

بررسی تأثیر صفحات مغشوش کننده متفاوت با نسبت انسداد یکسان در یک شعله پیش آمیخته کم چرخش

فراز ناصری پور طوسی^۱، سید مهدی میرساجدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، F.nasripourtoosi@mail.sbu.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، M_mirsajedi@sbu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰)

چکیده: در این تحقیق به بررسی تأثیر تغییر در چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده جریان در یک شعله پیش مخلوط کم چرخش اشاره می‌شود. بدین منظور از یک چرخاننده چهار پره به شعاع ۷ میلی‌متر و شعاع صفحه مغشوش کننده ۴/۵ میلی‌متر استفاده شده است. با حفظ نسبت انسداد ۰/۸۸ تعداد ۹ حفره در نظر گرفته شده و پنج حالت مختلف فرض شده است. شبیه‌سازی میدان با استفاده از نرم‌افزار آنسیس-فلوئنت و با حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس و مدل آشفتگی $k-\omega$ صورت گرفته است. در این تحقیق از هوا به عنوان اکسید و متان به عنوان سوخت با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده آن است که با چینش متفاوت حفره‌ها رفتار کلی جریان تغییر خاصی نمی‌کند. در عین حال تغییرات بیشینه دما و میانگین چرخش به ترتیب کمتر از ۱ و ۳ درصد تغییر می‌کند. به همین ترتیب و در ناحیه جبهه شعله، زاویه α و زاویه β اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب برابر ۱۳، ۷ و ۱۹ درصد است. از منظر مکان جبهه شعله نیز با تغییر در فاصله چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده، شعله به میزان ۸/۸ میلی‌متر جابجا می‌شود.

کلیدواژگان: چرخاننده کم چرخش، صفحه مغشوش کننده، نسبت انسداد، شبیه‌سازی عددی، احتراق پیش‌آمیخته

مقدمه

امروزه به دلیل اهمیت یافتن بیش از پیش محیط زیست و کاهش آلاینده‌گی‌های ناشی از سامانه‌های احتراقی دانشمندان و محققان به دنبال راهی برای به حداقل رساندن آلاینده‌گی‌ها در ازای یک سیستم با راندمان بالا می‌باشند. احتراق کم‌چرخش^۱ یک فناوری بسیار امیدوار کننده در تحقق بخشیدن به این امر است. احتراق کم‌چرخش می‌تواند انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد و راندمان سیستم احتراقی را تا حد چشم‌گیری افزایش دهد. احتراق کم‌چرخش از نوع احتراق پیش‌مخلوط است که در آن سوخت و اکسید قبل از احتراق با یکدیگر مخلوط شده و سپس توسط چرخاننده کم‌چرخش وارد محفظه احتراق می‌شوند. مشعل کم‌چرخش با ایجاد یک مؤلفه‌ی مماسی بر سر جریان محوری اصلی باعث به چرخش درآوردن جریان پیش‌مخلوط سوخت و اکسید می‌شود. این امر در پایداری شعله و کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن^۲ و مونواکسید کربن^۳ تأثیر بسزایی دارد [۱-۲]. این فناوری برای انواع مختلف سوخت از جمله گاز طبیعی، هیدروژن، گازهای سنتزی و سوخت‌های زیست محیطی قابل استفاده است [۳-۶]. مشعل با کم‌چرخش همچنین می‌تواند در شرایط فشار بالا کار کند و برای کاربردهای توربین گاز مناسب است [۷]. احتراق کم‌چرخش به صورت تجربی و عددی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و کاهش قابل توجهی در انتشار آلاینده‌ها در مقایسه با فناوری‌های احتراق معمولی نشان داده است [۸-۱۱]. مفهوم مشعل‌های

¹ LSC (Low-Swirl Combustion)

² NOx Pollutant

³ CO Pollutant

کم‌چرخش^۱ به اواخر دهه ۱۹۸۰ بر می‌گردد، زمانی که محققان آزمایشگاه ملی لارنس برکلی در کالیفرنیا شروع به بررسی مزایای بالقوه شعله‌های چرخشی در سیستم‌های احتراقی کردند. 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 می‌شود. محققان فرض کردند که شعله پایدار و چرخان می‌تواند اختلاط بهتر سوخت و هوا را فراهم سازد و منجر به احتراق کامل‌تر و انتشار کمتر آلاینده‌های اکسید نیتروژن و کربن مونواکسید شود [۱۲]. در این نوع شعله‌ها، نواحی بازگردشی جریان در نزدیکی دهانه مشعل وجود ندارد، در نتیجه دمای محلی شعله کمتر و انتشار آلاینده‌های اکسید نیتروژن نیز پایین‌تر است [۱۳]. سازوکار پایداری شعله‌های کم‌چرخش به این صورت است که زمانی که 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 می‌کنند [۱۴، ۱۵]. این واگرایی باعث کاهش سرعت محوری جریان شده و سرعت شعله پیش‌مخلوط آشفته با برابر شدن با سرعت جریان باعث پایدار 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. در سال ۱۹۹۶ رابرت چنگ و همکاران 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 چرخاننده از مجموع چند المان به هم متصل تشکیل شده بود که شامل صفحه مغشوش کننده جریان و تعدادی پره راهنما برای به چرخش در آوردن جریان سوخت و اکسید می‌بود. آن‌ها این دو بخش را به نام چرخاننده کم‌چرخش نام گذاری کردند [۱۶]. آن‌ها در ادامه در سال ۱۹۹۶ مطالعه دیگری بر روی توسعه این نوع از چرخاننده‌ها انجام دادند و با بهینه سازی‌های هندسه چرخاننده نتایج به دست آمده میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن را کمتر از ۴۰ میلیون واحد گزارش دادند [۱۷]. در سال ۱۹۹۸ چنگ و یگیان مطالعه دیگر بر روی سرعت جریان‌های متفاوت و ابعاد محفظه احتراق بزرگتر انجام دادند و نتایج نشان داد که میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ کمتر از ۱۵ واحد در میلیون است و در تمامی سرعت‌های جریان میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در همین محدوده و مقیاس خواهد بود [۱۸]. این نوع از چرخاننده‌های کم‌چرخش اساساً دارای دو بخش می‌باشند، که عبارتند از پره‌های راهنما و صفحه انسداد کننده جریان، به طوری که یک سری پره با زاویه و تعداد مشخص متحدمرکز دور یک کانال مرکزی کشیده شده‌اند. وظیفه این پره‌ها چرخاندن جریان محوری سوخت و اکسید از قبل پیش‌آمیخته است، این چرخش متناسب با زاویه پره‌های چرخاننده است. کانال مرکزی از یک صفحه سوراخدار 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 می‌تواند فراهم کند [۱۹]. نسبت انسداد از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود که برای چرخاننده‌های مورد استفاده در این مطالعه برابر با مساحت کل صفحه به جز مجموع مساحت حفره‌های صفحه مغشوش کننده، به مساحت کل این صفحه است که با نماد A_p ، نشان داده شده است. در این رابطه A_h ، مجموع مساحت حفره‌های صفحه مغشوش کننده و N_h ، برابر با تعداد حفره‌ها است. r_h و r_p هم به ترتیب برابر شعاع صفحه مغشوش کننده و شعاع حفره‌ها است.

$$B = \frac{A_p - A_h}{A_p} \rightarrow B = \frac{\pi r_p^2 - N_h(\pi r_h^2)}{\pi r_p^2} \quad (1)$$

در این تحقیق از پنج چرخاننده با صفحات مغشوش کننده متفاوت و چینش‌های متفاوت در الگوی حفره‌ها استفاده شده است. نسبت انسداد هر چرخاننده ۰/۸۸ است و تعداد حفره‌ها در هر چرخاننده ۹ حفره در نظر گرفته شده است. هدف از این مطالعه نیز بررسی تأثیر تغییر در الگوی چینش این حفره‌ها است.

