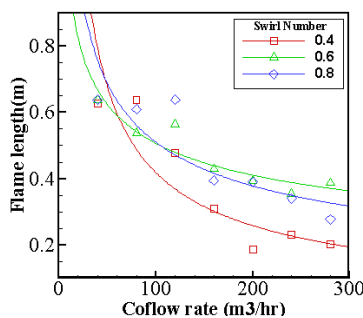
نسبت به ساختار نیمه توپر و به خصوص در مواردی که بازگشت گردابه در جریان مورد نظر رخ می‌دهد از خود نشان داده است. از این موضوع برداشت می‌گردد بازگشت گازهای داغ حاصل از احتراق به محیطی که سوخت در آن پاشیده می‌شود می‌تواند کیفیت احتراق را تا حد مطلوبی بهبود بخشد. همچنین در مقایسه نتایج مربوط به تغییر زاویه پاشش سوخت مشاهده گردید زاویه بازتر پاشش سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا گردیده و احتراق قوی‌تری را نسبت به زاویه بسته‌تر ارائه می‌نماید.

### تغییر دبی هوای جانبی

در بررسی اثرات افزایش دبی هوای جانبی مشاهده شد که طول شعله با استفاده از هر سه پیچاننده هوا با افزایش دبی هوای جانبی کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳ تصاویر شعله در دبی‌های مختلف هوا برای سه عدد پیچش مختلف با استفاده از افشانه 30SS قابل مشاهده است. این کاهش برای اعداد پیچش ۰.۶ و ۰.۸ تقریباً مشابه بوده اگرچه در عدد پیچش ۰.۸ کمی طول کمتر از حالت مشابه با عدد پیچش ۰.۶ می‌باشد. در عدد پیچش ۰.۴ با تغییر ناگهانی ساختار شعله در دبی هوای جانبی نزدیک به ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت، کاهش شدید طول شعله اتفاق افتاده و در این حالت شعله از شعله‌های با اعداد پیچش ۰.۶ و ۰.۸ کوتاه‌تر می‌باشد. در شکل ۱۴ تغییرات طول شعله برای شعله‌های شکل ۱۳ به صورت کمی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تغییرات ارتفاع شعله خطی نبوده و با افزایش دبی شیب تغییرات ارتفاع شعله کاهش می‌یابد. نمودارهای استخراج شده نشان می‌دهد با افزایش دبی از میزان حساسیت طول شعله به دبی هوا کاسته می‌شود تا جایی که افزایش بیشتر دبی هوا تاثیر چشم‌گیری بر طول شعله نمی‌گذارد. این پدیده احتمالاً به خاطر ساختار جریان‌های برگشتی ایجاد شده و تغییر کمتر مقدار طول در دبی‌های بالا به دلیل تثبیت این ساختار می‌باشد. این نمودار حاکی از آن است که ارتفاع شعله یک کاهش ۴۰ تا ۷۰ درصدی را نشان می‌دهد.



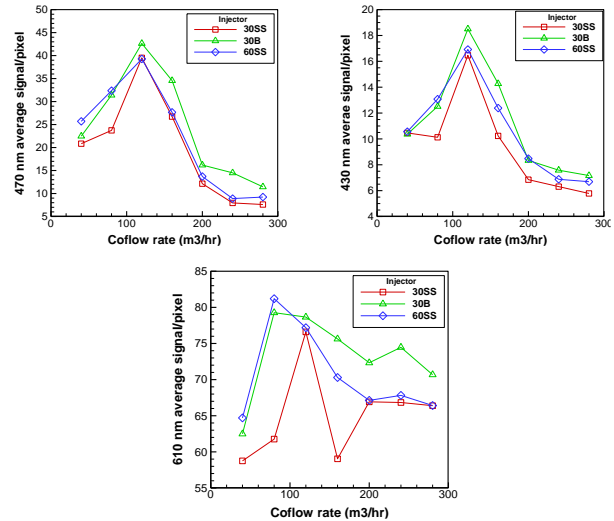
شکل ۱۳: تصاویر شعله برای دبی‌های هوای جانبی متفاوت در اعداد پیچش ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸



شکل ۱۴: نمودارهای میزان طول شعله برای دبی‌های هوای جانبی متفاوت در اعداد پیچش ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸

پارامتر عرض یا سطح مقطع دید مستقیم شعله نیز از منظر تعیین ابعاد محفظه مورد نیاز بر اساس اندازه شعله مد نظر می‌تواند حائز اهمیت باشد.

