

بررسی تاثیر تغییر طول پره‌های یک چرخاننده کم‌چرخش بر میدان جریان در یک شعله پیش‌آمیخته

فراز ناصری پور طوسی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
f.naseripourtoosi@mail.sbu.ac.ir

سیدمهدی میرساجدی*

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_mirsajedi@sbu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیر تغییر در طول پره چرخاننده کم‌چرخش در یک شعله پیش‌مخلوط اشاره می‌شود. بدین منظور از دو چرخاننده چهار پره و هشت پره به شعاع ۷ میلی‌متر و شعاع صفحه انسداد ۴/۵ میلی‌متر استفاده شده است. با حفظ نسبت انسداد ۰/۸۸، پنج حالت مختلف فرض شده است. شبیه‌سازی میدان با استفاده از نرم افزار Fluent و با حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس و مدل آشفتگی k-ε صورت گرفته است. از هوا به عنوان اکسیدکننده و متان به عنوان سوخت با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ استفاده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که تغییر طول پره چرخاننده کم‌چرخش تاثیر به‌سزایی بر رفتار کلی جریان دارد. با افزایش طول پره، بیشینه مقدار سرعت در کانال، مربوط به چرخاننده چهار پره و هشت پره به ترتیب، از ۱۴ متر/ثانیه تا ۲۰ متر/ثانیه و از ۱۹ متر/ثانیه به ۲۶ متر/ثانیه افزایش می‌یابد. همچنین از منظر رفتار شعله مشاهده شد در دو حالت از چرخاننده چهار پره به دلیل نبود میزان چرخش لازم، شعله به صورت V شکل تشکیل نمی‌شود. نتایج نشان داد که در هندسه مورد نظر این تحقیق کمینه مقدار چرخش برای داشتن شعله V شکل ۱۴۰ واحد/ثانیه می‌باشد. شایان ذکر است، که با افزایش طول پره چرخاننده، شعله به مکان پایین‌تری منتقل می‌شود که اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار جابجایی در چرخاننده‌های چهار و هشت پره به ترتیب ۴/۷ و ۷/۸ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: احتراق کم‌چرخش، چرخاننده کم‌چرخش، طول پره، شعله‌ی V شکل، گاز طبیعی، احتراق پیش‌آمیخته.

Investigating the effect of changing the length of the blades of a low-swirl burner on the flow field in a premixed flame

F. Naseripour Toosi

Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

S. M. Mirsajedi

Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the objective was to investigate the impact of altering the length of low-swirl burner blades within a premixed flame. To achieve this, two types of swirler, one with four blades and another with eight blades, both featuring a radius of 7 mm and a perforated plate radius of 4.5 mm, were utilized. Five different operational modes were considered, while maintaining a blockage ratio of 0.88. The computational simulations were conducted using Fluent software, involving the solution of the three-dimensional Navier-Stokes equations and the k-ε turbulence model. Air served as the oxidizer, and methane was used as the fuel with an equivalence ratio of 0.65. The results indicate that modifying the length of the low-swirl burner blades exerts a substantial influence on the overall flow characteristics. As the blade length increases, the maximum velocity within the channel, corresponding to the four-bladed and eight-bladed burner, increased from 14 m/s to 20 m/s and from 19 m/s to 26 m/s, respectively. Additionally, concerning flame behavior, it was observed that in two instances with the four-blade burner, the flame failed to form a V-shape due to insufficient rotational motion. The findings revealed that in the specific geometric configuration of this research, a minimum rotational rate of 140 units/second was required to achieve a V-shaped flame. It is noteworthy that as the length of the rotating blades increased, the flame descended to a lower position, resulting in a maximum displacement of 4.7% and 7.8% for the four-bladed and eight-bladed burner, respectively.

Keywords: Low-swirl combustion- Low-swirl burner, Blades length, V flame, Natural gas, Premixed combustion.

۱- مقدمه

صنعتی از جمله سیستم‌های توربین گازی، دیگ‌های بخار و مشعل‌های صنعتی ایفا می‌کند و آن را برای بسیاری از کاربردها ضروری می‌کند. در اصل، احتراق قلب تپنده چشم‌انداز انرژی ما است که باعث پیشرفت و رفع نیازهای ضروری ما می‌شود [۱]. جریان چرخشی یک تکنیک اساسی است که برای افزایش پایداری احتراق در یک محفظه احتراق استفاده می‌شود [۲]. این روش شامل ایجاد یک حرکت چرخشی یا گردابه به مخلوط سوخت و اکسید قبل از احتراق است [۳]. جریان چرخشی چندین مزیت حیاتی دارد. در مرحله اول، باعث اختلاط یکنواخت‌تر سوخت و اکسید می‌شود [۴]. این مخلوط همگن امکان

احتراق یک فرآیند حیاتی با اهمیت گسترده می‌باشد که عامل اصلی تبدیل انرژی شیمیایی ذخیره شده در سوخت‌های فسیلی به انرژی حرارتی و مکانیکی است که زندگی روزانه ما را تامین می‌کند و دارای طیف بسیار گسترده‌ای از تولید الکتریسیته تا حمل و نقل و یا موتورهای احتراقی پیشران می‌باشد. علاوه بر این، سیستم‌های مبتنی بر احتراق مانند کوره‌ها و دیگ‌ها برای گرم کردن فضاهای مسکونی و صنعتی بسیار مهم هستند و آسایشی را که روزانه به آن تکیه می‌کنیم را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، احتراق نقش اصلی را در فرآیندهای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_mirsajedi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۲۰/۸/۲۹

