

تاثیر محل قرارگیری هندسه چرخاننده کم چرخش بر میدان جریان در یک شعله پیش آمیخته

فراز ناصری پورطوسی^۱ و 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

چکیده:

پیش آمیخته یا جزئی پیش آمیخته چرخشی است. اساس کار این روش ایجاد یک مولفه ی مماسی سرعت بر سر جریان محوری اصلی است. در سیستم های احتراقی نظیر موتور های جت و بسیاری از این قبیل سامانه ها جریان محوری اصلی بر اثر یک مولفه ی مماسی دچار چرخش شده که این امر باعث ایجاد گرادیان فشار منفی و در نتیجه باعث القای یک جریان داخلی چرخشی می شود. چرخش جریان در روند احتراق تاثیر چشم گیری بر حدود خاموشی، پایداری شعله و اشتعال پذیری سوخت دارد. همچنین در احتراق پیش آمیخته و جزئی پیش آمیخته به دلیل اختلاط بهتر سوخت و اکسید اثر مثبتی بر کاهش آلاینده های احتراق و کم کردن اکسید های نیتروژن گذاشته می شود. در چرخاننده های چرخشی جریان اصلی توسط هندسه منحصر بفرد پره های تعبیه شده درون چرخاننده به چرخش در آمده و در بیرون نازل احتراق صورت می پذیرد. در این نوع از چرخاننده ها با جریان چرخشی، شعله عموماً دارای دو نوع شعله V شکل و شعله M شکل می باشد. تقسیم بندی این دو نوع شعله به این شکل است که اگر شعله تشکیل شده تنها دارای ناحیه بازگردشی داخلی باشد شکل شعله به صورت V در آمده و اگر شعله علاوه بر ناحیه بازگردشی داخلی دارای ناحیه بازگردشی خارجی نیز باشد شکل شعله به صورت M در می آید. یکی از روش های دارای اهمیت در علم احتراق، بهره گرفتن از جریان پیش آمیخته سوخت و اکسید می باشد. در این نوع احتراق سوخت و اکسید قبل از ناحیه احتراق با یکدیگر تماماً در سطوح مولکولی آمیخته و مخلوطی همگن به وجود می آید. به دلیل یکنواختی و قابلیت تغییر نسبت هم ارزی های سوخت به اکسید، احتراق در شرایط مناسب تری انجام شده و در ادامه می توان بر روی مسائلی نظیر حدود خاموشی، برگشت و فلش بک و پایداری شعله کنترل بهتری داشت. در سال ۱۹۹۲ هنگامی که برای نخستین بار رابرت چنگ و همکاران [۱] بر روی پایدار سازی شعله های پیش آمیخته مطالعه می کردند، چرخاننده با هندسه متفاوتی را طراحی کردند که در این چرخاننده خاص یک جریان چرخشی ضعیف بر سر راه جریان محوری اصلی وارد می گردید و باعث می شد شعله در بالای چرخاننده به صورت معلق پایدار بماند. این چرخاننده دارای یک جریان پیش آمیخته 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 می گردید. چنگ و همکاران مشاهده

در این مطالعه به بررسی تاثیر فاصله پره چرخاننده از ورودی تا مرز خروجی بر نحوه تشکیل شعله کم چرخش پرداخته می شود. قطر مشعل مورد استفاده در این تحقیق ۱۴ میلی متر و از چهار پره با زاویه ۴۰ درجه به عنوان چرخاننده استفاده شده است که فاصله های در نظر گرفته شده برای آنها از مرز ورودی برابر با ۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی متر می باشد. شبیه سازی میدان جریان با استفاده از نرم افزار فلوئنت و بر اساس معادلات ناویر استوکس و به صورت سه بعدی انجام شده و با استفاده از روش k-ε، آشفتنگی میدان مدل شده است. همچنین از متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که فاصله قرارگیری هندسه چرخاننده تاثیر بسزایی بر روی سرعت گردابه ای، سرعت چرخشی هندسی، شکل و مکان قرارگیری شعله دارد. همچنین پایین بودن میزان آلاینده های اکسید نیتروژن که از ویژگی های مشعل های کم چرخش است اثبات گردید. نشان داده می شود که بهترین محل قرارگیری هندسه چرخاننده بالاترین حالت از مرز ورودی است زیرا جریان با افت فشار نسبی کمتر و سرعت چرخشی بیشتری وارد محیط می شود.