^۱ LSB (Low-Swirl Burner)

فیزیک مسئله

همانگونه که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود چرخاننده کم‌چرخش مطالعه شده در این شبیه‌سازی از تعداد چهار پره با زاویه ۴۰ درجه و ارتفاع ۱۴ میلی‌متر تشکیل شده است. نسبت انسداد هر کدام از چرخاننده‌ها ثابت و برابر ۰/۸۸ است. همچنین تعداد حفره‌ها N_h و شعاع آن‌ها r_h و شعاع صفحه مغشوش کننده r_p در رابطه (۱) به ترتیب ۹ حفره، ۰/۵ و ۴/۵ میلی‌متر است.

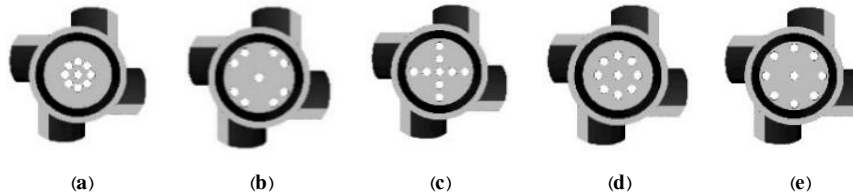


Figure 1- Holes arrangement pattern
شکل ۱- الگوی چینش حفره‌ها

فاصله در نظر گرفته شده برای حفره‌ها در چرخاننده‌های (a)، (d) و (e) به ترتیب برابر ۱/۵، ۲/۲ و ۳/۲ میلی‌متر است. قطر مشعل مطالعه شده در این بررسی برابر ۱۴ میلی‌متر است. همچنین از گاز متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسید کننده به صورت پیش‌آمیخته استفاده شده است.

مطالعه شبکه

شبکه‌بندی میدان در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار انسیس-مشینگ^۱ صورت گرفته است. با توجه به ساختار میدان جریان که شامل دو بخش پره‌ها و قسمت خالی است، از دو نوع شبکه شش و چند وجهی و به صورت بی‌سازمان استفاده شده است. در مطالعه استقلال شبکه سه نوع شبکه شامل ۷۶۳۰۸۱، ۹۸۲۸۶۵، ۹۸۲۸۶۵ و ۱۰۸۷۵۳۹ المان تولید و متغیرهای دمای کل و فشار استاتیک به ترتیب بر روی یک خط مرکزی در خروجی کانال (محل تشکیل شعله) و 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.

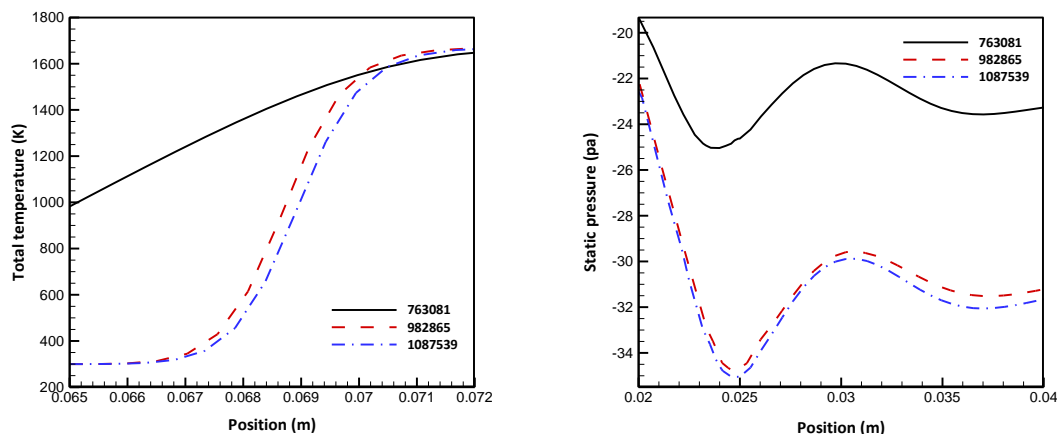


Figure 2- Mesh independence study
شکل ۲- نمودار تطبیق شبکه

¹ Ansys-meshing

روش حل

در شبیه‌سازی عددی این تحقیق از فرم سه بعدی معادلات ناویر-استوکس استفاده شده است. مدل‌های آشفتگی $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ در دینامیک سیالات محاسباتی هر دو برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی استفاده می‌شوند. مدل $k-\varepsilon$ به طور کلی برای طیف وسیعی از جریان‌ها پایدارتر بوده و هزینه محاسباتی کمتری دارد اما بیشتر برای جریان‌های با چرخش قوی‌تر مطلوب است. ولی مدل $k-\omega$ به دلیل پیچیدگی بیشتر مانند پوشش دادن جریان‌های با عدد رینولدز پایین، در نظر گرفتن شرایط نزدیک دیواره بهتر، در شبیه‌سازی جریان‌های کم‌چرخش دقیق‌تر است که متعاقباً هزینه محاسباتی بیشتری دارد. در این شبیه‌سازی از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده شده است. همچنین از گاز متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسید کننده به صورت پیش‌آمیخته استفاده شده است.

جدول ۱- تنظیمات، حلگر و مدل احتراقی مطالعه

Table 1- Solver and model parameters used for Computational study

Parameter	Schemes Used
Solver	Pressure-Based, Absolute, Steady, and 3D
Models	Energy: On Viscous Model: Standard k-omega (2 Eqn.), Low Reynolds Correction, Shear Flow Correction Species Model: Partially premixed Combustion, Non-Adiabatic

مطابق (جدول ۲) شرایط مرزی مسئله در ورودی، خروجی به ترتیب از نوع ورودی سرعت و خروجی فشار فرض شده و دیواره‌ها از نوع Stationary Wall-No Slip می‌باشند. در ادامه و در (جدول ۳) مقادیر در نظر گرفته شده برای حل جریان آورده شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی مسئله

Table 2- Boundary Conditions of Computational study

Parameter	Conditions
Inlet	Velocity-inlet: 5m/s, Supersonic/initial gauge pressure: 10000 Pa Turbulence Intensity: 25%, Hydraulic Diameter: 14mm Species Mean Mixture Fraction: 0.034
Outlet	Pressure-outlet, Backflow Progress Variable: 1
Wall	Stationary Wall-No Slip