احتراق کارآمد و کامل را فراهم می‌کند و تشکیل آلاینده‌های مضر را به حداقل می‌رساند [۵]. ثانیاً، جریان چرخشی موجب انتشار سریع‌تر شعله می‌شود. این فرآیند احتراق سریع و کنترل شده، پایداری شعله را افزایش می‌دهد و از خاموش شدن شعله یا فلش بک^۱ جلوگیری می‌کند [۶]. علاوه بر این، گردابه ایجاد شده توسط جریان چرخشی به عنوان یک مانع فیزیکی عمل می‌کند که شعله را در برابر اختلالات خارجی محافظت می‌کند، مانند حرکات ناخواسته هوا ناشی از عواملی نظیر باد، سیستم‌های تهویه، یا منافذ موجود در یک سازه [۷]. همچنین به جهت کاهش طول مورد نیاز برای احتراق باعث کاهش و بهبود محفظه احتراق می‌شود [۸]. امروزه با توجه به گرمایش جهانی و افزایش انتشار آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، ملاحظات زیست محیطی در این زمینه افزایش پیدا کرده است [۹-۱۰]. طبق قوانین و مقررات جدیدی که در این زمینه در حال تدوین است، میزان آلاینده‌های تولیدی احتراق از جمله هیدروکربن‌های نوسوخته و اکسیدهای نیتروژن باید تا حد قابل توجهی کاهش یابد. به همین دلیل مطالعه بر روی روش‌های متفاوت احتراق که آلاینده‌های کمتری دارند در حال افزایش است. یکی از این روش‌ها، استفاده از احتراق پیش‌مخلوط می‌باشد [۱۱]. احتراق پیش‌مخلوط، در حالی که بسیار کارآمد است، می‌تواند چندین خطر را به همراه داشته باشد. یکی از خطرات قابل توجه، احتمال برگشت شعله می‌باشد. برگشت شعله زمانی اتفاق می‌افتد که شعله به سمت داخل سیستم تامین مخلوط سوخت و هوا کشیده شود. این امر می‌تواند منجر به شرایط انفجاری در سیستم احتراقی شود و خطر آسیب به تجهیزات یا حتی خرابی‌های فاجعه بار را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، احتراق پیش‌مخلوط می‌تواند مستعد ناپایداری شعله نیز باشد. تغییرات در مخلوط سوخت و هوا یا شرایط عملکرد می‌تواند باعث نوسان یا خاموش شدن شعله شود که منجر به احتراق ناکارآمد، انتشار گازهای گلخانه‌ای و حتی خطرات ایمنی شود. علاوه بر این، سیستم‌های احتراق پیش‌مخلوط مستعد تولید سطوح بالاتری از آلاینده‌های مضر از جمله اکسیدهای نیتروژن و مونوکسید کربن نیز می‌باشند [۱۲-۱۳]. احتراق کم‌چرخش پیش‌مخلوط یک پیشرفت نسبتاً جدید و یک ابزار عالی برای تحقیقات آزمایشگاهی در مورد فعل و انفعالات شعله آشفته است که می‌توان به افزایش پایداری شعله و کاهش انتشار آلاینده‌های احتراق کمک کرد [۱۴-۱۶]. احتراق کم‌چرخش ابتدا در قالب شعله‌های کم‌چرخش معرفی شد. در این نوع شعله‌ها، نواحی بازگردشی جریان در نزدیکی دهانه مشعل وجود ندارد [۱۷-۱۸]، در نتیجه دمای محلی شعله کمتر و انتشار آلاینده‌های NO_x نیز پایین‌تر است [۱۹]. سازوکار پایداری شعله‌های کم‌چرخش به این صورت است که زمانیکه جریان کم‌چرخش سوخت و هوا از مشعل خارج می‌شود، نیروهای گریز از مرکز ناشی از حرکت چرخشی جریان، باعث منبسط شدن جریان محوری می‌شوند و آن را به سمت خارج واگرا می‌کند [۲۰-۲۱]. این واگرایی باعث کاهش سرعت محوری جریان شده و سرعت شعله پیش‌مخلوط آشفته بواسطه برابر شدن با سرعت جریان باعث پایداری

شدن شعله می‌شود. این امر باعث می‌شود که شعله بدون هیچ نقطه اتکایی در بالای مشعل پایدار شده و بدنه مشعل همیشه سرد باقی بماند و به دلیل پایین بودن دمای نازل مشعل، می‌توان مشعل را از جنس سبک و ارزان قیمت همچون پی وی سی تهیه نمود [۲۲]. در این چرخاننده خاص یک جریان چرخشی ضعیف بر سر راه جریان محوری اصلی وارد می‌گردد و باعث می‌شد شعله در بالای چرخاننده به صورت معلق پایدار بماند. این چرخاننده دارای یک جریان پیش‌آمیخته محوری بود که در مسیر آن چهار جت مماسی تعبیه شده بود. این چهار جت وظیفه ایجاد یک جریان مماسی سرعت داشت و باعث ایجاد یک سرعت چرخشی ضعیف در جریان محوری اصلی می‌گردید. در سال ۲۰۰۴ جانسون و همکاران [۲۳] مطالعات گسترده‌ای بر روی مقایسه عملکردی مشعل کم‌چرخش با مشعل پرچرخش انجام داده و تفاوت‌های میدان جریان در این دو مشعل را با استفاده از PIV^۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مشعل کم‌چرخش بر خلاف مشعل پرچرخش ناحیه بازگردشی قوی وجود ندارد. در حقیقت بازگردش محصولات داغ به سمت واکنش‌دهنده‌ها و برخورد این دو جریان و فراهم سازی انرژی فعالسازی برای ادامه احتراق مکانیزم پایداری مشعل‌های پرچرخش است. به عبارت دیگر در مشعل‌های پرچرخش یک ناحیه بازگردشی با سرعت میانگین منفی (نسبت به جریان محوری) ایجاد می‌شود که ادامه احتراق پایدار را ممکن می‌سازد. از سوی دیگر این ناحیه زمان ماند محصولات احتراق در ناحیه اشتعال را افزایش داده که این امر باعث افزایش تولید آلاینده‌های احتراق می‌شود. در مشعل‌های کم‌چرخش با حذف این ناحیه هیچ ناحیه‌ای از میدان جریان دارای سرعت منفی نمی‌باشد و در غیاب ناحیه بازگردشی قوی میزان تولید آلاینده‌های اکسید نیتروژن بسیار کاهش می‌یابد. میزان کاهش تولید ناکس در مشعل‌های کم‌چرخش در این تحقیق ۶۰ درصد کمتر از مشعل پرچرخش گزارش شده است. نتایج همچنین نشان داد که دامنه کاری مشعل کم‌چرخش مشابه مشعل پرچرخش بوده و در تمامی شرایط عملکردی نظیر شرایط دبی و دما و همچنین فشار دارای عملکردی پایدار می‌باشد. در سال ۱۹۹۵ رابرت چنگ و یگیان مطالعه دیگری بر روی مشخصه‌های پایداری سطح آلاینده‌های این چرخاننده انجام داده و دریافتند حداقل چرخش مورد نیاز که شعله در آن پایدار است، مستقل از محفظه احتراق و میزان دبی ورودی می‌باشد. آن‌ها در این مطالعه دریافتند نسبت هم‌ارزی مناسب این مشعل ۰/۸ است که یک مخلوط رقیق شده با هوای اضافی می‌باشد و چرخاننده در این نسبت هم‌ارزی لازم برای احتراق، کمترین میزان آلاینده‌های نیتروژن را در حدود ۲۵ واحد در میلیون^۳ دارا می‌باشد [۲۴]. در سال ۱۹۹۶ رابرت چنگ و همکاران [۲۵] بار دیگر یک هندسه چرخاننده متفاوتی را معرفی کردند که در مسیر اصلی جریان محوری سوخت و اکسید قرار می‌گرفت و میدان جریان مشابه به میدان جریان ایجاد شده توسط جت‌های مماسی که در سال ۱۹۹۲ اختراع شده بود را همراه داشت. این