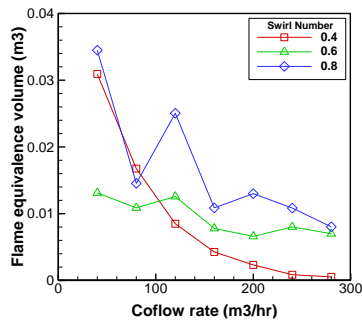
اختلاط بهتر از کیفیت احتراق بهتری برخوردار می‌باشند. به دلیل کمتر بودن کیفیت احتراق به خصوص در نواحی ابتدایی در افشانه 30SS سوخت برای احتراق کامل به فضای بیشتری نیاز داشته و به همین دلیل در این افشانه ناحیه اشغال شده به وسیله احتراق بیشتر و شدت آن نیز کمتر می‌باشد.



شکل ۱۲: نمودار میانگین تابش در فیلترهای ۴۷۰، ۴۳۰، ۶۱۰ نانومتر برای افشانه‌های مختلف سوخت

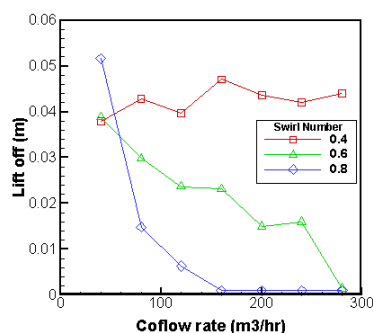
با توجه به تصاویر مربوط به فیلترهای گذر محدود ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر که می‌توان آنها را به ترتیب بیانگر میزان دمای احتراق و آزادسازی حرارت دانست مشاهده می‌گردد که میانگین تابش در فیلترهای ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر به هنگام استفاده از افشانه 30B مقدار بیشتری را نسبت به هنگام استفاده از افشانه‌های 30SS و 60SS دارا می‌باشد. گمان می‌رود به دلیل وجود ساختار جریان بازگشتی و الگوی پاشش سوخت توپر، در همان نواحی اولیه پاشش و اختلاط با کیفیت بهتری نسبت به دو افشانه دیگر صورت گرفته و شاهد بیشترین میزان تابش در فیلترهای گذر محدود و به نسبت آن بیشترین میزان دما و آزادسازی حرارت در این نواحی هستیم. در مقایسه بین افشانه‌های 30SS و 60SS نیز افشانه 60SS به دلیل داشتن زاویه پاشش بیشتر و نفوذ بیشتر هوا به داخل مخروط سوخت و به طبع آن بهبود کیفیت احتراق تابش بیشتری را در فیلترهای ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر از خود نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به میانگین تابش در فیلتر ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر نیز در نمودار شکل ۱۲ نمایش داده شده است. به طور کلی می‌توان گفت به ترتیب با حرکت از افشانه 30B به افشانه 60SS و سپس به 30SS از شدت احتراق در مرکز شعله کاسته شده و تابش به صورت ضعیف‌تر و یکنواخت‌تر و در یک ناحیه گسترده‌تر صورت پذیرفته و از گرادبان‌ها کاسته می‌گردد. مسئله دیگری که در تصاویر مربوط به فیلترها نیز قابل مشاهده است حساسیت کمتر ساختار شعله تشکیل شده با استفاده از افشانه 30B نسبت به تغییرات دبی هوای جانبی در مقایسه با دو افشانه دیگر می‌باشد. با بررسی نتایج بدست آمده در تصاویر کمتر بودن گرادبان‌ها در تصاویر مربوط به افشانه 30B نسبت به دو افشانه دیگر مشاهده می‌گردد.