جدول ۳- پارامترهای حل جریان

Table 3- Flow parameters

Parameter	Value
Equivalence ratio of fuel and oxidizer (ϕ)	0.65
Fuel	CH ₄
Oxidizer	79% N ₂ + 21% O ₂
Operating pressure	101325 Pa
Velocity inlet	5 m/s
Inlet temperature of fuel and oxidizer mixture	300 K

در این مطالعه از حلگر SIMPLE به منظور کوپلینگ بین فشار و سرعت استفاده شده است. همچنین راه حل مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات استفاده می‌شود که در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ۴- راه حل مورد استفاده برای مطالعه احتراق

Table 4- The Solution Schemes Used for Combustion Study

Parameter	Solution Schemes
Scheme Used	Simple
Spatial Discretization	Pressure: PRESTO! Momentum: Second-Order Upwind Turbulent Kinetic Energy: Second-Order Upwind Turbulent Dissipation Rate: Second-Order Upwind CH ₄ /O ₂ /CO ₂ /H ₂ O/Pollutant NO/ Energy: Second-Order Upwind
Solution Initialization	Hybrid Initialization

اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی بر شبیه‌سازی انجام شده، از چهار چرخاننده هشت پره با نسبت شعاع‌های متفاوت (جدول ۵-شکل ۳ و ۴) استفاده شده است. مقادیر زوایای پره‌ها، تعداد حفره و نسبت انسداد در نظر گرفته شده برای این چرخاننده‌ها به ترتیب برابر ۹۰°، ۹ حفره و ۰/۸۸ است. همچنین از تجهیزات آزمایشگاه پیشران‌شن دانشکده هوافضا دانشگاه شهید بهشتی (شکل ۵) به منظور آزمایشات تجربی بهره گرفته شده است. همانطور که در (شکل ۶) مشاهده می‌شود، نتایج عددی با دقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشات تجربی و عکس‌های گرفته شده از شعله ایجاد شده توسط چرخاننده‌های مذکور هم‌پوشانی دارد.

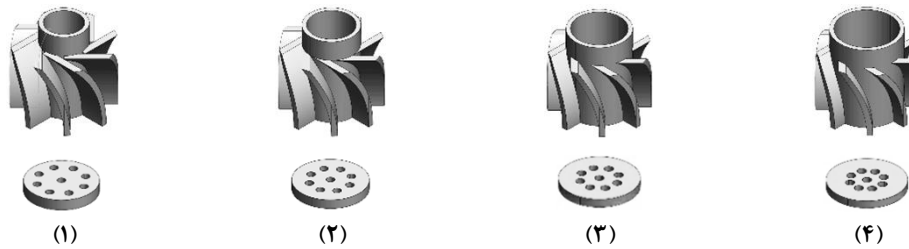


Figure 3- Experimental test swirlers
شکل ۳- چرخاننده‌های آزمایش تجربی

جدول ۵- مشخصات هندسی چرخاننده مورد بررسی در آزمایش تجربی
(واحدها به میلی‌متر است.)

Table 5- Characteristics of the swirler examined in the experimental test

swirler	r_p	Blade thickness	r_h	R
1	3.3	3.7	0.38	0.47
2	3.9	3.1	0.45	0.55
3	4.5	2.5	0.52	0.64
4	5.1	1.9	0.59	0.72

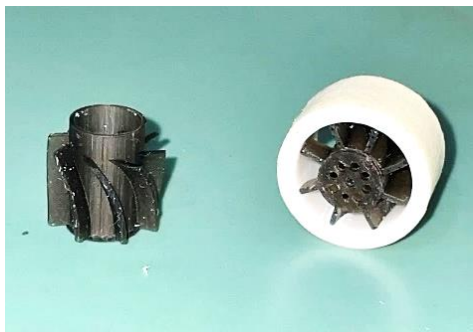


Figure 4- 3D printed swirler NO.3

شکل ۴- نمونه پرینت سه‌بعدی شده چرخاننده شماره ۳

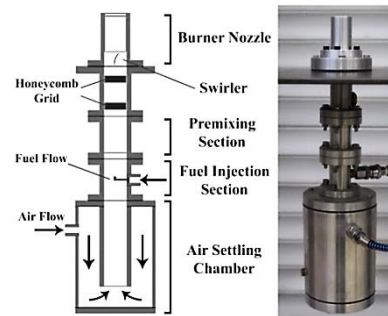


Figure 5- Low swirl burner of present study and schematic of burner main parts

شکل ۵- مشعل کم‌چرخش مورد مطالعه به همراه طرحواره اجزای اصلی آن [۲۰]

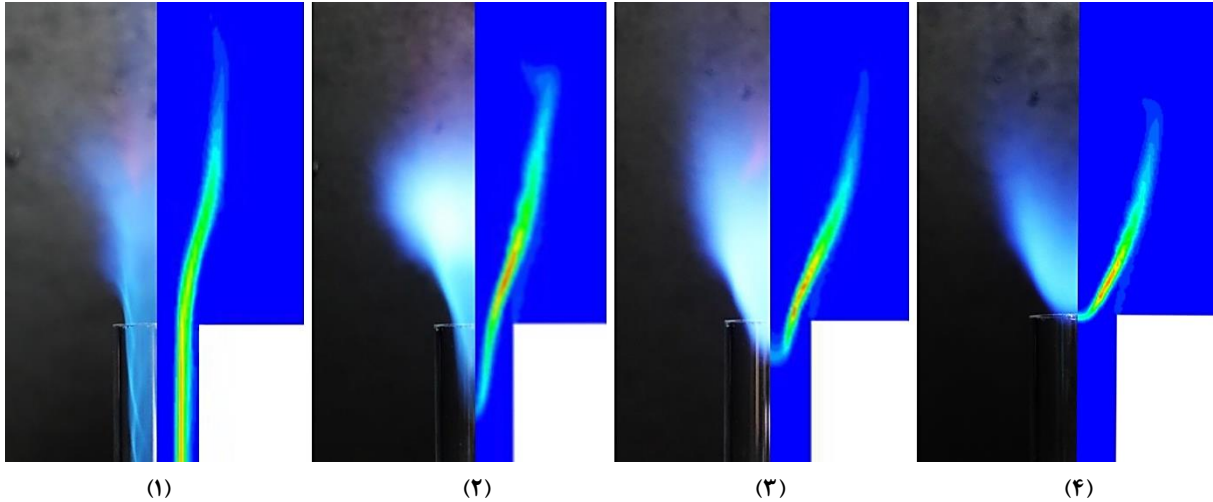


Figure 6- Comparison of numerical and experimental results
 شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی (مکان جبهه شعله) و نتایج آزمایشات تجربی

نتایج

هدف از تغییر در الگوی چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده جریان 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 جبهه شعله کم‌چرخش، دمای ناشی از احتراق فرآورده‌ها و نرخ سوزش محصولات است. همچنین تغییرات میزان آلاینده‌گی در هر حالت بررسی می‌شود. نتایج هر قسمت در دو بخش بیان می‌شود که بخش اول مربوط به تأثیرات تغییر در الگوی چینش حفره‌ها و بخش دوم مربوط به تغییر در فاصله بین حفره‌ها است.

