

شبیه سازی سه بعدی جریان در مشعل چرخشی

حمید م مهدی هروی^۱، محسن بیدخوری^۲، نیک سایرد^۳

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
heravim@mshdiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله شبیه سازی سه بعدی جریان های چرخشی در دو هندسه متفاوت مشعل چرخشی صورت گرفته است. فرآیند تشکیل و پیشروی هسته گردابی که در این مشعل ها رخ می دهد به کمک شبیه سازی عددی به خوبی نشان داده شده است. در جریان حاصل احتراق چرخشی سوخت و هوا در این مشعل ها فرآیندهای پیچیده احتراق و اغتشاش رخ می دهد. از این رو بالابردن و بهینه کردن طراحی این وسایل نیاز به شناخت کامل فرآیندهای آیرودینامیکی و حرارتی جریان احتراقی داخل کوره ها دارد. جهت تحلیل جزئیات میدان جریان معادلات بقاء جرم، مومنتوم، انرژی و گونه های شیمیایی با استفاده از مدل های پیشرفته ریاضی توربولانس و احتراق حل شده اند.

واژه های کلیدی: محفظه احتراق چرخشی - پیشروی هسته گردابی - شعله پایدار - ناحیه چرخش مجدد

1- مقدمه

امروزه در صنعت استفاده از احتراق پایدار چرخشی در مشعل های نیروگاه برق، محفظه های احتراق توربین گاز، موتورهای احتراق داخلی (درون سوز) و مشعل های پالایشگاه شایع است. مکانیزم و مزایای احتراق پایدار چرخشی به خوبی شناخته شده و در بیشتر موارد به تشکیل یک ناحیه گردش مجدد مارپیچی بستگی دارد. که دوباره گرما و گونه های شیمیایی را به ریشه شعله به جریان می اندازد و به تثبیت و پایداری شعله، کاهش آلاینده ها و راندمان حرارتی بالاتر کمک می کند [1]. مشعل های چرخشی مورد استفاده در صنعت هندسه های مختلفی دارند که معمولاً آن را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

الف- هندسه مشعل را طوری طراحی می کنند که معمولاً سوخت به مرکز محفظه احتراق تزریق شده و نفوذ هوا از مجاری مماسی باعث چرخش مخلوط شود.

ب- از یک محفظه احتراق چرخنده استفاده می کنند.

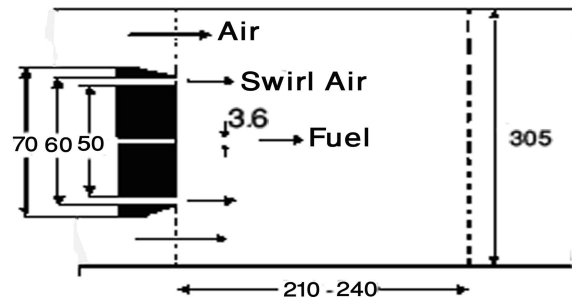
ج- پره ها یا موافعی در مسیر جریان هوا قرار می دهند که جریان برخورد کننده به آنها حالت چرخش پیدا می کند. دو نمونه اولیه محفظه احتراق چرخشی شامل مشعل های چرخشی و محفظه احتراق سیکلونی می باشد. در مشعل های چرخشی که در شکل 1 نشان داده شده جریان هوای چرخشی و سوخت ورودی بدون چرخش به داخل کوره یا جایی که احتراق رخ می دهد تزریق می شود. این نوع مشعل بیشتر جنبه آزمایشگاهی و تحقیقاتی دارد. نوع دوم مشعل چرخشی که در صنعت به نام مشعل سیکلونی شناخته شده در شکل 2 نشان داده شده است. در این نوع مشعل هوا به طور مماسی به داخل محفظه