کلمات کلیدی: چرخاننده کم چرخش - شبیه سازی عددی - شعله ی V شکل - احتراق پیش آمیخته

۱- مقدمه:

امروزه به دلیل اهمیت یافتن بیش از پیش محیط زیست و کاهش آلودگی های ناشی از احتراق، محققین و دانشمندان همواره دنبال راهی برای به حداقل رساندن آلاینده های احتراقی نظیر مشعل های صنعتی، بویلر ها و توربین های گازی هستند. برای تحقق بخشیدن به این امر روش هایی ابداع و کشف شده اند اما به دلیل کاهش راندمان سیستم احتراقی در دستور کار قرار داده نشده اند و یا به صورت جدی در کاربرد های صنعتی از آن ها استفاده نگردیده است. از همین رو کاهش آلاینده ها در قبال یک سیستم احتراقی با یک راندمان و بازده مناسب بسیار مهم می باشد. یکی از این روش های کاربردی استفاده از جریان های احتراقی

$$S = \frac{\int_0^R UWr^2 dr}{R \int_0^R U^2 r dr} \quad (1)$$

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 پارامتر های هندسی چرخاننده محاسبه شده و به صورت زیر است.

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

در رابطه (۲)، R برابر با نسبت شعاع کانال مرکزی چرخاننده r_c به شعاع چرخاننده r_i و α زاویه پره های چرخاننده و m نسبت دبی جرمی گذرنده از بخش چرخشی به بخش غیر چرخشی یا محوری چرخاننده است. عدد چرخش هندسی همواره تابعی از پارامتر های 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 پارامتر ها سبب تغییر در عدد چرخش و مشخصات عملکردی شعله می شود. نسبت انسداد صفحه مغشوش کننده B 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 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.

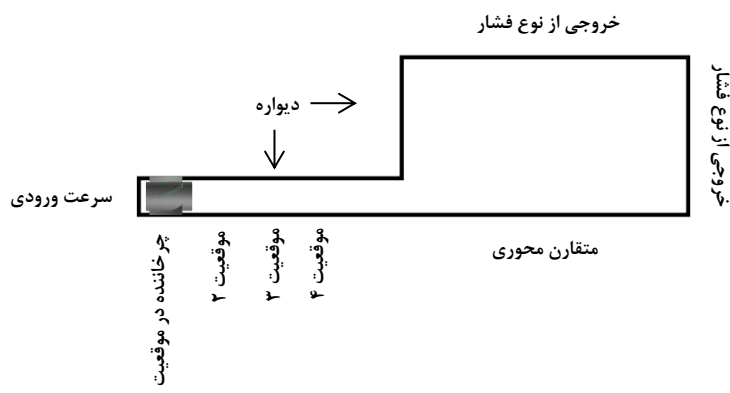
$$B = \frac{A_p - A_h}{A_p} \quad (3)$$

$$B = \frac{\pi r_p^2 - N_h (\pi r_h^2)}{\pi r_p^2}$$

کردند شعله در این نوع از چرخاننده ها شعله در بالای مشعل پایدار مانده و به دلیل عدم اتصال و جدایی شعله با دهانه خروجی نازل، بدنه مشعل دائماً سرد باقی می ماند.

در سال ۱۹۹۵ رابرت چنگ و یگیان [۲] مطالعه ای بر روی مشخصه های پایداری و سطح آلایندهی این چرخاننده انجام داده و دریافتند حداقل و حداکثر چرخش مورد نیاز که شعله در آن پایدار است، مستقل از محفظه احتراق و میزان دبی ورودی می باشد. آن ها در این مطالعه دریافتند نسبت هم ارزی مناسب این مشعل ۰.۸ است که یک مخلوط رقیق شده با هوای اضافی می باشد و چرخاننده در این نسبت هم ارزی برای احتراق کمترین میزان آلایندهی اکسید های نیتروژن را در حدود کمتر از ۲۵ واحد در میلیون دارا می باشد.