برای جمع بندی نتایج ارائه شده در موضوع افشانه‌های سوخت می‌توان به این موضوع اشاره کرد که تعیین کننده‌ترین شرط در کیفیت احتراق الگوی پاشش بوده و همان‌گونه که مشاهده شد ساختار توپر عملکرد بهتری را



شکل ۱۶: نمودارهای میزان حجم معادل شعله برای دبی های هوای جانبی متفاوت در اعداد پیچش ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸

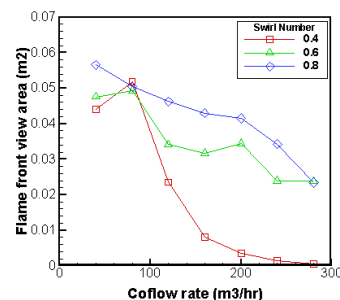
پارامتر برخاستگی شعله نیز در تعیین ساختار شعله موثر است. کریمی نشان داد که با افزایش برخاستگی شعله مکش هوای جانبی به داخل هسته جت پاشش افزایش یافته و ساختار شاخه‌ای شعله تقویت می‌گردد [10]. میزان برخاستگی شعله با افزایش دبی هوای جانبی در پیچاننده‌های هوا با اعداد پیچش متفاوت رفتارهای مختلفی را رقم می‌زند. در شکل ۱۷ این پارامتر برای تصاویر شکل ۱۳ استخراج شده است. در هنگام اعمال عدد پیچش ۰٫۴ میزان برخاستگی با افزایش دبی هوای جانبی افزایش می‌یابد که این در حالی است که با افزایش دبی هوای جانبی در اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸ از میزان برخاستگی کاسته شده و با افزایش میزان دبی از مقدار مشخصی برخاستگی دیگر وجود نخواهد داشت و شعله بر افشانه محاط می‌گردد. مقدار برخاستگی برای در عدد پیچش ۰٫۸ کمتر از عدد پیچش ۰٫۶ و در عدد پیچش ۰٫۶ کمتر از عدد پیچش ۰٫۴ می‌باشد که با این وجود می‌توان گفت با افزایش عدد پیچش میزان برخاستگی کاهش می‌یابد. چنین رفتاری برای سایر افشانه‌های مورد مطالعه نیز مشاهده گردید که نشان می‌دهد شرایط هوا نظیر عدد پیچش و دبی آن در فاصله شعله از افشانه موثر بوده و نوع پاشش چندان موثر نمی‌باشد. در جریانهای کم پیچش به علت عدم وقوع شکست گردابه افزایش سرعت هوای کناری منجر به پایداری شعله در ارتفاع‌های بالاتر شده و حتی فرار شعله را سبب شود اما با افزایش عدد پیچش به ۰٫۶ و ۰٫۸ و رخداد شکست گردابه تقویت پایداری شعله رخ داده و برخاستگی کاهش یافته و در سرعت‌های بسیار بالای هوای ورودی از بین می‌رود. برای مثال نتایج بیانگر این مطلب است برای پیچش ۰٫۶ در دبی هوای ۲۸۰ متر مکعب بر ساعت چسبندگی شعله رخ می‌دهد در حالی که برای عدد پیچش ۰٫۸ این اتفاق در دبی هوای حدود ۱۶۰ متر مکعب بر ساعت رخ می‌دهد.



شکل ۱۷: نمودارهای میزان برخاستگی شعله برای دبی های هوای جانبی متفاوت در اعداد پیچش ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸

#### بحث بر روی نتایج

همانطور که مشاهده می‌شود در شکل ۱۵ این پارامتر برای شعله‌های شکل ۱۳ استخراج شده است. میزان سطح مقطع دید مستقیم شعله با افزایش دبی هوای جانبی برای تمامی شرایط کاهش می‌یابد این کاهش هنگام اعمال عدد پیچش ۰٫۴ بیش از بقیه اعداد پیچش بوده که با توجه به تغییر ساختار شعله در این حالت با افت ناگهانی و شدید سطح مقطع دید مستقیم شعله در نزدیکی دبی ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت می‌باشیم. برای اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸ نیز با افزایش دبی هوای جانبی دچار کاهش در سطح مقطع دید مستقیم شعله می‌گردند که برای مقایسه مقدار مساحت مقطع دید مستقیم نیز می‌توان گفت در اکثر شرایط تست شده مساحت مقطع در عدد پیچش ۰٫۴ کمترین مقدار را داشته و مقدار مساحت مقطع دید مستقیم شعله در ۰٫۶ نیز کمتر از ۰٫۸ می‌باشد که بدین صورت می‌توان گفت با افزایش عدد پیچش سطح مقطع دید مستقیم شعله افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵: نمودارهای میزان سطح دید از مقابل شعله برای دبی های هوای جانبی متفاوت در اعداد پیچش ۰٫۴، ۰٫۶ و ۰٫۸

نکته مهم قابل اشاره ابعاد کوچکتر شعله با عدد پیچش ۰٫۴ در دبی‌های بالا است که باید توجه نمود در این عدد پیچش شعله ساختار متفاوتی را نسبت به عددهای پیچش بالا احتمالا دارا بوده و پدیده شکست گردابه رخ نداده است. در نتیجه کاهش ابعاد ناحیه احتراقی احتمالا مترادف با عدم احتراق کامل و وجود سوخت نسوخته خواهد بود.

به جهت جمع بندی مولفه‌های هندسی شعله تعیین حجم محفظه مورد نیاز شعله می‌تواند مفید واقع شود. بدین منظور حجم استوانه محاط به شعله با توجه به متغیرهای بیشترین شعاع شعله و طول شعله مورد محاسبه قرار می‌گیرد. نتایج این محاسبات برای تصاویر شکل ۱۳ در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

شکل بیانگر این است که با افزایش دبی هوا حجم ناحیه در برگیرنده شعله کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این ناحیه در عدد پیچش ۰٫۸ تقریباً از میزان ۰٫۰۳۵ در دبی هوای جانبی ۴۰ متر مکعب بر ساعت به مقدار ۰٫۰۱۲ متر مکعب در دبی هوای جانبی ۲۸۰ متر مکعب بر ساعت که ۳۰ درصد مقدار حجم اولیه می‌باشد میل می‌کند. البته در عدد پیچش ۰٫۴ حجم ناحیه احتراقی بسیار کوچک می‌شود که نشان از خاموشی‌های موضعی و احتراق ناقص بوده و لذا چندان قابل اعتنا نخواهد بود. نکته قابل توجه دیگر این مسئله است که حجم ناحیه احتراقی در عدد پیچش ۰٫۸ بیشتر از ۰٫۶ است که نشان می‌دهد در اعداد پیچش بالا اگرچه شعله طول کمتری دارد اما گسترش عرضی بیشتری داشته به نحوی که حجم استوانه در برگیرنده شعله افزایش خواهد یافت.

- [4] E. Comparison, C. Rapeseed, O. Combustion, and S. Burner, "applied sciences Experimental Comparison of Diesel and Crude Rapeseed Oil Combustion in a Swirl Burner," 2020.
- [5] N. Syred and J. M. Beér, "Combustion in swirling flows: A review," *Combustion and Flame*, vol. 23, no. 2, pp. 143–201, 1974, doi: 10.1016/0010-2180(74)90057-1.
- [6] F. James, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," vol. 195, pp. 183–195, 1990.
- [7] H. T. Non-premixed, "An Investigation on Flame Shape and Size for a High-Pressure Turbulent Non-Premixed Swirl Combustion," vol. 1, no. 1, pp. 1–20, 2018, doi: 10.3390/en11040930.
- [8] A. Mardani, A. Azimi, H. Karimi, and M. Mahalegi, "An Experimental Study on Kerosene Spray Combustion Under Conventional and Hot-Diluted Conditions An Experimental Study on Kerosene Spray Combustion Under Conventional and Hot-Diluted Conditions," *Combustion Science and Technology*, vol. 00, no. 00, pp. 1–40, 2021, doi: 10.1080/00102202.2021.1887156.
- [9] مطالعه ی تجربی و عددی احتراق اسپری تحت "، عظیمی، امیرحسین 1399، صنعتی شریف "، شرایط پیش گرم و رقیق سازی بالا
- [10] بررسی عددی احتراق آشفته اسپری "، کریمی متعلق محلگی، حامد 1399، صنعتی شریف "، تحت شرایط پیش گرم و رقیق سازی