1- استادیار- احتراق و انرژی

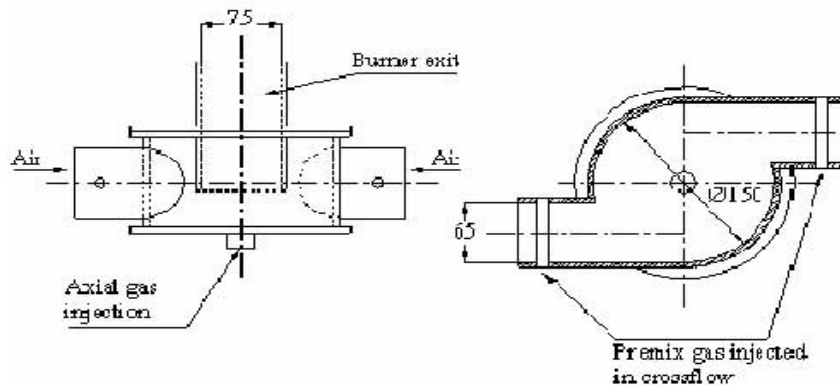
2- دانشجوی کارشناسی ارشد- تبدیل انرژی

3- پروفسور دانشگاه کاردیف ولز- احتراق و انرژی

احتراق تزریق شده و با سوخت مخلوط می شود. سهم مومنتوم مماسی به سبب چرخش هوا کمک به پایداری و افزایش اختلاط در شعله غیر پیش مخلوط می کند که توسط روکس و همکاران بررسی شده است [2].



شکل 1 - شماتیک کلی مشعل چرخشی



شکل 2- مشعل چرخشی نوع سیکلونی

2- فرآیند تشکیل هسته گردابی

فرآیند تشکیل هسته گردابی و ناحیه چرخش مجدد در مشعل های چرخشی به صورت زیر اتفاق می افتد.

الف- جریان چرخش به سبب ترم $\frac{w^2}{r}$ تولید یک گرادیان فشار شعاعی طبیعی می کند.

ب- توسعه جریان از طریق یک نازل باعث کند شدن سرعت محوری و مماسی شده و سبب ایجاد گرادیان فشار شعاعی خواهد شد.

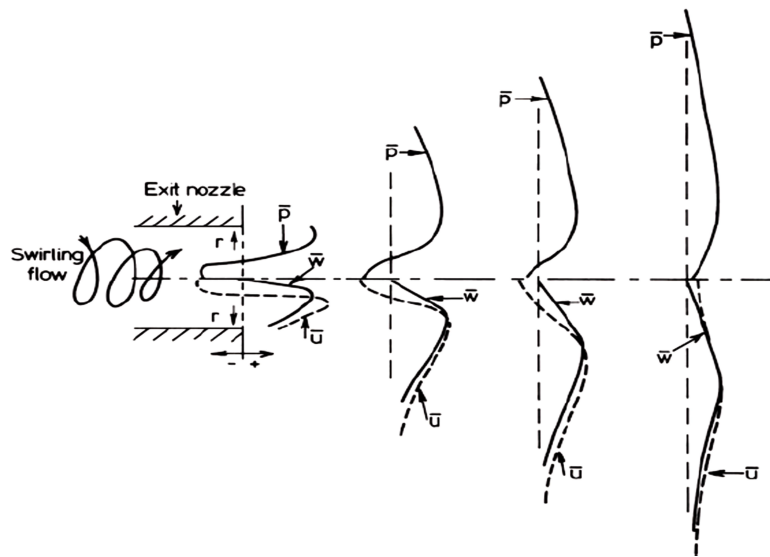
ج- گرادیان فشار محوری منفی که در مجاورت محور ایجاد شده باعث جریان معکوس و تشکیل ناحیه چرخش مجدد مرکزی یا CRZ¹ می شود.

د- ناحیه ای که توزیع سرعت مماسی به شکل رنکین است، (ترکیب گرداب تحت فشار آزاد) هسته گرداب مرکزی می تواند ناپایدار شده و باعث افزایش پدیده پیشروی هسته گردابی یا PVC² شود.

فرآیند های تشکیل هسته گردابی در شکل 3 نشان داده شده است.