² PIV (Particle Image Velocimetry)

³ PPM (Parts Per Million)

¹ Flash-back

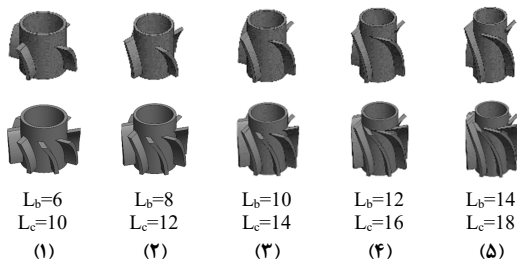
نسبت انسداد صفحه مغشوش کننده است و با تغییر این میزان می توان نسبت دبی گذرنده از بخش چرخشی به بخش غیر چرخشی را تنظیم کرد. نسبت انسداد از طریق رابطه ۳ محاسبه می شود که برای چرخاننده های مورد استفاده در این مطالعه برابر با مساحت کل صفحه به جزء مجموع مساحت حفره های صفحه مغشوش کننده، به مساحت کل این صفحه می باشد که با نماد A_p نشان داده شده است. در این رابطه A_h مجموع مساحت حفره های صفحه مغشوش کننده و N_h برابر با تعداد حفره ها است. r_p و r_h هم به ترتیب برابر شعاع صفحه مغشوش کننده و شعاع حفره ها می باشد.

$$B = \frac{A_p - A_h}{A_p} \rightarrow B = \frac{\pi r_p^2 - N_h(\pi r_h^2)}{\pi r_p^2} \quad (3)$$

در این تحقیق از دو چرخاننده چهار و هشت پره در پنج حالت با طول پره متفاوت و درصد گرفتگی صفحه مغشوش یکسان استفاده شده است. نسبت انسداد هر چرخاننده ۰/۸۸ می باشد و تعداد حفره ها در هر چرخاننده نه حفره می باشد. اندازه پره ها برای هر دو چرخاننده به ترتیب ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی متر در نظر گرفته شده است. هدف از این مطالعه نیز بررسی تاثیر تغییر در اندازه طول پره ها چرخاننده کم چرخش بر میدان جریان در یک شعله پیش آمیخته می باشد.

۲- فیزیک مسئله

همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می شود چرخاننده کم چرخش مطالعه شده در این شبیه سازی از تعداد چهار و هشت پره با زاویه ۴۰ درجه و ارتفاع معیار ۱۴ میلی متر تشکیل شده است. عدد چرخش هندسی مطابق رابطه ۲ برابر ۰/۱۶ و نسبت انسداد هر کدام از چرخاننده ها ثابت و برابر ۰/۸۸ می باشد. همچنین تعداد حفره ها n_h و شعاع آن ها r_h و شعاع صفحه مغشوش کننده r_p در (رابطه ۳) به ترتیب ۹ حفره، ۰/۵۲ و ۵/۴ میلی متر می باشد. همچنین مقادیر طول پره و استوانه در نظر گرفته شده برای این دو چرخاننده در جدول ۱ مشاهده می شود. قطر مشعل مطالعه شده در این بررسی برابر ۱۴ میلی متر است. از گاز متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسید کننده به صورت پیش آمیخته استفاده شده است.



شکل ۱- چرخاننده با تعداد چهار و هشت پره در طول پره متفاوت (مقادیر به میلی متر است.)

چرخاننده از مجموع چند المان به هم متصل تشکیل شده بود که عبارتند از صفحه مغشوش کننده جریان و تعدادی پره راهنما برای به چرخش در آوردن جریان سوخت و اکسید. آن ها این دو بخش را به نام چرخاننده کم چرخش نام گذاری کردند. آن ها در ادامه در سال ۱۹۹۶ [۲۶] مطالعه دیگری بر روی توسعه این نوع از چرخاننده ها انجام دادند و با بهینه سازی های هندسه چرخاننده نتایج به دست آمده میزان آلاینده های اکسیدهای نیتروژن را کمتر از ۴۰ واحد در میلیون گزارش داد. در سال ۱۹۹۸ [۲۷] چنگ و یگیان مطالعه دیگر بر روی سرعت جریان های متفاوت و ابعاد محفظه احتراق بزرگتر انجام دادند و نتایج نشان داد که میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در نسبت های هم ارزی ۰/۸ کمتر از ۱۵ واحد در میلیون می باشد و در تمامی سرعت های جریان میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در همین محدوده و مقیاس خواهد بود. این نوع از چرخاننده های کم چرخش اساساً دارای دو بخش می باشند، که عبارتند از پره های راهنما و صفحه انسداد کننده جریان، به طوری که یک سری پره با زاویه و تعداد مشخص متحد المركز دور یک کانال مرکزی کشیده شده اند. وظیفه این پره ها چرخاندن جریان محوری سوخت و اکسید از قبل پیش آمیخته می باشد، این چرخش متناسب با زاویه پره های چرخاننده است. کانال مرکزی از یک صفحه سوراخ دار با اشکال و چینش گوناگون تشکیل شده است که نقش مغشوش کننده جریان را دارد. همچنین امکان تغییر نسبت دبی عبوری از بخش مرکزی، نسبت به بخش چرخشی را می تواند فراهم کند. برای توصیف اندازه چرخش در یک میدان جریان چرخشی رایج ترین پارامتر بیان شده عدد بی بعد چرخش می باشد که اولین بار توسط بیبر و همکاران در سال ۱۹۷۲ [۲۸] بیان شد.

$$S = \frac{G_{ang}}{R_b G_x} = \frac{\int_0^\infty \rho U W r^2 dr}{R_b \int_0^\infty \rho \left(U^2 - \frac{1}{2} W^2 \right) r dr} \quad (1)$$

در این رابطه، U میانگین سرعت مولفه محوری و W میانگین سرعت مولفه مماسی است. در تعیین عدد چرخش چرخاننده کم چرخش، با توجه به اینکه میدان جریان و ویژگی های میزان تکانه چرخشی و محوری توسط چرخاننده ها ایجاد می شود، می توان با اعمال کردن هندسه چرخاننده در رابطه ۱، رابطه عدد چرخش مربوط به چرخاننده کم چرخش را محاسبه کرد. عدد چرخش هندسی توسط پارامترهای هندسی چرخاننده محاسبه شده و به صورت زیر است [۲۹].