توزیع سرعت

در (شکل ۷) چگونگی تغییرات سرعت در طول چرخاننده در حالتی که از الگوی متفاوتی در چینش حفره‌ها استفاده شود نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سرعت مرزی ۵ متر/ثانیه در ورودی کانال و در هر سه حالت اعمال شده است. در ادامه و تا قبل از ورود به صفحه مغشوش کننده به دلیل نوع چینش حفره‌ها، جریان در چرخاننده‌های (b) و (e) در مقایسه با حالت (c) دچار افت سرعت بیشتری شده است. میدان جریان پس از عبور از صفحه مغشوش کننده منبسط شده و سرعت در سه حالت ذکر شده افزایش می‌یابد. در این قسمت به دلیل تشکیل گردابه در مجاورت صفحه مغشوش کننده و درون کانال مرکزی و اثر کاهشی آن‌ها بر سرعت اصلی، سرعت کاهش یافته و با کاهش اثر گردابه‌ها افزایش می‌یابد. در حالت (c) و با تشکیل گردابه‌های ضعیف‌تر، میزان کاهش سرعت نیز کمتر می‌شود.

مشابه رفتار توصیف شده، توزیع جریان برای وضعیتی که صفحه مغشوش کننده دارای الگوی یکسان چینش حفره‌ها در شعاع‌های متفاوت است در (شکل ۸) ارائه شده است. نکته قابل توجه در این حالت آن است که با تمرکز حفره‌ها در مرکز کانال، در حالت (a) گردابه‌های ضعیف‌تری تشکیل شده و کاهش سرعت کمتر می‌شود (شکل ۹). در مقابل و در حالت (e)، تمرکز حفره‌ها بر شعاع بیرونی صفحه مغشوش کننده است و لذا با تشکیل گردابه قوی‌تر، افت سرعت بیشتری دیده می‌شود.

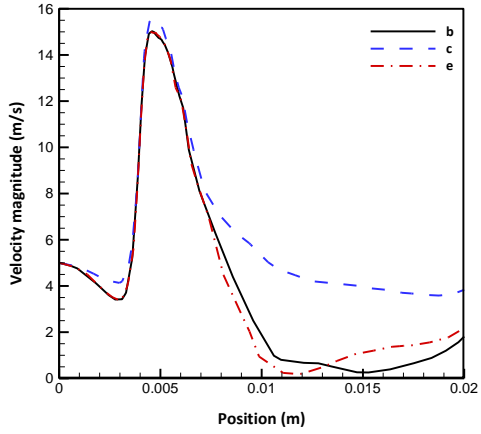


Figure 7- Velocity magnitude of swirlers in cases (b), (c) and (e)
 شکل ۷- توزیع سرعت چرخاننده‌ها در حالات (b)، (c) و (e)

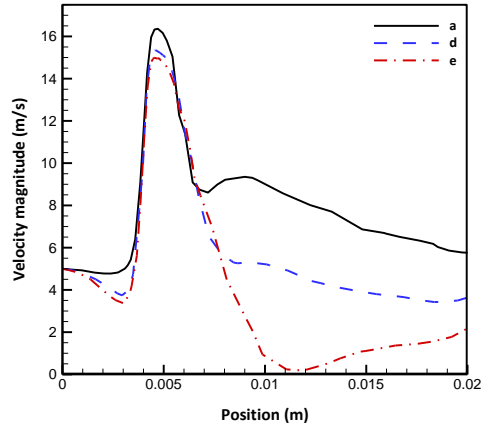
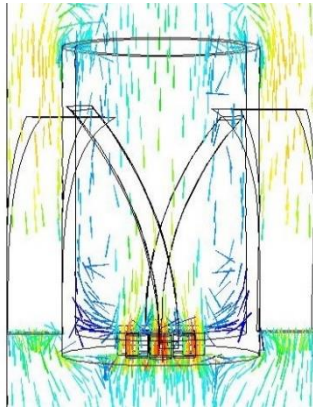
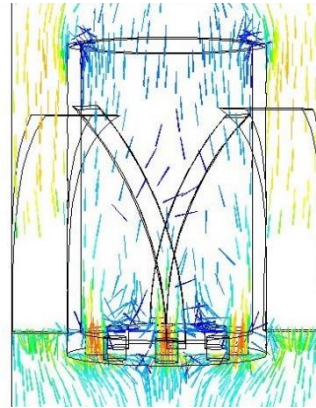


Figure 8- Velocity magnitude of swirlers in cases (a), (d) and (e)
 شکل ۸- توزیع سرعت چرخاننده‌ها در حالات (a)، (d) و (e)



(a)



(e)

Figure 9 – Velocity streamlines in two swirlers (a) and (e)
 شکل ۹- خطوط جریان سرعت در دو چرخاننده (a) و (e)

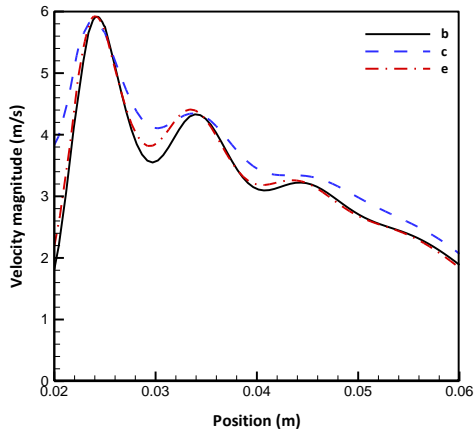


Figure 10- Velocity magnitude in cases (b), (c) and (e)
 شکل ۱۰- توزیع سرعت در حالات (b)، (c) و (e)

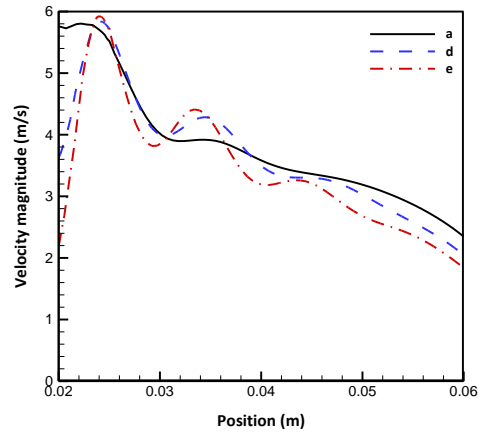


Figure 11- Velocity magnitude in cases (a), (d) and (e)
 شکل ۱۱- توزیع سرعت در حالات (a)، (d) و (e)

با گذر از هندسه چرخاننده‌ها و با توجه به حل میدان به صورت لزج انتظار می‌رود که سرعت در طول کانال اصلی کاهش یابد که به درستی در (شکل‌های ۱۱ و ۱۰) مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه آن است که بعد از چرخاننده‌ها و در هر پنج حالت، الگوی تغییر سرعت یکسان است.

میزان چرخش جریان

در (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) تغییرات چرخش در طول کانال نشان داده شده است. به دلیل مشاهده تأثیر حضور پره‌ها بر میدان جریان به ویژه در قسمت خروجی کانال (محل تشکیل جبهه شعله)، تغییرات چرخش از انتهای هندسه چرخاننده تا خروجی کانال ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر پنج حالت رفتار جریان یکسان بوده و بیشینه مقدار چرخش نیز به صورت یکسان و در مکان میانی کانال رخ داده است.