1- Central recirculation zone

2- Precessing Vortex Core



شکل 3 - شماتیک تشکیل ناحیه چرخش مجدد در مشعل چرخشی

نتایج محققین نشان داده که فرآیندهای چرخشی کمک به اختلاط خوب مواد احتراقی کرده و در نتیجه مواد آلاینده تولیدی مانند CO, NO_x در این وسایل به طور چشم گیری کاهش می یابد [3]. در کوره های تولید اتیلن، هیدروکربن های سبک در مجراهایی که در محفظه احتراقی معلق هستند شکسته می شوند. این مجراها به مدت کوتاهی مواد را در داخل خود نگه می دارند. پارامترهای مهم در عملکرد صحیح این کوره ها، انتقال حرارت لازم برای شکست به هیدرو کربن های داخل مجراها، کنترل دماهای مجرای فلزی برای کار در مدت زمان طولانی و کاهش تولید آلوده کنندگانی چون NO_x می باشد.

3- مشخصات جریان چرخشی

فرآیند چرخش عموماً در مورد جریان های ورودی به کوره های صنعتی و محفظه های احتراق با کاربردهای مختلف جهت بالابردن ثبات و پایداری شعله، کنترل میزان اختلاط بین سوخت و اکسیژن میزان رهایی انرژی بر اساس نوع فرآیند احتراق و در مورد استفاده بهینه و حداقل از طول محفظه احتراق بر اساس هندسه شعله به کار برده می شود. نخستین برداشتی که از چرخش نتیجه می شود اغتشاشات در مخلوط جریان است. تولید یک فشار با گرادیان های منفی ناحیه گردش مجدد را افزایش می دهد که این حالت معمولاً با استفاده از یک حائل در جلو دهانه ورودی بوجود می آید. البته اگر چرخش به اندازه کافی بزرگ باشد بدون داشتن یک مانع هم می توان این ناحیه را بوجود آورد. با این وجود این منطقه گردش مجدد به طور غیر مستقیم به فرآیندهای انتقالی - جابه جایی و افزایش اختلاط که در نتیجه تولید کرنش برشی دورانی توربولانسی است کمک می کند. بدیهی است که هرافزایش در کرنش باعث بالا رفتن سطح انتقال انرژی سینیتیک¹ متوسط به انرژی توربولانسی می شود [4].

معمولاً مشخصات جریان چرخشی بیشتر بوسیله عدد بدون بعد S که توسط بیرتین شده بیان می شود [5].

$$S = \frac{G_{\theta}}{G_X \times \frac{d}{2}} \quad (1)$$

G_{θ} شار محوری مومنتوم چرخشی

$$G_{\theta} = \int_0^x (\rho U W + \overline{\rho U' W'}) \cdot r^2 dr \quad (2)$$

U سرعت محوری، W سرعت مماسی و r شعاع می باشد.

G_X شار محوری مومنتوم محوری

$$G_X = \int_0^x (\rho U^2 + \overline{\rho U'^2} + (P - P_{\infty})) \cdot r dr \quad (3)$$

p فشار استاتیکی نسبی می باشد.

برای حالت دانسیته ثابت سایرد و بیر نشان دادند که عدد چرخش می تواند به صورت پارامتر کاهش و وابسته به هندسه بیان شود. معمولاً عدد چرخش هندسه¹ برابر 1 و یا بزرگتر از آن است [6].

$$S_g = \frac{\pi D_e D}{4 A_f} \quad (4)$$

S_g : عدد چرخش هندسه (بدون بعد)

D_e : قطر خروجی مشعل (m)

D : قطر بدنه مشعل (m)

A_f : سطح ورودی مماسی مشعل (m)

در عمل برای تولید اعداد چرخشی مختلف می توان با تغییر در قسمت های متحرک عامل تولید کننده چرخش مثلاً پره ها به این مهم دست یافت. بر همین اساس فرم ساده تری از عدد چرخش که با زاویه پره در ارتباط می باشد به این صورت بیان می شود.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2} \right] \times \text{tg}(\alpha) \quad (5)$$