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1 - R^3}{1 - R^2 + \left[m^2 \left(\frac{1}{R^2 - 1} \right)^2 \right] R^2} \quad (2)$$

در رابطه ۲، R برابر با نسبت شعاع کانال مرکزی چرخاننده r_p به شعاع چرخاننده r_i و α زاویه پره های چرخاننده و m نسبت دبی جرمی گذرنده از بخش محوری به بخش چرخشی است. عدد چرخش هندسی همواره تابعی از پارامترهای هندسی چرخاننده است که این سه پارامتر اصلی چرخاننده عبارتند از: نسبت شعاع R ، زاویه پره α و نسبت انسداد صفحه مغشوش کننده B می باشد. تغییر هر کدام از این پارامترها سبب تغییر در عدد چرخش و مشخصات عملکردی شعله می شود. نسبت انسداد برابر با نسبت مساحت پوشیده شده صفحه مغشوش کننده به مساحت کل آن است. صفحه مغشوش کننده در چرخاننده وظیفه تنظیم دبی عبوری بین بخش محوری مرکزی و چرخشی را دارد. این نسبت که در رابطه ۲ با m نشان داده شده است، تحت تاثیر میزان

جدول ۱- مقادیر طول پره و استوانه چرخاننده با تعداد چهار و هشت پره (مقادیر به میلی‌متر است.)

چرخاننده	طول پره (L_p)	طول استوانه (L_s)
۱	۶	۱۰
۲	۸	۱۲
۳	۱۰	۱۴
۴	۱۲	۱۶
۵	۱۴	۱۸

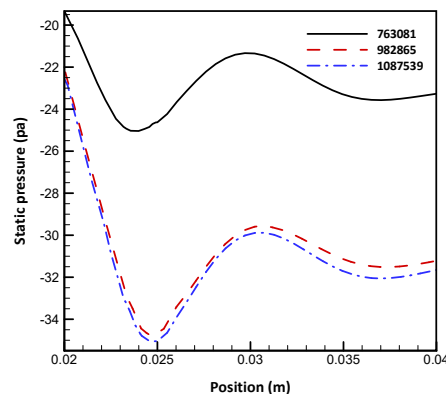
۲-۱- مطالعه شبکه و روش حل

شبکه بندی میدان در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Ansys meshing صورت گرفته است. با توجه به ساختار میدان جریان که شامل دو بخش پرها و قسمت خالی است، از دو نوع شبکه شش و چهار وجهی و به صورت بی‌سازمان استفاده شده است. در مطالعه استقلال شبکه سه نوع شبکه شامل ۷۶۳۰۸۱ المان، ۹۸۲۸۶۵ المان و ۱۰۸۷۵۳۹ المان تولید و متغیر فشار استاتیکی بر روی یک خط مرکزی بعد از چرخاننده به عنوان معیار در نظر گرفته شد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود اختلاف میان نتایج شبکه متوسط و زیر قابل قبول بوده و بنابراین ادامه حل با تعداد ۹۸۲۸۶۵ المان در نظر گرفته می‌شود.

شبیه‌سازی عددی این تحقیق از فرم سه بعدی معادلات ناویر-استوکس استفاده شده است. مدل آشفتگی از روش $k-\epsilon$ و مدل‌سازی احتراق نیز به روش پیش‌آمیخته جزئی با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ انجام گرفته است.

جدول ۲- پارامترهای حل جریان

Parameter	Value
Equivalence ratio of fuel and oxidizer (ϕ)	0.7
Fuel	CH ₄
Oxidizer	79% N ₂ + 21% O ₂
Operating pressure	101325 Pa
Velocity inlet	5 m/s
Inlet temperature of mixture	300 K



شکل ۲- نمودار تطبیق شبکه

۳- اعتبارسنجی

برای صحت سنجی بر شبیه‌سازی انجام شده، از دو چرخاننده هشت پره با نسبت شعاع‌های متفاوت جدول ۳- شکل ۳ استفاده شده

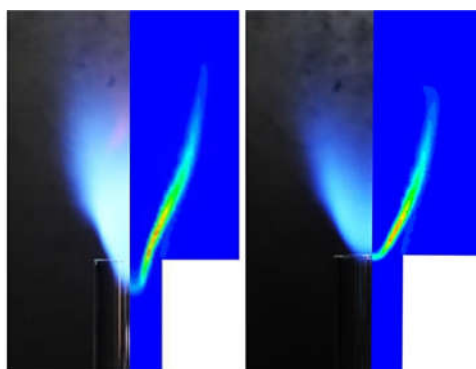
است. مقادیر زوایای پرها، تعداد حفره و نسبت انسداد در نظر گرفته شده برای این چرخاننده‌ها به ترتیب برابر 9.4° ، حفره و $0.88/$ می‌باشد. همچنین از تجهیزات آزمایشگاه پیش‌رانش دانشکده هوافضا دانشگاه شهید بهشتی [۳۰] به منظور آزمایشات تجربی بهره گرفته شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج عددی با دقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشات تجربی و عکس‌های گرفته شده از جبهه شعله ایجاد شده توسط چرخاننده‌های مذکور هم‌پوشانی دارد.

جدول ۳- مشخصات هندسی چرخاننده آزمایش تجربی (واحدها به میلی‌متر است.)

شماره	r_p	r_h	$R = r_p/r_i$
۱	۴/۵	۰/۵۲	۰/۶۴
۲	۵/۱	۰/۵۹	۰/۷۲



شکل ۳- چرخاننده‌های آزمایش تجربی



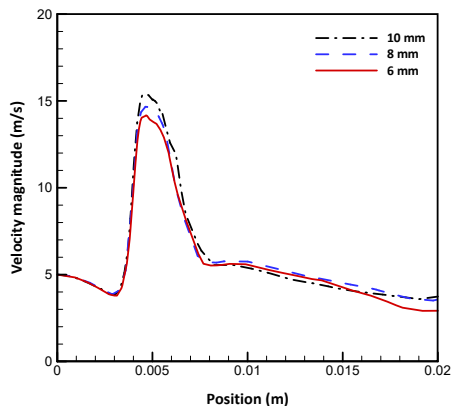
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی عددی (مکان جبهه شعله) و نتایج آزمایشات تجربی

۴- نتایج

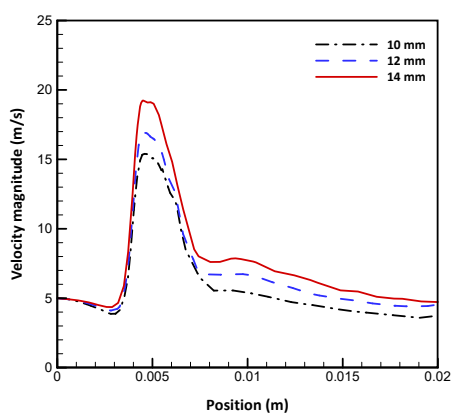
هدف از تغییر در میزان اندازه طول پره‌های چرخاننده کم‌چرخش در پنج حالت، بررسی جزء به جزء پارامترهای اصلی مرتبط با جریان‌های چرخشی شامل چگونگی تغییرات سرعت در طول کانال، میزان قدرت گردابه‌ای، مقادیر افت فشار و در ادامه بررسی رفتار و موقعیت پایداری رژیم شعله کم‌چرخش می‌باشد. نتایج هر قسمت در دو بخش بیان می‌شود که بخش اول مربوط به تاثیرات کاهش طول پرها و بخش دوم مربوط به تاثیرات افزایش طول پرها می‌باشد.