در سال ۱۹۹۶ رابرت چنگ و همکاران [۳] بار دیگر یک هندسه چرخاننده متفاوتی را معرفی کردند که در مسیر اصلی جریان محوری سوخت و اکسید قرار می گرفت و میدان جریانی مشابه به میدان جریان ایجاد شده توسط جت های مماسی که در سال ۱۹۹۲ اختراع شده بود را همراه داشت. این 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 [۴] مطالعه دیگری بر روی توسعه این نوع از چرخاننده ها انجام دادند و با بهینه سازی های هندسه چرخاننده نتایج به دست آمده میزان آلایندهی های اکسید های نیتروژن را کمتر از ۴۰ میلیون واحد گزارش داد. در سال ۱۹۹۸ [۵] چنگ و یگیان مطالعه دیگر بر روی سرعت جریان های متفاوت و ابعاد محفظه احتراق بزرگ تر انجام دادند و نتایج نشان داد که میزان تولید اکسید های نیتروژن در نسبت های هم ارزی ۰.۸ کمتر از ۱۵ واحد در میلیون می باشد و در تمامی سرعت های جریان میزان تولید اکسید های 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 [۶] بیان شد.



شکل ۲- شرایط مرزی مسئله

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شرایط مرزی مسئله در ورودی، خروجی و دیواره چرخاننده به ترتیب از نوع velocity inlet و pressure outlet و wall می باشد.

در جدول ۱ مقادیر در نظر گرفته شده برای حل جریان در نرم افزار انسیس فلونت آورده شده است. لازم به ذکر است که گاز متان به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسید کننده به صورت پیش آمیخته در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- پارامترهای حل جریان

Parameter	Value	Symbol
Fuel	100%	CH4
Oxidizer	(79% N2 + 21% O2)	Air
Operating pressure	101325	Pa
Inlet Velocity	5	m/s
Inlet temperature of fuel-air mixture	300	K

۳- مطالعه شبکه و روش حل:

برای شبکه بندی میدان از دو برنامه انسیس مشینگ و گمبیت استفاده شده است که این شبکه دارای دو نوع سازمان یافته و بی سازمان می باشد. شبکه بی سازمان مربوط به پره و هندسه چرخاننده است. در شبکه سازمان یافته از المان های شیش وجهی و در شبکه هندسه چرخاننده از المان های سه وجهی استفاده شده است. برای مطالعه شبکه^۴، از سه نوع شبکه با تعداد مختلف بهره گرفته شد. مشاهده شد مقادیر سرعت در دو شبکه درشت و شبکه ریز یکسان می باشد. به همین دلیل برای کاهش

حدود پایداری شعله توسط کمترین و بیشترین نسبت هم ارزی، که در آن احتراق به صورت پایدار امکان پذیر است محدود می شود. کمترین نسبت هم ارزی شعله پایدار حد خاموشی و بیشترین نسبت هم ارزی شعله پایدار حد برگشت شعله می باشد. در نتیجه حدود پایداری و رفتار شعله در رژیم های احتراقی متفاوت، تحت الشعاع نسبت های هم ارزی در نظر گرفته شده، است. نسبت هم ارزی به صورت نسبت سوخت به هوای واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری تعریف می شود.

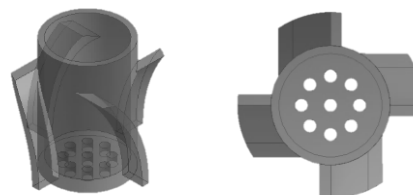
$$\phi = \frac{\left(\frac{m_{fuel}}{m_{air}}\right)_{actual}}{\left(\frac{m_{fuel}}{m_{air}}\right)_{stoichiometric}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، m_{fuel} جرم سوخت و m_{air} جرم هواست. اگر ϕ بیشتر از ۱ باشد، مخلوط سوخت و هوا اصطلاحاً مخلوط غنی از سوخت^۱ نامیده می شود و اگر ϕ کوچکتر از یک باشد، مخلوط فقیر از سوخت^۲ نام دارد و در نسبت های خیلی زیر ۱ شعله به سمت خاموشی می رود. با تغییر سرعت های ورودی سوخت و هوا پارامترهای دیگری به نام سرعت توده جریان نیز تغییر می کند که به صورت رابطه زیر تعریف می شود. در رابطه (۵)، A مساحت مقطع عبوری جریان است.