4- احتراق و PVC

تولید جریان چرخشی با قدرت زیاد یک منطقه گردش داخلی برای جریان های احتراقی و ایزوترمال بوجود می آورد. چنین ساختاری در محفظه احتراق سبب ترکیب بهتر محصولات احتراق، برای بالا بردن نرخ انرژی حرارتی استفاده می شود. وجود چرخش در جریان حلقوی، منطقه توسعه یافته احتراق را کوتاه کرده در این حال ممکن است یک منطقه گردش مجدد مرکزی که اندازه آن به نسبت مومنتوم مماسی به محوری در محل خروج جریان بستگی دارد ایجاد شود. یک چنین شرایطی در ابتدا توسط اسکویپر و تحت عنوان قانون (گشت اسکویپر) بررسی شد [7]. طبق قانون اسکویپر اگر نسبت سرعت چرخشی ماکزیمم به سرعت محوری متوسط از واحد بیشتر شود در شرایط زیر بحرانی هستیم و برگشت جریان نداریم.

اگر جت مرکزی سوخت و جریان حلقوی دور آن هوا باشد، و دما برای واکنش به اندازه کافی بالا باشد مخلوط مشتعل خواهد شد. جریان چرخشی و منطقه چرخش مجدد حاصله در طول خط مرکزی باعث گردش مجدد گازها شده و بنابراین دمای واکنش بالا می رود.

فرآیند های احتراق باعث می شود که رفتار و بروز پیشروی هسته گردابی پیچیده تر شود لذا سبب ایجاد شعله های ناپایدار در خروجی مشعل می شود. پیشروی هسته گردابی به طور آسان تری با احتراق پیش آمیخته اتفاق می افتد [1]. پیشروی هسته گردابی به میزان زیادی به روش ونحوه ورود سوخت وابسته می باشد. استفاده از ورودی سوخت محوری یا مماسی به تنهایی می تواند دامنه نوسان پیشروی هسته گردابی را به میزان زیادی مهار کند. پیشروی هسته گردابی به طور قابل ملاحظه ای با

فرکانس و دامنه نوسان برانگیخته می شود. بنابراین عمدتاً شعله داخل مشعل را هم شامل می شود که بی نهایت پر سر و صدا است. این اثر به طور یکنواخت و پیوسته بوسیله کاهش نسبت های تعادل کاهش می یابد [8].

5- تئوری حل جریان چرخشی احتراق

تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با مدل سازی ریاضی جریان های چرخشی مغشوش که از مفهوم ویسکوزیته مغشوش استفاده می کنند صورت گرفته است. از میان آنها مدل دو معادله ای $K - \epsilon$ که از مفهوم ویسکوزیته گردابی استفاده می کند کاربرد بیشتر و بهتری داشته است. برای جریان توربولانسی RNG^1 مدل $K - \epsilon$ برای جریان تحت چرخش برای انتقال گونه های شیمیایی واکنش جریان در مدل اتلاف ادی² با انتخاب منبع پخش انرژی مورد استفاده قرار می گیرد [9]. فرضیات مورد استفاده در حل عددی به صورت زیر است.

الف - مخلوط متان-هوا به صورت گاز ایده ال فرض شده است.

ب - ضخامت دیوار مشعل نادیده گرفته شده است.

ج - شرایط بدون لغزش در دیوارهای مشعل فرض شده است.

معادلاتی که باید برای این مدل حل شود شامل معادلات بقاء حاکم شامل معادلات مومنتوم، انرژی و جرم (معادلات انتقال گونه ها) برای حالت پایا جریان گاز می باشد. این معادلات به روش سیمپل³ حل می شوند.