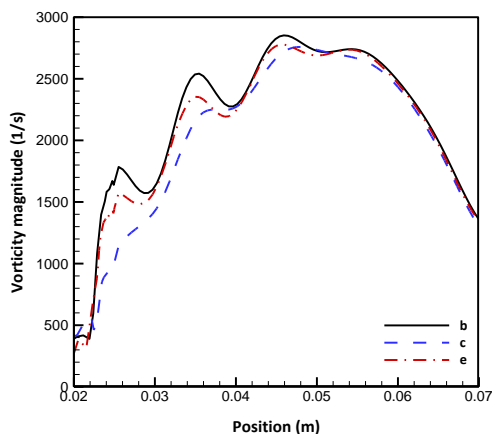


Figure 12- The amount of current vorticity in cases (b), (c) and (e)

شکل ۱۲- میزان چرخش جریان در حالات (b)، (c) و (e)

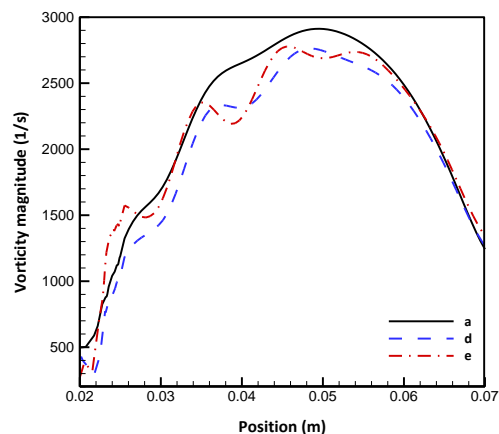


Figure 13- The amount of current vorticity in cases (a), (d) and (e)

شکل ۱۳- میزان چرخش جریان در حالات (a)، (d) و (e)

توزیع فشار

با توجه به تراکم ناپذیری جریان انتظار می‌رود که با داشتن رفتار سرعت بتوان رفتار الگوی فشار را نیز بررسی کرد. همان‌گونه که در (شکل‌های ۱۴ و ۱۵) مشاهده می‌شود، با کاهش سرعت، فشار افزایش و با افزایش سرعت، فشار نیز کاهش یافته است.

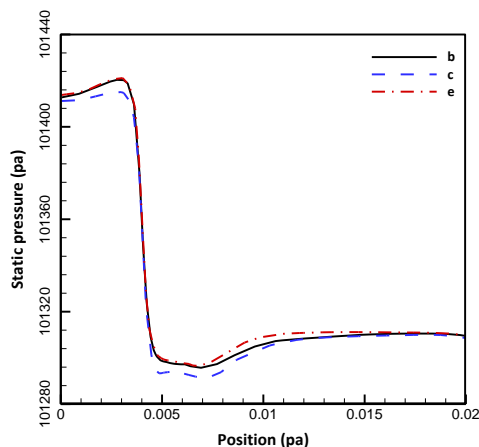


Figure 14- Pressure distribution in cases (b), (c) and (e)

شکل ۱۴- توزیع فشار در حالات (b)، (c) و (e)

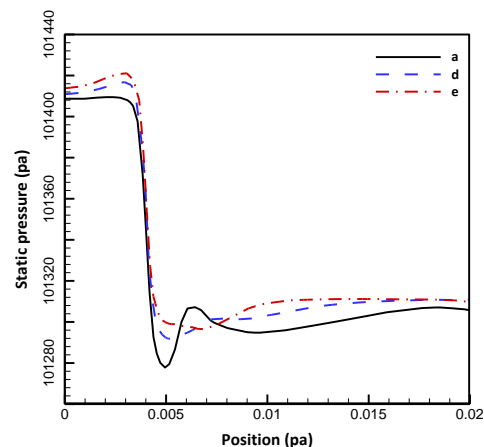


Figure 15- Pressure distribution in cases (a), (d) and (e)

شکل ۱۵- توزیع فشار در حالات (a)، (d) و (e)

توزیع دما

در (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) توزیع دما نشان داده شده است. با توجه به آن که شعله در خروجی کانال تشکیل می‌شود، توزیع دما در محدوده جبهه شعله شعله ارائه شده است. همانگونه که در (شکل ۱۶) مشاهده می‌شود، چرخاننده حالت (b) با طی کردن طول کمتری از کانال در مقایسه با دو چرخاننده دیگر (c) و (e) به دمای متناظر ۱۶۰۰ کلوین رسیده است. فواصل موقعیت مکانی شروع افزایش دما در سه حالت اخیر (b)، (c) و (e) به ترتیب برابر ۵۴/۸، ۵۸/۹ و ۵۵/۱ میلی‌متر است. همچنین موقعیت رسیدن به بیشینه دما و مقدار دمای کل در سه حالت ذکر شده به ترتیب برابر ۷۷/۳ میلی‌متر و ۱۶۷۳،۹ کلوین، ۷۳/۴ میلی‌متر و ۱۶۷۳/۷ کلوین و ۷۳ میلی‌متر و ۱۶۷۳/۸ کلوین است. در (شکل ۱۷) و در چرخاننده (a)، هنگامی که تمرکز چینش حفره‌ها در مرکز صفحه مغشوش کننده باشد، دما با طی کردن طول بیشتری از کانال به مقدار بیشینه خود می‌رسد. فواصل موقعیت مکانی شروع افزایش دما در سه حالت اخیر (a)، (d) و (e) به ترتیب برابر ۶۵/۷، ۵۸/۵ و ۵۵/۱ میلی‌متر است. همچنین موقعیت رسیدن به بیشینه دما و مقدار دمای کل در سه حالت ذکر شده به ترتیب برابر ۷۴/۴ میلی‌متر و ۱۶۷۳/۲ کلوین، ۷۴ میلی‌متر و ۱۶۷۳/۶ کلوین و ۷۳ میلی‌متر و ۱۶۷۳/۸ کلوین است. با توجه به توضیح ارائه شده در بخش سرعت به نظر می‌رسد اختلاف در مکان رسیدن به بیشینه دما، ناشی از چگونگی توزیع گردابه‌ها در کانال مرکزی و چرخش کلی در میدان است.