۱-۱- توزیع سرعت

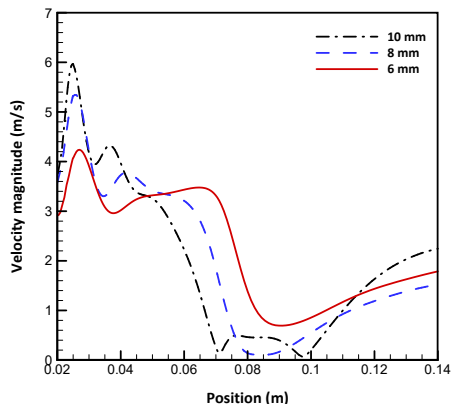
در شکل‌های ۵ و ۶ تغییر سرعت بر روی یک خط مرکزی داخل کانال مربوط به چرخاننده چهار پره در حالات کاهش و افزایش طول پره قبل و بعد از چرخاننده ارائه شده است. مشاهده می‌شود به دلیل وجود صفحه مغشوش کننده و انسداد نسبی جریان، فشار تا صفحه



شکل ۵- توزیع سرعت در چرخاننده چهار پره (کاهش طول پره)



شکل ۶- توزیع سرعت در چرخاننده چهار پره (افزایش طول پره)

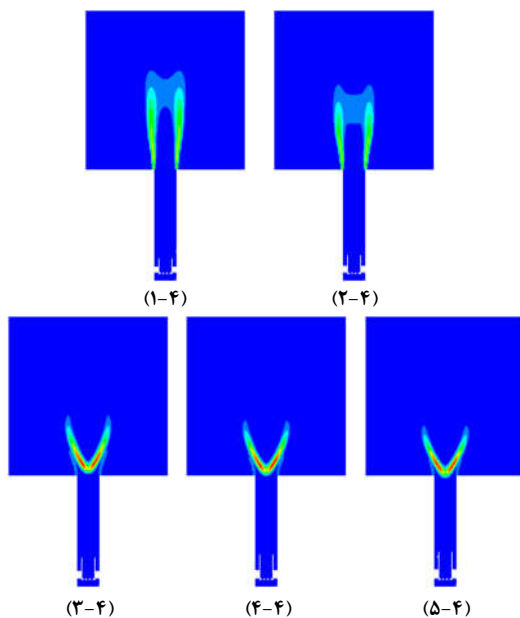


شکل ۷- توزیع سرعت در چرخاننده چهار پره (کاهش طول پره)

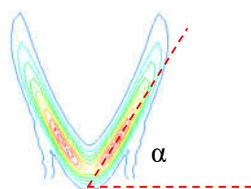
مذکور افزایش می‌یابد. سپس و با توجه به زیر صوت بودن جریان و انتقال اطلاعات از پایین دست میدان، اطلاعات حفره‌ها منتقل شده و جریان با سرعت از حفره‌های صفحه مغشوش کننده عبور می‌کند. در ادامه و همانگونه که در مرجع [۳۱] بیان شده است به دلیل تشکیل گردابه درون کانال مرکزی و اثر تقابلی آن‌ها سرعت کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این حالات آن است که به دلیل یکسان بودن الگوی چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده در هر ۵ چرخاننده در این تحقیق، قدرت گردابه‌ها تقریباً یکسان بوده و برخلاف نمودارهای مرجع [۳۱] که میزان کاهش سرعت در طول‌های مختلفی از چرخاننده رخ می‌داد در این تحقیق در محل مشابهی صورت گرفته است. با عبور از چرخاننده (با توجه به زیر صوت بودن جریان) و انبساط جریان، فشار افزایش یافته و سرعت کاهش می‌یابد. در شکل‌های اخیر همچنین مشاهده می‌شود با افزایش میزان طول پره و با توجه به خط فانو و تمایل جریان به افزایش سرعت (در جریان‌های زیر صوت) بیشینه مقدار سرعت از ۱۴ m/s (مربوط به پره با طول ۶ میلی‌متر در شکل ۵) تا ۲۰ m/s (مربوط به پره با طول ۱۴ میلی‌متر در شکل ۶) افزایش یافته است. با توجه به تکرار این تحقیق برای چرخاننده هشت پره مشاهده می‌شود که تغییر رفتار سرعت در میدان جریان کاملاً مشابه با حالت چهار پره بوده و فقط مقادیر بیشینه سرعت متفاوت است. به گونه‌ای که مقدار بیشینه سرعت در طول پره‌های یاد شده از ۱۹ m/s تا ۲۶ m/s افزایش می‌یابد.

در ادامه و در بررسی توزیع سرعت بر روی یک خط بعد از هندسه چرخاننده شکل ۱۰-۷ مشاهده می‌شود که در هر دو حالت چرخاننده چهار و هشت پره، الگوی رفتاری جریان در دهانه خروجی کانال و در طول پره‌های ۱۲، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر یکسان است. به عبارت دیگر در خروجی کانال افزایش سرعت رخ می‌دهد. این در حالیست که در چرخاننده چهار پره و در طول‌های ۶ و ۸ میلی‌متر الگوی رفتاری مذکور رخ نداده است. تحلیل این موضوع در بخش بررسی رفتار شعله و بر روی کانتورهای نرخ تشکیل محصولات که غالباً برای نمایش شکل جبهه شعله استفاده می‌شوند ارائه می‌شود. با توجه به فیزیک میدان جریان و مطالعات پیشین [۳۲]، انتظار می‌رود که یک منطقه بازگردشی در محل پیدایش جبهه شعله ۷ شکل (دهانه خروجی کانال) تشکیل شود، که این ناحیه برای چرخاننده با تعداد چهار و هشت پره در مکان ۷۰ میلی‌متری شکل ۸-۱۰ مشاهده می‌شود. از نتایج قابل توجه ایت تحقیق آن است که با افزایش طول پره چرخاننده کم‌چرخش، طول ناحیه بازگردشی جریان افزایش و شیب تغییرات سرعت که نشان دهنده قدرت آن است نیز افزایش یافته است.