5-1- معادلات بقاء حاکم شامل

1- بقاء جرم (معادلات انتقال گونه ها)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_{i1}) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{i1,i} + R_{i1} \quad (6)$$

ρ دانسیته مخلوط، m_{i1} کسر جرمی هر گونه، R_{i1} نرخ جرمی واکنش شیمیایی و $J_{i1,i}$ پخش جرم است.

$$J_{i1,i} = -(\rho D_{i1,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \frac{\partial m_{i1}}{\partial x_i} \quad (7)$$

$D_{i1,m}$ ضریب پخش گونه ها و Sc_t تاثیر عدد اشمیت⁴ برای جریان توربولانس می باشد.

$$D_{i1,m} = \frac{1 - X_{i1}}{\sum_{j1, j1 \neq i1} X_{j1} / D_{i1,j1}} \quad (8)$$

2- معادله بقاء مومنتوم

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (9)$$

3- معادله بقاء انرژی

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j1} h_{j1} J_{j1} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (10)$$

J_{j1} شار پخش گونه ها، S_h شامل گرما از واکنش شیمیایی و هر منبع گرمایی ناشی از آن می باشد.

1- Renormalization-group (RNG) k-ε model

2- Eddy-Dissipation

3- Simple

4- Schmidt number

λ_{eff} تاثیر قابلیت هدایت برای مدل $k-\epsilon$ RNG است که به این صورت بیان می شود.

$$\lambda_{eff} = \alpha \cdot C_p \cdot \mu_{eff} \quad (11)$$

که α تاثیر معکوس عدد پرانتل است و به صورت زیر بیان می شود.

$$\alpha_0 = \frac{\lambda}{\mu C_p} \quad (12)$$

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (13)$$

6- مدل سازی مشعل چرخشی

این تحقیق در زمینه شکل جریان در مشعل های چرخشی شکل 4 و 5 صورت گرفته است. این شکل شماتیک از مشعل چرخشی 100 kw می باشد. که یک چهارم مقیاس اندازه واقعی مشعل چرخشی 2 MW است. برای سادگی تحلیل در اندازه زیر مدل شده است قطر خروجی مشعل 75 میلی متر و قطر کوره 150 میلی متر می باشد.

احتراق سوخت و هوا در این مشعل به دو صورت انجام می گیرد، سوخت و هوا می تواند در شرایط پیش مخلوط و غیر پیش مخلوط وارد محفظه چرخشی شود و احتراق صورت گیرد. در حالت غیر پیش مخلوط سوخت از قسمت پایین مشعل بدون چرخش و در جهت محور طولی مشعل وارد می شود. از آنجایی که سوخت دارای سرعت بالایی نسبت به هوا می باشد. شبیه به یک جت عمل کرده و هوای لازم را برای احتراق به داخل کوره حمل خواهد کرد. هندسه مشعل طوری طراحی شده که به هوا شکل چرخشی داده و آنرا پیش گرم می کند و شرایط را برای احتراق چرخشی فراهم می سازد.

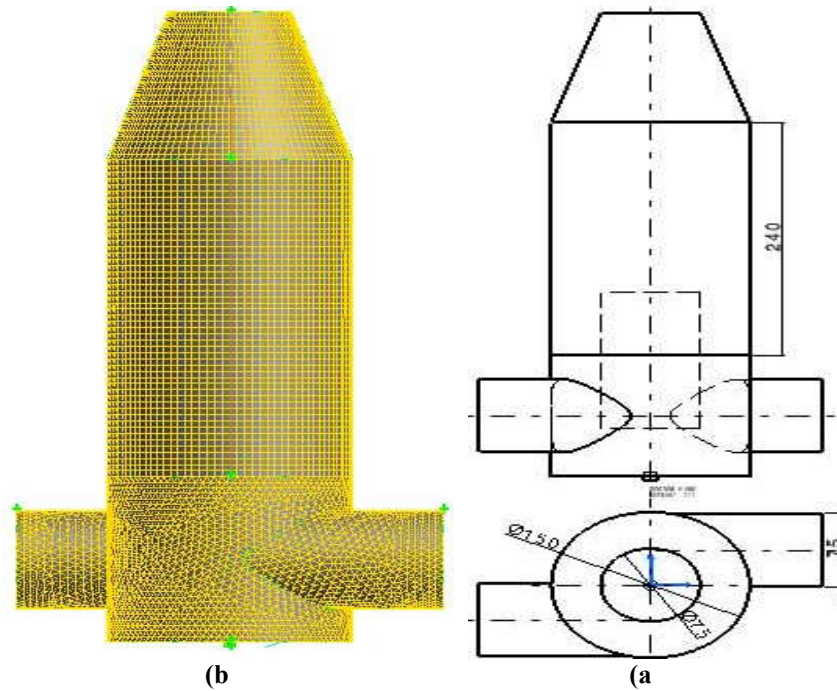
نوع سوخت مورد استفاده در این مشعل گاز طبیعی با ترکیب موجود در جدول 1 می باشد. با تغییرات در اندازه دهانه ورودی هوا می توان اعداد چرخش هندسه متفاوتی بدست آورد. محدوده اعداد چرخش هندسه برای این مشعل از 0.8 تا 4 است. عدد چرخش هندسه برای مشعل شکل 4 که مورد تحلیل قرار گرفته 1 می باشد.