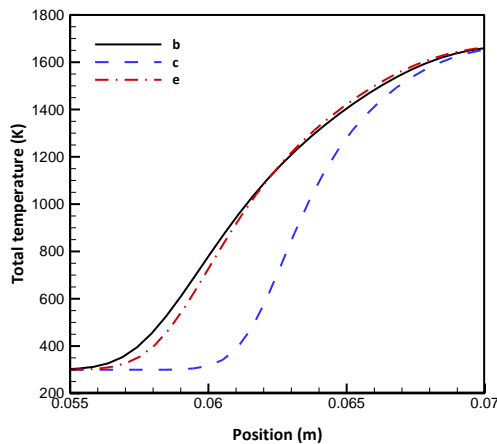


Figure 16- Temperature distribution in cases (b), (c) and (e)
شکل ۱۶- توزیع دما در حالات (b)، (c) و (e)

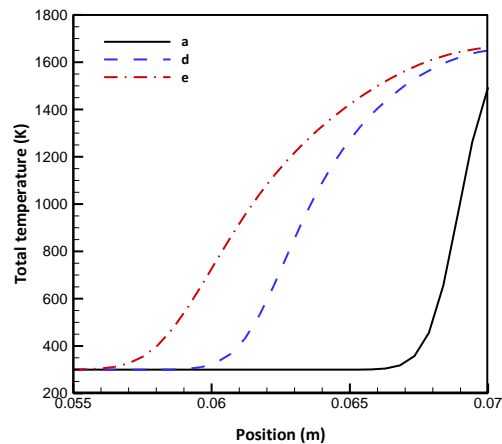


Figure 17- Temperature distribution in cases (a), (d) and (e)
شکل ۱۷- توزیع دما در حالات (a)، (d) و (e)

نرخ سوزش سوخت

بر اساس مشاهدات و تحلیل‌های صورت گرفته بر منحنی‌های توزیع دما در بخش قبل، انتظار می‌رود که شروع مصرف سوخت در چرخاننده (b) که با طی کردن طول کمتری از کانال به مقدار بیشینه دمایی خود می‌رسد، در مکان پایین‌تری نیز رخ دهد. تایید این تحلیل در (شکل ۱۸) قابل مشاهده است. اختلاف میان موقعیت شروع سوزش سوخت در (حالات (b) و (e)) ۰/۶ میلی‌متر است. مطابق (شکل ۱۹)، بر خلاف حالت قبل و براساس توزیع دما (شکل ۱۷)، چرخاننده حالت (a)، با طی کردن طول بیشتری از کانال به میزان بیشینه دمایی خود رسیده است که این بدان معنی است شروع سوزش در این حالت کندتر از دیگر حالات چینش است. همچنین اختلاف میان موقعیت شروع سوزش سوخت در (حالات (d) و (e)) نیز ۳/۱ میلی‌متر است.

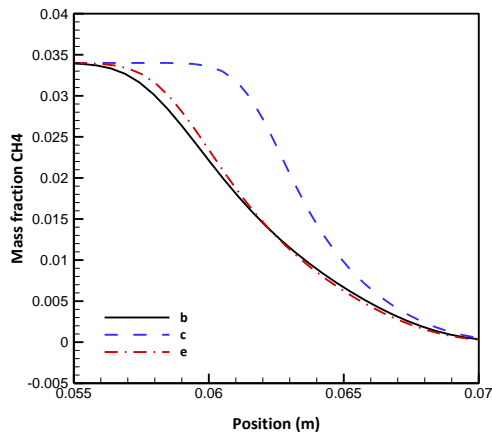


Figure 18- Mass fraction of methane in cases (b), (c) and (e)
شکل ۱۸- نرخ سوزش متان در حالات (b) ، (c) و (e)

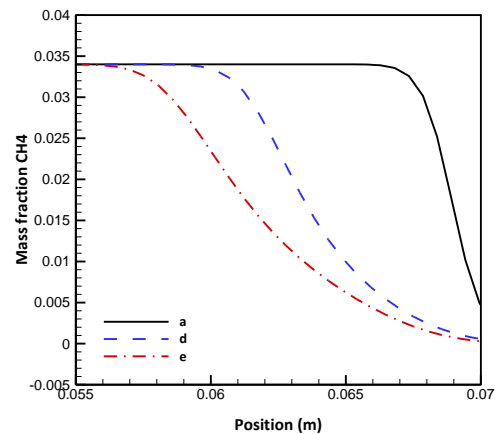


Figure 19- Mass fraction of methane in cases (a), (d) and (e)
شکل ۱۹- نرخ سوزش متان در حالات (a) ، (d) و (e)

چرخش جریان و بیشینه دمای کل

در (شکل ۲۰) میزان میانگین چرخش در کل میدان ارائه شده است. مشاهده می‌شود در چرخانده حالت (e)، این مقدار به بیشینه میزان خود رسیده است. در عین حال، در چرخانده حالت (a)، بر خلاف حالت قبل هنگامیکه تمرکز چینش حفره‌های تعبیه شده بر روی صفحه مغشوش کننده بر مرکز صفحه مغشوش کننده است، این مقدار به کمینه میزان خود رسیده است. اختلاف میزان چرخش بین این دو حالت قرارگیری حفره‌ها، ۳ درصد است.

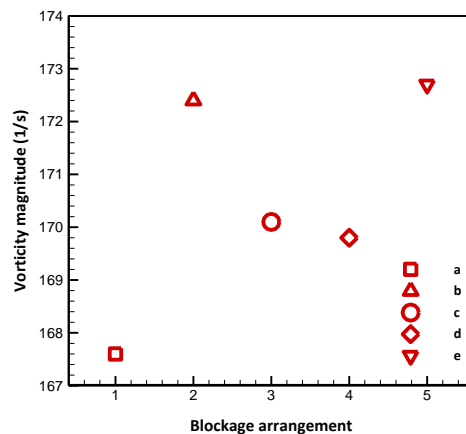


Figure 20- The average vorticity of flow in different states of arrangement of holes

شکل ۲۰- میزان میانگین چرخش جریان در حالات مختلف چینش حفره‌ها

همانطور که در (شکل ۲۱) نیز مشاهده می‌شود، بیشینه دمای کل در محیط در حالات مختلف چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده ارائه شده است. با توجه به (شکل ۲۱) بیشینه دمای کل در تمامی حالات تغییر چندانی نداشته و اختلاف میان بالاترین مقدار (حالت (b)) و کمترین مقدار (حالت (a)) کمتر از ۱ درصد است.

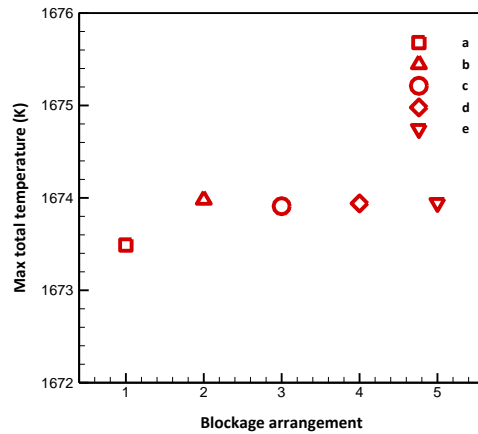


Figure 21- Maximum temperature in different cases of arrangement of holes

شکل ۲۱- بیشینه دما در حالات مختلف چینش حفره‌ها

بررسی رفتار شعله

در (شکل ۲۲) شکل کلی، مکان جبهه شعله و زاویه بازشدگی شعله ارائه شده است. بر این اساس مقادیر زاویه شعله و موقعیت جبهه شعله آن در (جدول ۳) نشان داده شده است. بر اساس (شکل ۲۰) چرخاننده حالت (a)، از منظر میزان چرخش کمینه مقدار را داراست. با این حال با توجه به (جدول ۶) مکان پایدار شدن شعله در این حالت در بالاترین مقدار از ورودی است. این بدان معنی است که تمرکز چینش حفره‌ها در مرکز صفحه مغشوش کننده باعث القای بیشتر مولفه محوری سرعت جریان شده و در نتیجه باعث پرتاب کردن شعله به موقعیت بالاتری است. در مقابل، در چرخاننده حالت (b)، هنگامی که تمرکز چینش حفره‌های تعبیه شده بر روی صفحه مغشوش کننده بر شعاع بیرونی است، مقدار چرخش به بیشینه میزان خود رسیده است و شعله نیز در پایین‌ترین حالت نسبت به سایر حالات واقع می‌شود. این بدان معنی است که با چینش حفره‌ها در شعاع بیرونی صفحه مغشوش کننده، مولفه محوری سرعت کاهش می‌یابد. با ارزیابی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که میزان اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار محل جبهه شعله، زاویه α و زاویه β ، به ترتیب برابر ۱۳، ۷ و ۱۹ درصد است.