$$U_{bulk} = \frac{\left(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}\right)}{A} \quad (۵)$$

۲- فیزیک مسئله:

چرخاننده کم چرخش مطالعه شده در این شبیه سازی از تعداد ۴ پره به زاویه ۴۰ درجه و ارتفاع ۱۳ میلی متر تشکیل شده است (شکل ۱) قطر داخلی و خارجی چرخاننده به ترتیب ۳.۹ و ۴.۵ میلی متر می باشد. همچنین صفحه مغشوش کننده دارای تعداد ۹ حفره به شعاع ۰.۵ و ضخامت صفحه ۱ میلی متر می باشد. نسبت انسداد بر اساس اندازه های در نظر گرفته شده و رابطه (۳) برابر ۰.۸۸ می باشد. این چرخاننده در یک استوانه به شعاع ۷ و فاصله درنگ^۳ به طول ۷۰ میلی متر قرار داده شده است.



شکل ۱- چرخاننده کم چرخش

^۱ Fuel Rich

^۲ Fuel Lean

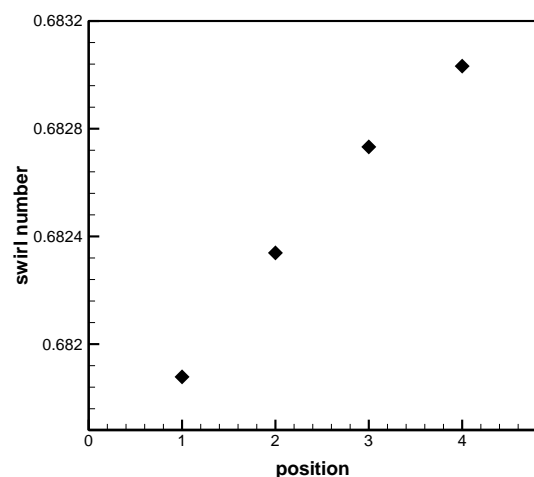
^۳ Recess Length

^۴ Grid Study

شکل (۴) یک جدول سه بعدی منقطع می باشد که نمایانگر مقادیر کسر مخلوط و دمای متناظر با آن می باشد. در این بررسی بیشینه و کمینه دمای میانگین کسر مخلوط به ترتیب ۲۲۴۰ و ۳۰۰ کلوین می باشد که متناظر با کسر مخلوط میانگین به ترتیب ۰.۰۵۶ و ۱ می باشد.

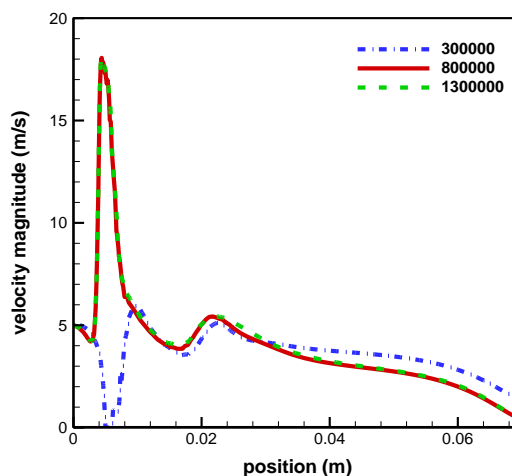
۴- نتایج:

هدف از تغییر موقعیت مکانی چرخاننده در طول های به ترتیب ۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی متری از ورودی، بررسی رفتار شعله، محاسبه سرعت چرخشی، افت فشار و قدرت گردابه‌ی تشکیل شده همچنین بررسی اثرات آلاینده های احتراق می‌باشد. اساساً جریان چرخشی به دو دسته کلی کم چرخش و پر چرخش تقسیم می‌شود. از عدد چرخش صفر تا ۰.۶ جریان از نوع کم چرخش و حدوداً بالای ۰.۶ پر چرخش در نظر گرفته می‌شود [۷]. میانگین سرعت چرخش هندسی در این بررسی برابر ۰.۶ می باشد که با توجه به محدوده در نظر گرفته شده جزء جریان‌های کم چرخش محسوب می‌شود. از نکات قابل توجه در این بررسی آن است که در محاسبه عدد چرخش هندسی و بر مبنای رابطه (۲)، با ثابت بودن هندسه چرخاننده، عدد چرخش ثابت می‌ماند. این در حالیست که بر اساس شکل (۵) و با تغییر فقط موقعیت قرار گیری چرخاننده، اعداد چرخش متفاوتی به دست آمده است. این تغییر در عدد چرخش را می توان ناشی از تغییرات دبی گذرنده از هندسه چرخاننده ها دانست. زیرا سرعت در کانال متغیر بوده و این تغییر سرعت باعث تغییر در دبی و در ادامه سرعت چرخشی می شود.



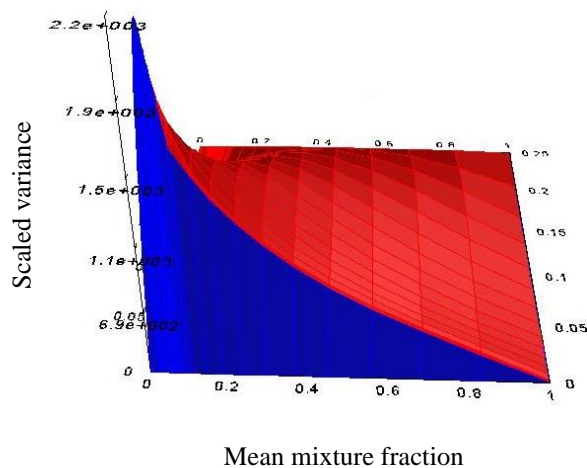
شکل ۵- عدد چرخش هندسی

خطا و کاهش هزینه محاسباتی از شبکه درشت استفاده شد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، شبکه خیلی درشت در ناحیه ایی که هندسه چرخاننده تعبیه شده است، نشان دهنده افت سرعت می باشد که این تعبیر درستی نیست و به همین دلیل شبکه از دقت خوبی برخوردار نمی باشد.



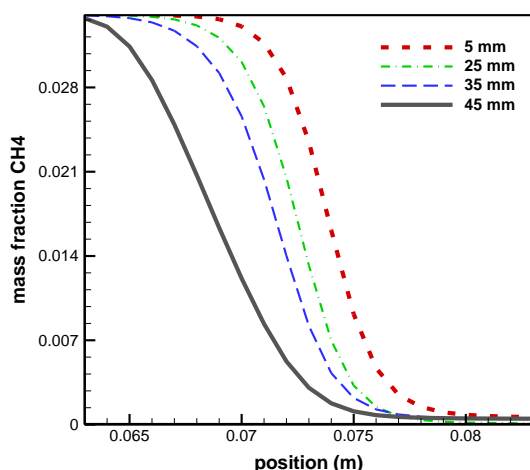
شکل ۳- نمودار تطبیق شبکه

شبیه سازی عددی این تحقیق با استفاده از معادلات ناویر- استوکس در حالت سه بعدی صورت گرفته، مدل سازی آشفته‌گی از روش k-ε و مدل سازی احتراق نیز به روش پیش آمیخته جزئی انجام گرفته است. شایان ذکر است که شبیه سازی صورت گرفته با استفاده از یک رایانه با مشخصات پردازنده و رم به ترتیب core i7 10700k و 16g انجام گرفته و متوسط زمان اجرای هر حالت تقریباً هفت ساعت می باشد.