مدل مورد تحلیل به صورت سه بعدی است که به علت نداشتن تقارن نمی توان مدل را به صورت دو بعدی تحلیل کرد. برای مدل سازی با نرم افزار فلوئنت به مدلی احتیاج است که با نرم افزارهای هم خانواده فلوئنت¹ مش بندی و نواحی حل مشخص شده باشد. مدل مش بندی شده همراه با مناطق مرزی و اندازه ها در شکل 4 نشان داده شده است.

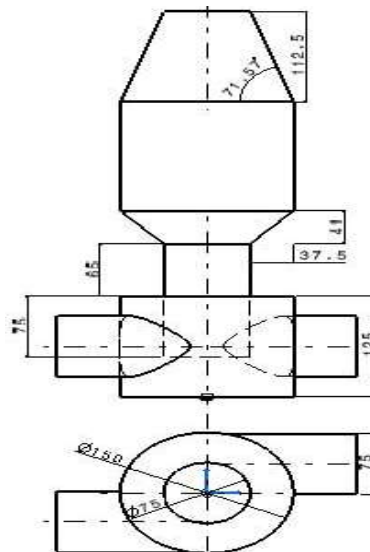
برای مدل سازی احتراق از مدل غیر پیش مخلوط همراه با پی دی اف² استفاده شده است. قابلیت این نرم افزار در مدل سازی گونه های سوخت به این صورت است که گونه های سوخت، نسبت اشتعال پذیری و فشار و دمای مبنا و همچنین گونه هایی که وجود آنها سبب تولید NO_x می شود در این نرم افزار وارد می شود. از آنجایی که یک سوخت ممکن است از تعداد زیادی گونه تشکیل شده باشد که حل تمام معادلات این گونه ها زمان و هزینه زیادی را به همراه دارد لذا خروجی این نرم افزار برای تمام گونه ها یک معادله کلی است که در فرآیند حل نرم افزار فلوئنت قرار می گیرد [10].