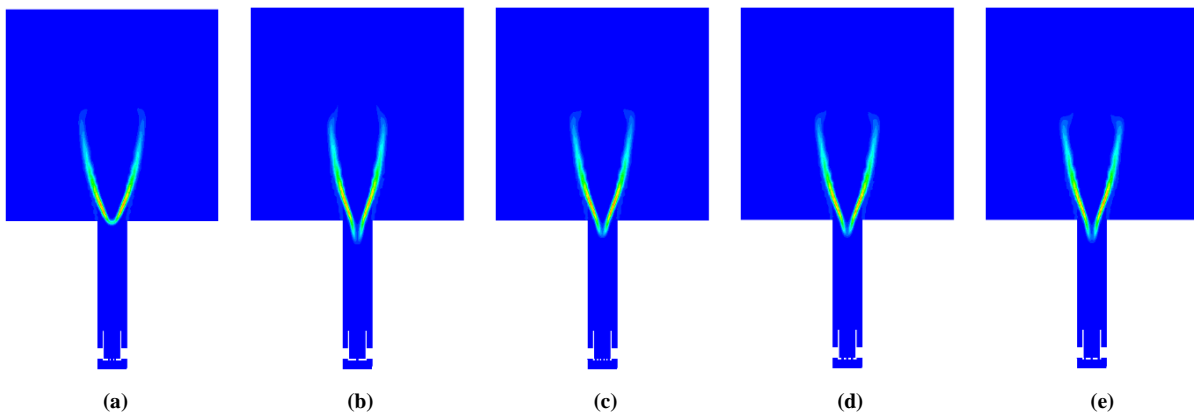


Figure 22- Rate of product's formation in cases (a), (b), (c), (d) and (e)

شکل ۲۲- جبهه شعله در حالات (a)، (b)، (c)، (d) و (e)

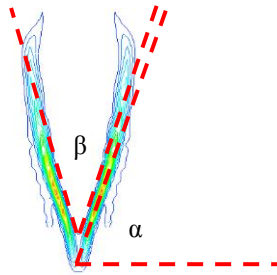


Figure 23 - Flame angle measurement criteria
 شکل ۲۳- معیار اندازه‌گیری زاویه شعله

جدول ۶- مکان جبهه شعله و زوایای آن

Table 6- Place of stability of the flame and its angle

swirler	Flame position	α	β
a	67.8 mm	66°	43°
b	59 mm	70°	36°
c	61.5 mm	69°	37°
d	61.8 mm	65°	40°
e	59.2 mm	69°	35°

میزان آلاینده‌گی

در (شکل ۲۴) بیشینه میزان تولید آلاینده‌های نیتروژن نشان داده شده است. مطابق (شکل ۲۱) با توجه به اینکه میزان بیشینه دمای کل در حالات مختلف در حدود ۱۶۷۳ کلوین است، پیش بینی می‌شود که مقدار انتشار آلاینده اکسید نیتروژن نیز در این حدود تغییر کند که می‌توان در (شکل ۲۴) مشاهده نمود. از نقطه نظر کاهش آلاینده‌گی‌های ناشی از احتراق، در حالات مختلف چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده، علی‌رغم مقدار بسیار کم آلاینده اکسید نیتروژن، میزان تغییر در بیشترین و کمترین مقدار تولید آن ۱۲ درصد است. در (شکل ۲۵) شکل کلی نرخ تغییر غلظت آلاینده (NO) در حالات مختلف ارائه شده است. با توجه به (شکل ۲۲) که به مکان جبهه شعله اشاره دارد، می‌توان بیان کرد که ارتباط بین سرعت واکنش‌های مرتبط با نیتروژن و سرعت تشکیل محصولات، تحت تأثیر تغییرات دما در سیستم شیمیایی است. به بیان دیگر دما در سرعت انتشار آلاینده‌ها نقش اساسی دارد که به نوبه خود بر سرعت کلی تشکیل محصولات تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، انرژی موجود برای برخوردهای مولکولی افزایش می‌یابد که به‌طور بالقوه مشارکت نیتروژن در واکنش‌ها را تسریع می‌کند و در نتیجه بر سرعت تولید محصولات تأثیر می‌گذارد.

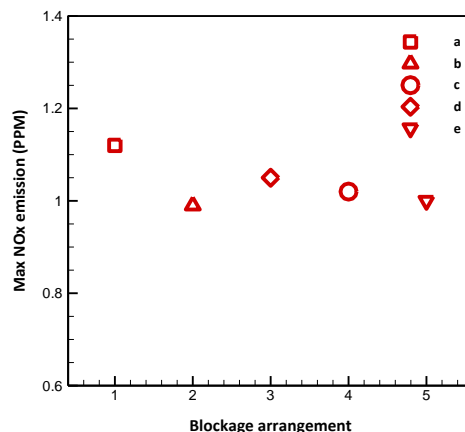


Figure 24- Maximum NO_x emission in different cases of arrangement of holes

شکل ۲۴- بیشینه میزان آلاینده‌گی در حالات مختلف چینش

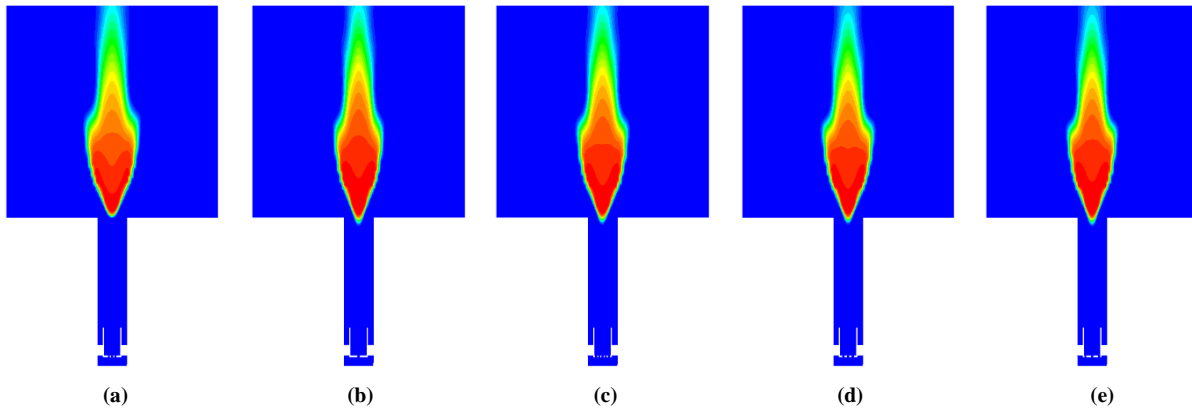


Figure 25- Rate of nitric oxide (NO) concentration in cases (a), (b), (c), (d) and (e)