شکل ۴- نمایش منحنی PDF

محل تشکیل شعله در چهار حالت اخیر را می توان با مطالعه کسر جرمی متان نیز بررسی نمود. در این حالت و بر اساس شکل (۷)، شعله در بالاترین محل قرارگیری چرخاننده، در مکان پایین تری تشکیل می شود. در این حالت، نرخ مصرف متان از سایر حالات کمتر است.



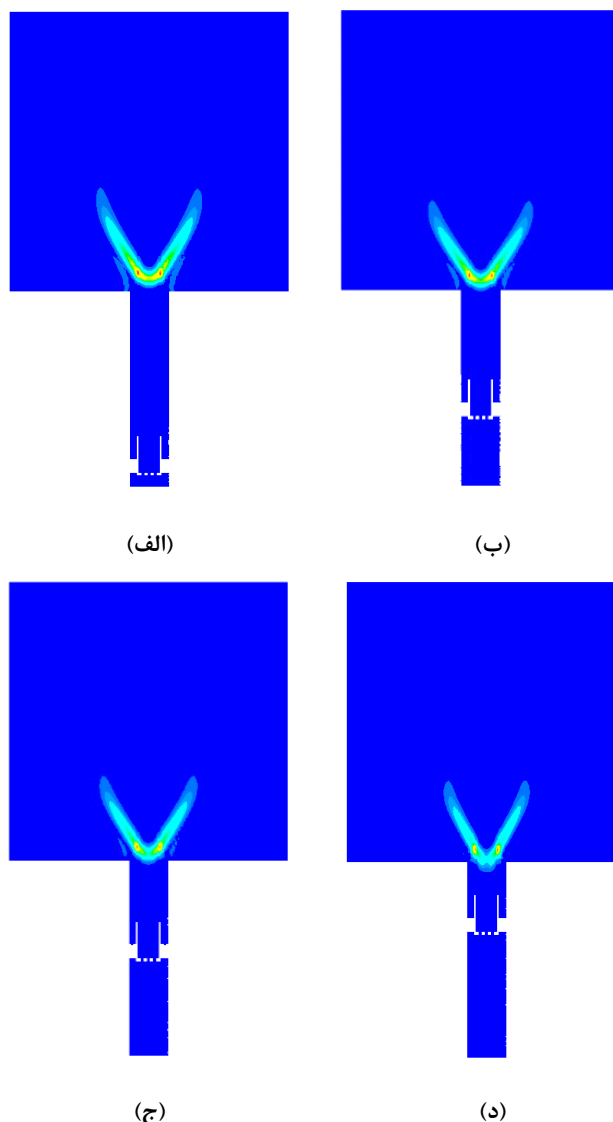
شکل ۷- کسر جرمی متان

داده های مربوط به کانتورهای شکل (۶) در جدول (۲) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود شعله در موقعیت اول قرارگیری چرخاننده در دهانه خروجی کانال تشکیل شده و با افزایش فاصله آنها از ورودی کانال، شعله به صورت پایدار و تا میزان ۴ میلی متر به درون کانال نفوذ کرده است که نشان دهنده تاثیر کاهش ابعاد کانال در مقایسه با تحقیقات چنگ می باشد. همچنین مقادیر زوایای داخلی و بیرونی شعله با دقت مناسبی نیز اندازه گیری شده است.

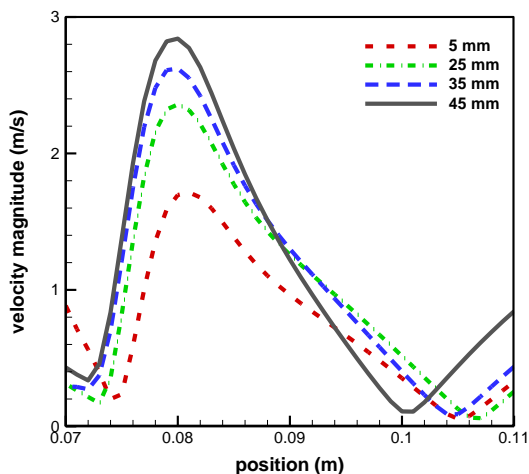
جدول ۲- مقایسه نتایج به دست آمده از تغییر مکان چرخاننده