جدول 1- ترکیبات گاز طبیعی

گونه ها	کسر مولی
CH4	0.965
N2	0.013
C2H6	0.017
C3H8	0.001
C4H10	0.001
CO2	0.003



شکل 4 - (a) مشعل چرخشی سایکلونی $sg = 1$ (b) مدل مش بندی شده



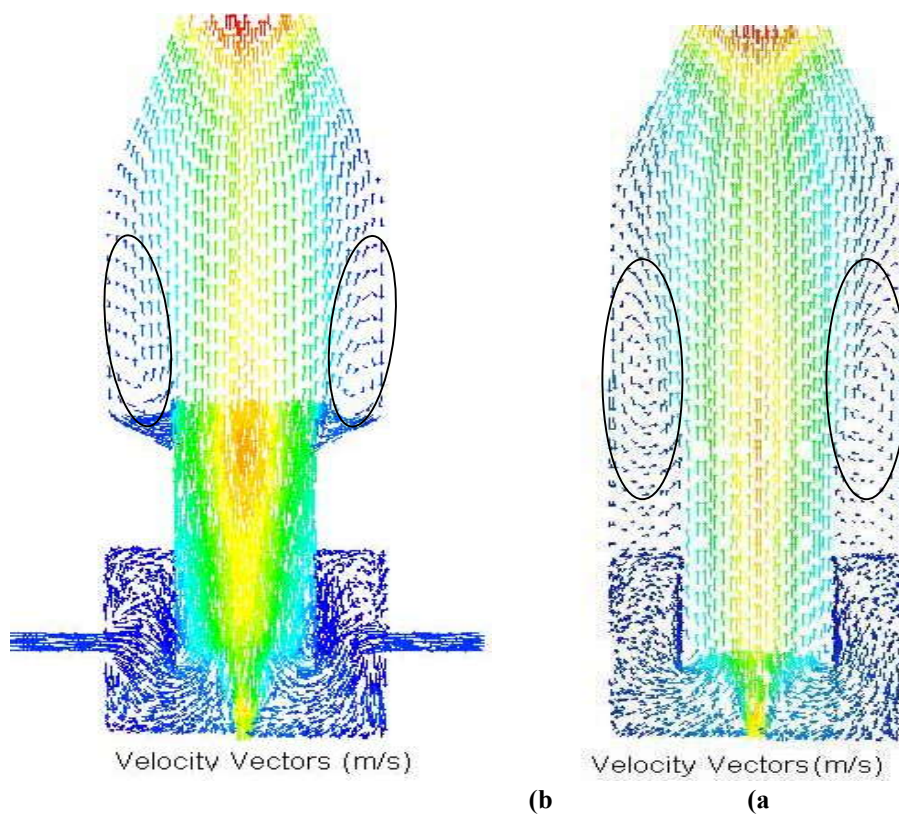
شکل 5 - مشعل چرخشی سایکلونی $sg = 1$

7- بررسی نتایج و بحث

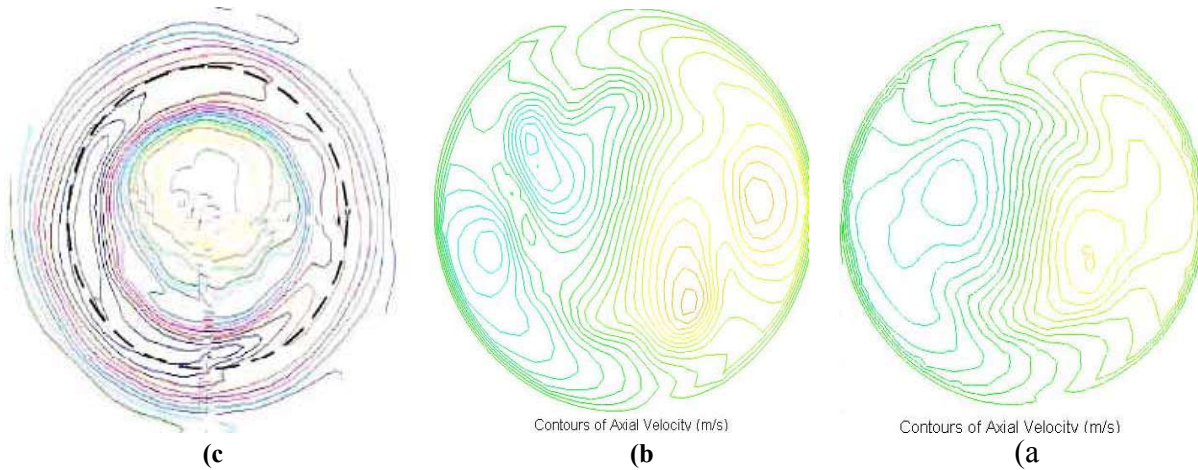
مشعل هایی که در صنعت استفاده می شود باید به نحوی عمل کنند که به مخلوط سوخت و هوا حالت چرخشی دهد. استفاده از دو ورودی مماسی در این مشعل باعث می شود که سهم مومنوم مماسی از محوری بیشتر شود و مخلوط با حالت چرخشی و بدون جریان برگشتی وارد محفظه احتراق شود. در شکل 6 فرآیند تشکیل هسته گردابی به خوبی دیده می شود. در شکل 6a فرآیند تشکیل هسته گردابی ناحیه بزرگتری را در بر دارد که باعث می شود گونه های سوخت و هوا به دیواره های مشعل برخورد کنند و سبب ایجاد سر و صدای زیادی حین فرآیند کار شود.