نشده است. در عین حال مشاهده شد در تمامی حالات چرخاننده هشت پره شعله V شکل تشکیل می‌شود. از دیگر نکات قابل توجه در این تحقیق آن است که با افزایش طول پره چرخاننده، شعله به مکان پایین‌تری منتقل می‌شود. اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار جابجایی در چرخاننده‌های چهار و هشت پره به ترتیب $4/7$ و $7/8$ درصد می‌باشد. شایان ذکر است که در مرجع [۳۱] نشان داده شد که تغییر در الگوی چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده جریان، تاثیر ناچیزی بر جابجایی مکان شعله دارد. تحلیل این موضوع در بخش بررسی رفتار شعله و بر روی کانتورهای نرخ تشکیل محصولات که غالباً برای نمایش شکل جبهه شعله استفاده می‌شوند ارائه می‌شود.



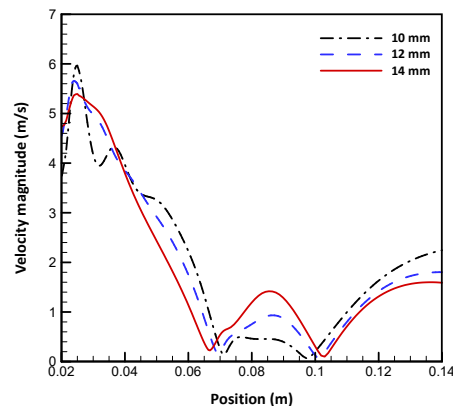
شکل ۱۱- نرخ تشکیل محصولات در چرخاننده چهار پره



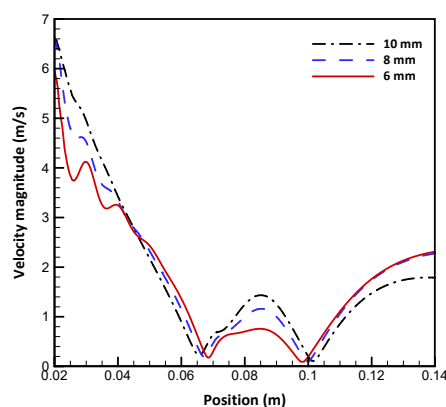
شکل ۱۲- معیار اندازه‌گیری زاویه شعله

جدول ۴- مکان پایداری شعله و زاویه آن با دیواره

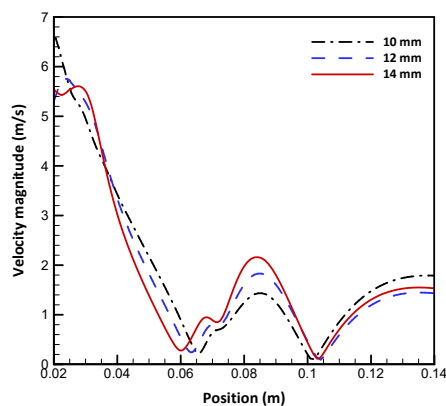
چرخاننده	مکان شعله V شکل (میلی‌متر)	زاویه شعله
(۱-۴)	عدم تشکیل شعله V	-
(۲-۴)	عدم تشکیل شعله V	-
(۳-۴)	۶۸	°۵۸
(۴-۴)	۶۶/۶	°۵۸
(۵-۴)	۶۴/۸	°۵۷
(۱-۸)	۶۶/۳	°۵۹
(۲-۸)	۶۵/۵	°۵۶
(۳-۸)	۶۴/۲	°۵۵
(۴-۸)	۶۳/۲	°۵۹
(۵-۸)	۶۱/۱	°۵۵



شکل ۸- توزیع سرعت در چرخاننده چهار پره (افزایش طول پره)



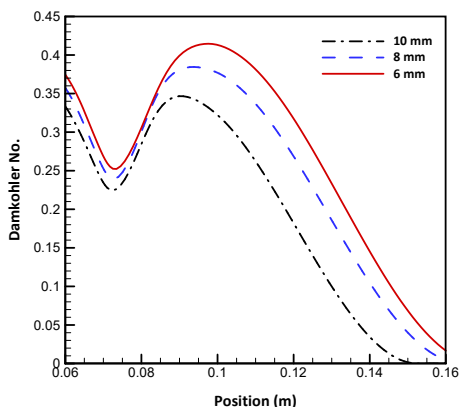
شکل ۹- توزیع سرعت در چرخاننده هشت پره (کاهش طول پره)



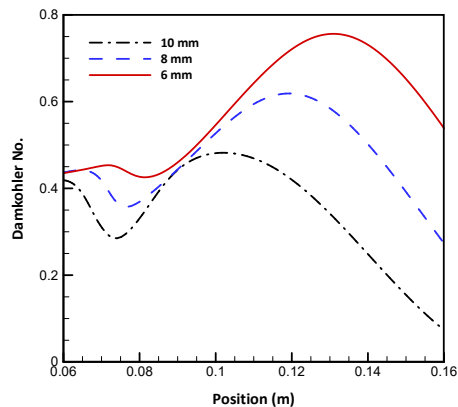
شکل ۱۰- توزیع سرعت در چرخاننده هشت پره (کاهش طول پره)

۲-۴- بررسی رفتار شعله

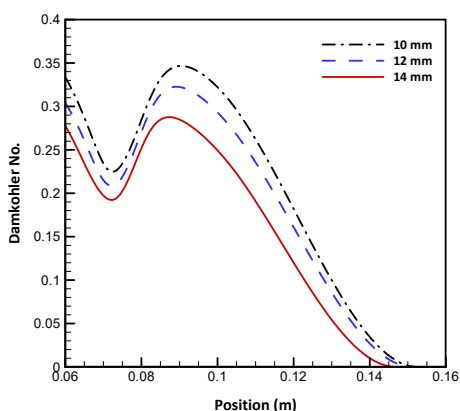
در شکل ۱۱ شکل کلی، مکان پایداری و زاویه بازشدگی جبهه شعله برای چرخاننده چهار پره ارائه شده است. بر این اساس مقادیر زاویه شعله و موقعیت پایداری آن در جدول ۴ نشان داده شده است. با مشاهده کانتورهای نرخ تشکیل محصولات می‌توان دریافت که در چرخاننده چهار پره با طول پره ۶ و ۸ میلی‌متر که الگوی رفتاری سرعت ذکر شده متفاوت بود شعله به صورت کاسه ای V شکل تشکیل



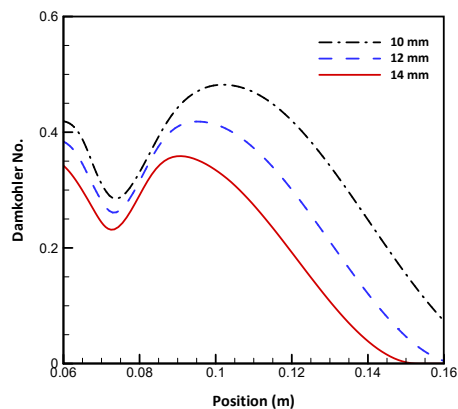
شکل ۱۵- عدد دامکوهلر چرخاننده هشت پره (کاهش طول پره)