موقعیت چرخاننده	فاصله قرارگیری از ورودی کانال (میلی متر)	زاویه داخلی شعله (درجه)	زاویه بیرونی شعله (درجه)	اندازه فاصله مکانی پایدار شدن شعله از ورودی (میلی متر)
۱	۵	$60^{\circ} \pm 0.5$	$65^{\circ} \pm 0.5$	۷۰
۲	۲۵	$67^{\circ} \pm 0.5$	$65^{\circ} \pm 0.5$	۶۸
۳	۳۵	$63^{\circ} \pm 0.5$	$63^{\circ} \pm 0.5$	۶۷
۴	۴۵	$54^{\circ} \pm 0.5$	$52^{\circ} \pm 0.5$	۶۶

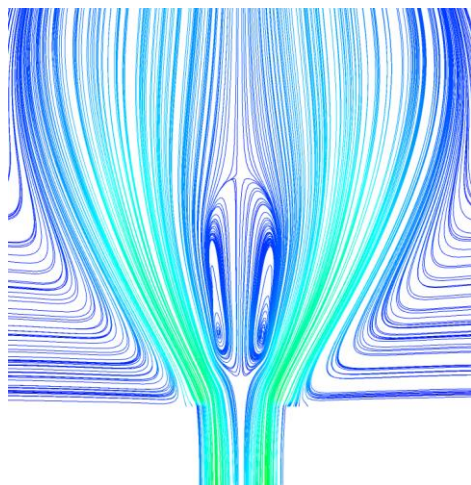
همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می شود با بالا رفتن چرخاننده، شعله به پایین کشیده شده و نواحی بازگشتی کم می شود. این بدان معنی است که ثابت نگه داشتن شعله و پایداری آن جدا از رابطه شعله با نسبت های هم آرزوی سوخت و اکسید، رابطه مهمی با میزان فاصله چرخاننده از ورودی تا دهانه خروجی دارد. شایان ذکر است، بر خلاف مطالعات چنگ و همکاران [۸] که بر روی کانال با قطر بزرگ تر صورت گرفته و تشکیل شعله درون مجرای کانال به صورت ناپایا می باشد، در این حالت و بر اساس شکل (۶) بخش (د)، شعله در اثر کشیده شدن به داخل کانال همچنان پایدار باقی می ماند که این مساله از ویژگی های مهم کوچک شدن ابعاد کانال می باشد.



شکل ۶- نرخ تشکیل محصولات در حالات مختلف چرخاننده



(الف)



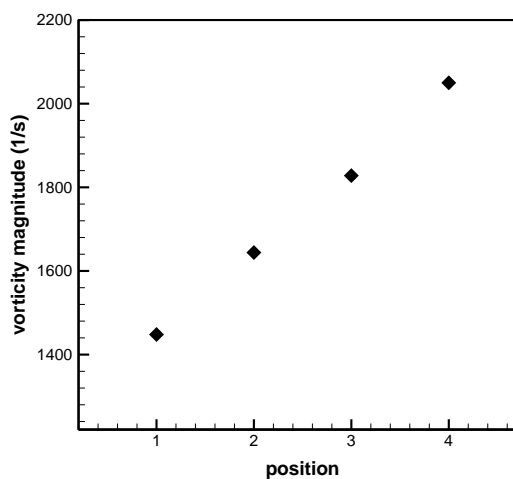
(ب)

شکل ۹- الف: میزان اندازه گیری شده سرعت بر روی یک خط مرکزی در میدان در حالات مختلف موقعیت چرخاننده ب: خطوط جریان سرعت

همچنین مطالعات صورت گرفته نشان داد که از نظر کاهش آلاینده های ناشی از احتراق، در حالت های مختلف قرارگیری چرخاننده، میانگین مقدار بیشینه آلاینده NO، ۱.۷ ppm گزارش گردید که نشان دهنده میزان پایین انتشار آلاینده های ناکس در احتراق کم چرخش می باشد.