شکل ۲۵- میزان غلظت (NO) در حالات (a)، (b)، (c)، (d) و (e)

نتیجه گیری

در تحقیق صورت گرفته تأثیر تغییر در چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده جریان در یک شعله پیش مخلوط کم چرخش بررسی شد. بدین منظور و با استفاده از یک چرخاننده چهار پره، پنج حالت مختلف الگوی چینش بر روی صفحه مغشوش کننده تولید شد. شبیه‌سازی میدان نیز با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و با حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس و مدل آشفستگی $k-\omega$ صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که با چینش متفاوت حفره‌ها رفتار کلی جریان تغییر خاصی نمی‌کند. در عین حال تغییرات بیشینه دما و میانگین چرخش به ترتیب برابر ۱ و ۳ درصد تغییر می‌کند. به همین ترتیب و در ناحیه جبهه شعله، زاویه α و زاویه β اختلاف در بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب برابر ۱۳، ۷ و ۱۹ درصد است. همچنین از منظر مکان جبهه شعله دیده شد که با تغییر در فاصله چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده شعله به میزان ۸/۸ میلی‌متر جابجا می‌شود. همچنین مطالعات صورت گرفته نشان داد که از نقطه نظر کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق، در حالات مختلف چینش حفره‌های صفحه مغشوش کننده، علیرغم مقدار بسیار کم آلاینده اکسید نیتروژن، میزان تغییر در بیشترین و کمترین مقدار تولید شده اکسید نیتروژن، ۱۲ درصد است.

منابع

- [1] C. R. Shaddix et al., "Low-swirl combustion for natural gas: A review," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 56, pp. 1-32, 2016.
- [2] Mathias Neumayer, 2013, Rans simulation of methane combustion in a Low Swirl Burner
- [3] Y. Li et al., "Experimental study of low swirl premixed combustion of hydrogen/air in a cylindrical furnace," Applied Thermal Engineering, vol. 126, pp. 969-975, 2017.
- [4] C. R. Shaddix and J. W. Daily, "Low-swirl burner development for hydrogen and syngas fuels," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, no. 22, pp. 9331-9343, 2009.
- [5] G. L. Switzer et al., "Low-swirl burner for biogas combustion," Renewable Energy, vol. 60, pp. 554-562, 2013.
- [6] F. Yang et al., "Development of a low-swirl burner for combustion of biogas in a gas turbine combustor," Journal of Cleaner Production, vol. 181, pp. 540-549, 2018.
- [7] J. M. Lacks et al., "Low-swirl combustion for gas turbine applications," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 123, no. 4, pp. 826-835, 2001.
- [8] R. K. Cheng et al., "Low-swirl burner for ultra-low emission commercial boilers," Applied Thermal Engineering, vol. 26, no. 11-12, pp. 1244-1252, 2006.
- [9] Y. Yan et al., "Experimental investigation of low-swirl combustion for NOx reduction in industrial burners," Fuel, vol. 259, pp. 116279, 2020.
- [10] S. S. Kim et al., "Experimental investigation of low-swirl combustion for a staged combustion system," Energy, vol. 98, pp. 225-233, 2016.
- [11] Y. Wu et al., "Numerical investigation of low-swirl combustion in a rectangular combustion chamber," Applied Thermal Engineering, vol. 144, pp. 497-506, 2018.

- [12] C. Chan, K. Lau, W. Chin, and R. Cheng., 1992, Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl, Symposium (International) on Combustion, vol. 24, pp. 511-518.
- [13] B. Bedat and R. Cheng., 1995, Experimental study of premixed flames in intense isotropic turbulence, Combustion and Flame, vol. 100, pp. 485-494.
- [14] D. Dunn-Rankin, Lean Combustion Technology and Control, USA Elsevier, USA, 2008.
- [15] Shahsavari.M., Farshchi.M., “Stability Characteristics and NOx Emissions of Low Swirl Flames” Fuel and combustion scientific-research journal, fifth year. Tehran, Iran.2011.
- [16] Cheng, R.K., and Yegian, D.T., “Mechanical Swirler for a Low-NOx Weak-Swirl Burner”, U.S. Patent 5879148,1999.
- [17] Yegian, D.T., and Cheng, R.K, Development of a vane-swirler for use in a Low-Nox weak-swirl burner. American flame research committee International Symposium, Baltimore, MD, sept.30- oct2, 1996.
- [18] Yegian, D.T. and Cheng, R.k. (1998), “Scaling the Low Swirl Burner from 15kw to 600kw” in American Japanese Flame Research Committee International symposium, 1998.
- [19] Naseripourtoosi, F., Mirsajedi SM., “Effects of increasing in number of low swirl burner blades in a fuel lean premixed flame” 21th International Conference of Iranian Aerospace Association, 21-26 February 2022, Tehran, Iran. Tehran: Shahid Beheshti University; 2022.
- [20] Heshmati, N., Mirsajedi. SM., “Experimental study of the effects of low swirl injector blockage ratio on stability limits and combustion regimes of natural gas flame” Fuel and Combustion Conference of Iranian Combustion Institute. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 2020.

Investigating the effects of different blockages with the same blocking ratio in a low-swirl combustion

Faraz Naseripour toosi¹, Mahdi Mirsajedi^{2*}

1- MSc, Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, F.naseripourtoosi@mail.sbu.ac.ir

2- Assistant Professor., Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, M_mirsajedi@sbu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2023/06/11, Received in revised form: 2023/08/09, Accepted: 2023/08/21)

In this article, an investigation is conducted into the impacts arising from variations in the configuration of apertures within a perforated plate employed in the context of low-swirl premixed combustion. To this end, a four-blade burner characterized by a radius of 7 mm is employed, along with a perforated plate possessing a radius of 4.5 mm. The blockage ratio, held at a constant value of 0.88, encompasses a set of 9 orifices, each explored across 5 distinct configurations. Computational analysis is executed utilizing the Ansys Fluent software, encompassing the resolution of the three-dimensional Navier-Stokes equations coupled with the $k-\omega$ standard turbulence model. Within this study, the role of oxidizer and fuel is played by air and methane respectively, under an equivalence ratio of 0.65. The outcomes of this investigation reveal a notable constancy in the general flow behavior despite the altered orifice arrangements. At the same time, the maximum total temperature and the average flow rotation change by 1% and 3%, respectively. In addition, in the flame formation area, the location and angles of the flame are changed by 17%, 7% and 19%. Furthermore, a downward shift of the flame by 8.8 mm is discerned consequent to modifications in the spacing between apertures within the perforated plate. Additionally, from an emissions mitigation perspective in combustion processes, it is noteworthy that there exists a discernible disparity of approximately 12% between the maximal and minimal levels of nitrogen oxide emissions generated.

Keywords: low-swirl burner, perforated plate, blockage ratio, numerical simulation, premixed combustion