شکل ۱۳- عدد دامکوهلر چرخاننده چهار پره (کاهش طول پره)



شکل ۱۶- عدد دامکوهلر چرخاننده هشت پره (افزایش طول پره)



شکل ۱۴- عدد دامکوهلر چرخاننده چهار پره (افزایش طول پره)

۳-۴- میزان چرخش جریان

در این بخش به میزان چرخش در دو چرخاننده چهار و هشت پره پرداخته می‌شود. همانگونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود میزان چرخش جریان در دو چرخاننده چهار پره با طول پره ۶ و ۸ میلی‌متری نسبت به دیگر حالات به میزان قابل توجهی دچار افت شده است. این بدان معناست که دلیل عدم تشکیل شعله کاسه‌ای V شکل، میزان چرخش کم جریان است. با توجه به نتایج بدست آمده در مرجع [۳۲] که نشان داده شد افزایش تعداد پره باعث ازدیاد میزان چرخش می‌شود، دریافت می‌شود که کمینه چرخش ایجاد شده در دو چرخاننده چهار و هشت پره متفاوت بوده و در حالت هشت پره بیشتر باشد. با مشاهده شکل ۱۸ و با مطالعه بر روی چرخش تولیدی در چرخاننده با تعداد هشت پره مشاهده می‌شود چرخاننده با طول ۶ میلی‌متر دارای میزان چرخش بیشتری نسبت به حالت مشابه در چرخاننده چهار پره می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت مقدار کمینه چرخش برای داشتن شعله V شکل و پایدار در هندسه مورد نظر در این تحقیق میزان ۱۴۰ واحد/ثانیه می‌باشد. شایان ذکر است با افزایش طول پره، اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار چرخش جریان در دو چرخاننده چهار و هشت پره به ترتیب ۳۲ درصد و ۱۹ درصد می‌باشد.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ منحنی‌های عدد بی بعد دامکوهلر برای چرخاننده چهار پره نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در دهانه خروجی کانال، دو چرخاننده با طول پره ۶ و ۸ میلی‌متر دارای عدد دامکوهلر بزرگتری نسبت به دیگر حالات می‌باشند. با توجه به تعریف عدد دامکوهلر رابطه ۴ می‌توان دریافت در حالاتی که شعله به صورت کاسه‌ای V شکل تشکیل شده است (اعداد دامکوهلر متناظرشان کوچکتر است) سرعت انتقالی بیشتری صورت گرفته است. این بدان معناست که احتمالاً جریان در شرایط تشکیل شعله V شکل (طول پره‌های ۱۲، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر) دارای میزان چرخش بیشتری باشد.

$$Da = \frac{\text{Reaction rate}}{\text{convective mass transport rate}} = \frac{\text{characteristic time}}{\text{reaction time}} \quad (4)$$

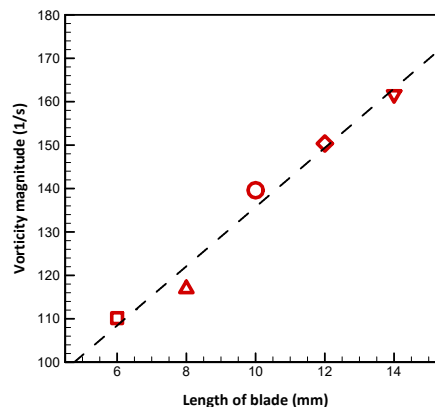
با مشاهده شکل‌های ۱۵ و ۱۶ می‌توان دید که در چرخاننده هشت پره علاوه بر تشکیل شعله در طول‌های ۶ و ۸ میلی‌متر، اعداد دامکوهلر کوچکتری نیز بدست آمده است. بر مبنای تحلیل صورت گرفته برای دامکوهلر در دهانه خروجی حالت چهار پره، پیش بینی می‌شود که در چرخاننده هشت پره میزان چرخش از حالت قبل بیشتر باشد.

۶- فهرست علائم

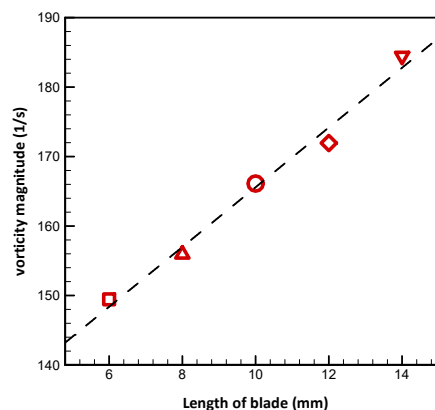
نماد	عنوان
S	عدد بی بعد چرخش
R	نسبت شعاع
r_p	شعاع کانال مرکزی (میلی متر)
r_i	شعاع چرخاننده (میلی متر)
m	نسبت دبی جرمی
α	زاویه پره چرخاننده (درجه)
A_p	مساحت کل صفحه مغشوش کننده (میلی متر مربع)
A_h	مجموع مساحت حفره های صفحه مغشوش کننده (میلی متر مربع)
N_h	تعداد حفره ها
L_b	طول پره چرخاننده (میلی متر مربع)
L_c	طول استوانه چرخاننده (میلی متر مربع)
ϕ	نسبت هم ارزی سوخت و اکسیدکننده
Da	عدد بی بعد دامکوهر

۷- منابع

- [1] Smith J. Combustion Aerodynamics and Swirling Combustion Processes. A Comprehensive Review; Journal of Energy Research. 2023. Vol. 45, pp. 217-231.
- [2] Gupta A, Lilley D, Syreed N. Influence of Rotating Speed Ratio on the Annular Turbulent Flow between Two Rotating Cylinders. Journal of Modern Physics. 2013. Vol. 170, pp. 525-799.
- [3] Syred N, Beer JM. Combustion in Swirling Flows Review. Combustion and Flame. 1974. Vol. 23, pp. 143-201.
- [4] Chigier NA. Gas dynamics of Swirling Flow in Combustion Systems. Astronautic Acta. 1972. Vol. 17, pp. 387-395.
- [5] Haworth DC, Pope SB. Combustor Design and Analysis for Swirl Stabilized Flames. Combustion Science and Technology. 1986. Vol. 47, pp. 315-347.
- [6] Janicka J, Wörner A. CFD Modeling of Turbulent Combustion in Swirl Stabilized Gas Burners. Combustion and Flame. 2001. Vol. 125, pp. 141-161.
- [7] Putnam AA. Swirl Burning. American Flame Research Committee. 1967 Jan.
- [8] Turns SR. An Introduction to Combustion; Concepts and Applications. McGraw-Hill Education. 2021. Resource Type: Book.
- [9] Hansen J. Global Climate Changes as Forecast. Goddard Institute for Space Studies. 1988. Vol. 93, pp. 9341-9364.
- [10] Jacobson MZ. Review of Solutions to Global Warming; Air Pollution and Energy Security. Energy and Environmental Science. 2009.
- [11] Horn M. Lean Combustion. technology and Control. 2019 Jul. Resource Type: Book.
- [12] Gupta AK, Lilley D. Swirl Flows and Combustion. 1984 Jan. Resource Type: Book.
- [13] Pulkrabek W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 2003. Resource Type: Book.
- [14] Cheng RK, Marble FE. Numerical study of flame stability; stabilization and noise in a swirl-stabilized combustor under choked conditions. Fluid Dynamics. 2015.
- [15] Lieuwen T, Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 2005.