از نظر افت فشار نسبی، دامنه تغییرات محسوسی مشاهده نگردید. میانگین این تغییر در چهار حالت فوق در حدود یک درصد است. لذا چنین به نظر می رسد که موقعیت چرخاننده، پارامتر تاثیرگذاری بر افت فشار ناشی از صفحه مغشوش کننده جریان و هندسه پره ها نمی باشد. با این حال در چرخاننده نزدیک تر به محیط، میزان درصد افت فشار نسبی و افت فشار کل در مقایسه با سایر چرخاننده ها کمتر است.

از دیگر نتایج به دست آمده، میزان چرخش جریان^۵ درون کانال است. همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می شود با بالا رفتن چرخاننده ها درون کانال، میزان بیشینه چرخش در خروجی نیز افزایش می یابد.



شکل ۸- میزان قدرت گردابه در خروجی و در حالات مختلف چرخاننده

با توجه به فیزیک میدان جریان و مطالعات پیشین، انتظار می رود که یک جریان گردابه ای درون شعله ۷ شکل تشکیل شود. این گردابه برای حالت اول چرخاننده ها در شکل (۹. الف) مشاهده می شود. با مطالعه سایر گردابه های تشکیل شده در سه چرخاننده دیگر و بر اساس شکل (۹. ب) مشخص گردید که با بالا رفتن چرخاننده در طول کانال، طول گردابه کاهش و شیب تغییرات سرعت که نشان دهنده قدرت آن است، افزایش یافته است.

⁵ Vorticity magnitude

۵- نتیجه گیری:

نتایج نشان داد که مکان قرار گیری چرخاننده تاثیر بسزایی در موقعیت و زاویه تشکیل شعله دارد. همچنین به اثرات تغییر موقعیت مکانی چرخاننده بر پارامتر های مرتبط با جریان های چرخشی اعم از سرعت چرخش هندسی و میزان قدرت گردابه تولید شده اشاره شد. شایان ذکر است که تغییر مکانی چرخاننده تاثیر محسوسی بر افت فشار ندارد. با این حال در چرخاننده نزدیک تر به محیط درصد افت فشار نسبی و فشار کل نسبت به دیگر چرخاننده ها مقداری جزئی کمتر می باشد. در این بررسی نشان داده شد در چرخاننده با موقعیت مکانی بالاتر، سرعت چرخشی نسبت به دیگر حالات بیشتر است. از همین رو مناسب ترین مکان قرارگیری چرخاننده از نظر ایجاد سرعت چرخشی بیشتر همراه با افت فشار کمتر، نزدیک ترین فاصله به محیط می باشد. از دیگر مشاهدات به دست آمده تاثیر بر روی نواحی بازگشتی جریان می باشد. مطالعات نشان داد هر چقدر فاصله چرخاننده از ورودی بیشتر شود، نواحی بازگشتی جریان کمتر می شود و می توان با تغییر موقعیت قرارگیری چرخاننده کنترل بهتری بر روی حد خاموشی، برگشت شعله به داخل کانال و پایداری شعله داشت. این پدیده در حد خاموشی شعله و برگشت آن بسیار تاثیر گذار است.

۶- مراجع:

- [1] Chan, C.K., K.S. Lau, W.K. Chin, and R.K. Cheng, "Freely Propagating Open Premixed Turbulent Flames Stabilized by Swirl", *proc. Comb. Inst.*, 1992.24: p.511-518
- [2] Yegian+, D.T., and Cheng, R.K., "Stability Characteristics and Emission Levels of a Laboratory Hot Water Heater Utilizing a Weak-Swirl Burner", Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, Oct, 1995
- [3] Cheng, R.K., and Yegian, D.T., "Mechanical Swirler for a Low-NOx Weak-Swirl Burner", U.S. Patent 5879148, 1999.
- [4] 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- Oct.2, 1996.
- [5] 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
- [6] Beer, J.M., and N.A. Chigier. 1972. *Combustion Aerodynamics*. London: Krieger Pub Co.
- [7] Yinli Xiao, Zhibo Cao and Changwu Wang, "Flame stability limits of premixed low-swirl combustion" 2018, Vol. 10(9).
- [8] R.K. Cheng, D.T. Yegian, "Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers" 2007.