در تحقیق جاری به مطالعه تجربی اثرات افزودن پیچش به هوای ورودی در یک مشعل متقارن محوری سوخت مایع کروسین پرداخته شده است. اثرات عدد چرخش و دبی هوا و نوع افشانه فشاری-چرخشی بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که:

- ایجاد پیچش در هوای جانبی سبب تغییرات جدی در پایداری شعله، مشخصات هندسی شعله و نورتایی شیمیایی شعله می گردد. با افزودن پیچش به هوای جانبی شاهد کوتاه شدن طول شعله، کاهش میزان بر خاستگی شعله (در برخی موارد تماس مستقیم شعله با سرمشعل)، کاهش سطح دید از مقابل، کاهش حجم معادل شعله و ایجاد چین خوردگی در سطح شعله می باشیم. همچنین با رخ دادن پدیده هایی همچون بازگشت گردابه و ایجاد زمان مناسب برای احتراق سوخت پایداری شعله افزایش چشم گیری در دبی های بالاتر داشته و راندمان احتراق افزایش می یابد که این امر را با مشاهده تصاویر مربوط به فیلتر های گذر محدود می توان دریافت.
- تغییر در افشانه سوخت از دیگر پارامترهای بررسی شده در تحقیقات صورت گرفته می باشد. در این تحقیقات به عنوان افشانه اصلی از مدل 30SS استفاده شده است. اما در کنار افشانه 30SS از افشانه 30B به منظور بررسی تغییر در الگوی پاشش و از افشانه 60SS به منظور بررسی تغییرات زاویه پاشش مورد استفاده قرار گرفته است. در نتایج بدست آمده به نظر می رسد در افشانه 60SS به دلیل نفوذ بهتر هوای جانبی به مرکز شعله اختلاط به شکل بهتری نسبت به افشانه 30SS صورت می گیرد. در افشانه 30B وجود الگوی توپر و ترکیب آن با شرایط بازگشت گردابه وضعیت مطلوب تری را برای احتراق نسبت به دو افشانه دیگر رقم می زند. بهبود شرایط احتراق منجر به کاهش مشخصه های هندسی شعله از جمله طول، مقطع دید از مقابل و بر خاستگی شده و همچنین وسیع شدن و یکنواخت تر شدن میدان احتراق را در تصاویر نورتایی شیمیایی شعله نشان می دهد.
- تغییر در دبی هوای جانبی با وجود پیچش هوای جانبی به خصوص در اعداد پیچش بالا سبب تغییر عمده ای در مشخصات هندسی از جمله طول، مقطع دید از مقابل، حجم معادل شعله می گردد که این تغییرات گاهی تا ۷۰ درصد مقدار اولیه نیز می باشد. بر خاستگی شعله و موضوع چسبندگی و عدم چسبندگی شعله به سرمشعل به نظر می رسد به شکل جدی وابسته به سرعت جریان هوای جانبی باشد و با افزایش میزان سرعت هوای جانبی بر خاستگی به شدت افت کرده و در سرعت معادل جریان جانبی نزدیک به ۴ متر بر ثانیه شعله بر افشانه مماس می گردد.

## مراجع

- [1] A. H. (Arthur H. Lefebvre 1923-, *Gas turbine combustion / Arthur H. Lefebvre*. Washington: Hemisphere Pub. Corp, 1983.
- [2] A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred, *Swirl Flows*. Abacus Press, 1984.
- [3] M. Shaiful and A. Ishak, "THE EFFECT OF SWIRL NUMBER ON REDUCING EMISSIONS," no. 19, pp. 48–56, 2005.