شکل ۱۷- میزان چرخش جریان در چرخاننده چهار پره



شکل ۱۸- میزان چرخش جریان در چرخاننده هشت پره

۵- نتیجه گیری

در تحقیق صورت گرفته تاثیر تغییر در طول پره چرخاننده کم چرخش در یک شعله پیش مخلوط بررسی شد. بدین منظور و با استفاده از دو چرخاننده چهار پره و هشت پره، پنج اندازه طولی متفاوت برای پره ها تولید گردید. شبیه سازی میدان نیز با استفاده از نرم افزار فلونت و با حل معادلات سه بعدی ناور-استوکس و مدل آشفته گی k-ε صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که با افزایش میزان طول پره، تغییر بیشینه مقدار سرعت در دو چرخاننده چهار و هشت پره به ترتیب ۳۰ و ۲۷ درصد می باشد. همچنین از منظر رفتار شعله مشاهده شد در دو حالت چرخاننده چهار پره به دلیل نبود حداقل میزان چرخش لازم، شعله به صورت V شکل تشکیل نمی شود. نتایج نشان داد که در هندسه مورد نظر در این تحقیق کمینه مقدار چرخش برای داشتن شعله V شکل ۱۴۰ واحد/ثانیه می باشد. شایان ذکر است با افزایش طول پره، اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار چرخش جریان در دو چرخاننده چهار و هشت پره به ترتیب ۳۲ درصد و ۱۹ درصد می باشد. از دیگر نکات قابل توجه در این تحقیق آن است که با افزایش طول پره چرخاننده، شعله به مکان پایین تری منتقل می شود که اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار جابجایی در چرخاننده های چهار و هشت پره به ترتیب ۴/۷ و ۷/۸ درصد می باشد.

- [16] Ghoniem AF, Gupta AK. non-premixed turbulent combustion. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 110, pp. 665-677.
- [17] Plessing T. Measurement of the Turbulent Burning Velocity and the Structure of Premixed Flames on a Low Swirl Burner. Proc. Combustion Inst. 2000. Vol.28, pp.359-366.
- [18] Shepherd IG, Cheng RK. Premixed Flame Front Structure in Intense Turbulence. Combustion Inst. 1996. Vol. 29, pp.1833-1840.
- [19] Cheng RK. Velocity and Scalar Characteristics of Premixed Turbulent Flames Stabilized by Weak Swirl. Combustion and Flame. 1995. Vol.101, pp.1-14.
- [20] Dunn Rankin D. Lean Combustion Technology and Control. USA Elsevier, 2008. Resource Type: Book.
- [۲۱] نجوی، مظاهری، پارسافر، محمدپور. تجزیه و تحلیل تجربی اثر انسداد بر پارامترهای احتراق مشعل کم‌چرخش برای شعله‌های گاز طبیعی و هوا پیش‌آمیخته فقیر از سوخت. هجدهمین کنفرانس دینامیک سیالات، مشهد، ۱۳۹۸.
- [۲۲] فرشچی م، توحید. بررسی تجربی انتشار گازهای گلخانه‌ای کم‌چرخش پیش‌آمیخته فقیر از سوخت. مجموعه مقالات سومین کنفرانس سوخت و احتراق موسسه احتراق ایران، ۲۲ بهمن ۱۳۸۹، تهران، ایران، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۸.
- [23] Johnson MR, Littlejohn D, Nazeer WA, Rapp VH., Cheng RK. A Comparison of the Flow fields and Emissions of High-swirl Injectors and Low-swirl Injectors for Lean Premixed Gas Turbines. Proc. Combustion Inst. 2005. Vol. 30, pp.2867-2874.
- [24] Yegian DT, Cheng RK. Stability characteristics and emission levels of a laboratory hot water heater utilizing a weak-swirl burner. American Flame Research Council Fall International Symposium, Berkeley, California, USA. 1995.
- [25] Cheng RK, Yegian DT. Mechanical Swirler for a Low-NOx Weak-Swirl Burner, U.S. Patent. 1999.
- [26] Yegian DT, Cheng RK. Development of a Vane-Swirler for Use in a Low NOx Weak-Swirl Burner. American Flame Research Committee International Symposium, Baltimore. 1996.
- [27] Yegian DT, Cheng Rk. Scaling the Low Swirl Burner from 15kw to 600kw. American Japanese Flame Research Committee International symposium. 1998.
- [28] Beer JM, Chigier NA. Combustion Aerodynamics. Halsted-Wiley, New York. 1972.
- [29] Cheng RK, Yegian DT, Miyasato MM, Samuelsen GS, Benson CE, Pellizzari R, Loftus P. Scaling and Development of Low-Swirl Burners for Low-Emission Furnaces and Boilers. Proceedings of the Combustion Institute. 2000. Vol. 28, pp. 1305-1313.
- [۳۰] حشمتی، میرساجدی. بررسی تجربی تاثیر نسبت انسداد انژکتور کم‌چرخش بر حدود پایداری و رژیم‌های احتراق شعله گاز طبیعی. کنفرانس سوخت و احتراق، موسسه احتراق ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ۱۳۹۹.
- [۳۱] ناصری پور طوسی، میرساجدی. بررسی تاثیر صفحات مغشوش کننده متفاوت با نسبت انسداد یکسان در یک شعله پیش‌آمیخته کم‌چرخش. مجله علمی-پژوهشی مؤسسه احتراق ایران، اردیبهشت ۱۴۰۲.
- [۳۲] ناصری پور طوسی، میرساجدی. تاثیر افزایش تعداد پره های چرخنده کم‌چرخش بر میدان جریان و رژیم شعله در یک شعله پیش‌آمیخته فقیر از سوخت. بیست و یکمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران، بهمن ۱۳۹۲.