مزیت مهم این نوع مشعل به این خاطر است که محیط چرخش سوخت و هوا و کوره با هم یکپارچه شده و مخلوط سوخت و هوا قبل از ورود به کوره پیش گرم شده و برای احتراق آماده شود.

شکل 5 مشعل چرخشی توسعه یافته مشعل شکل 4 می باشد. در این مشعل همانطور که در شکل دیده می شود ناحیه چرخش مجدد کوچک بوده و به خاطر طراحی هندسه متفاوت با مشعل شکل 4 به شعله خروجی سرعت بیشتری داده و در عین حال در طی فرآیند کارسر و صدای کمی نسبت به مشعل شکل 4 دارد. فرآیند تولید این مشعل در صنعت مشکل است و به همین دلیل استفاده نمی شود. شکل های 7 و 8 مقایسه ی کانتورهای سرعت محوری و مماسی مدل اختلاط غیر پیش مخلوط و پیش مخلوط در $X/D_e = 0.45$ می باشد. شکل 7a کانتورهای سرعت محوری مشعل شکل 4 است. مشاهده می شود که ناحیه چرخش مجدد به دو ناحیه تقریباً متقارن تقسیم شده است اما در شکل 7b این ناحیه چرخشی به چند ناحیه تقسیم شده که سبب تشکیل پیشروی هسته گردابی می شود. دلیل این که مدل اختلاط پیش مخلوط در مشعل های چرخشی استفاده می شود وجود مناسب تر پیشروی هسته گردابی می باشد. بنابراین با طراحی هندسه مناسب و با استفاده از مدل غیر پیش مخلوط می توان به این مهم نیز دست یافت.

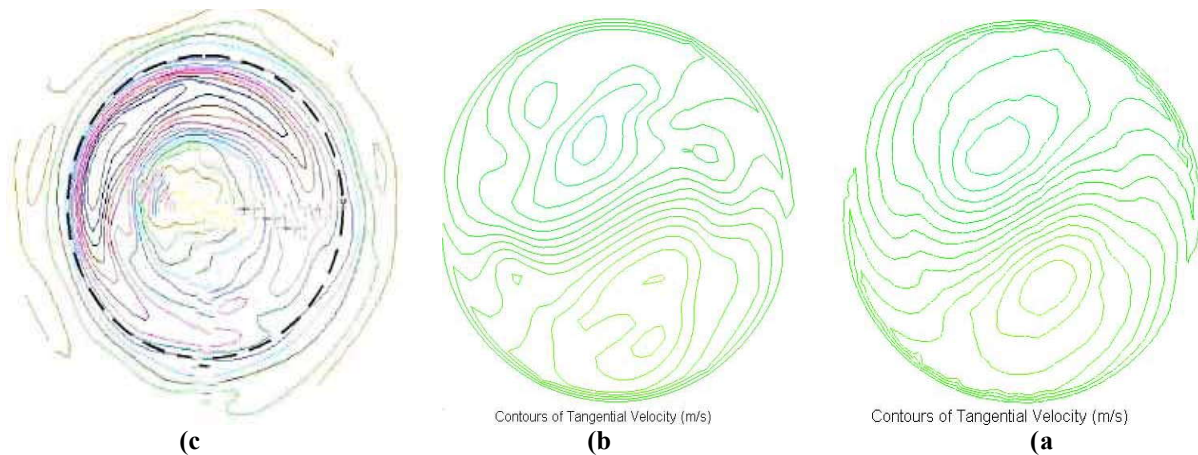


شکل 6- ناحیه تشکیل هسته گردابی



شکل 7- کانتورهای سرعت محوری در $X/D_e = 0.45$

(a) - مدل غیر پیش مخلوط مشعل شکل 4 (b) - مدل غیر پیش مخلوط مشعل شکل 5 (c) - مدل پیش مخلوط

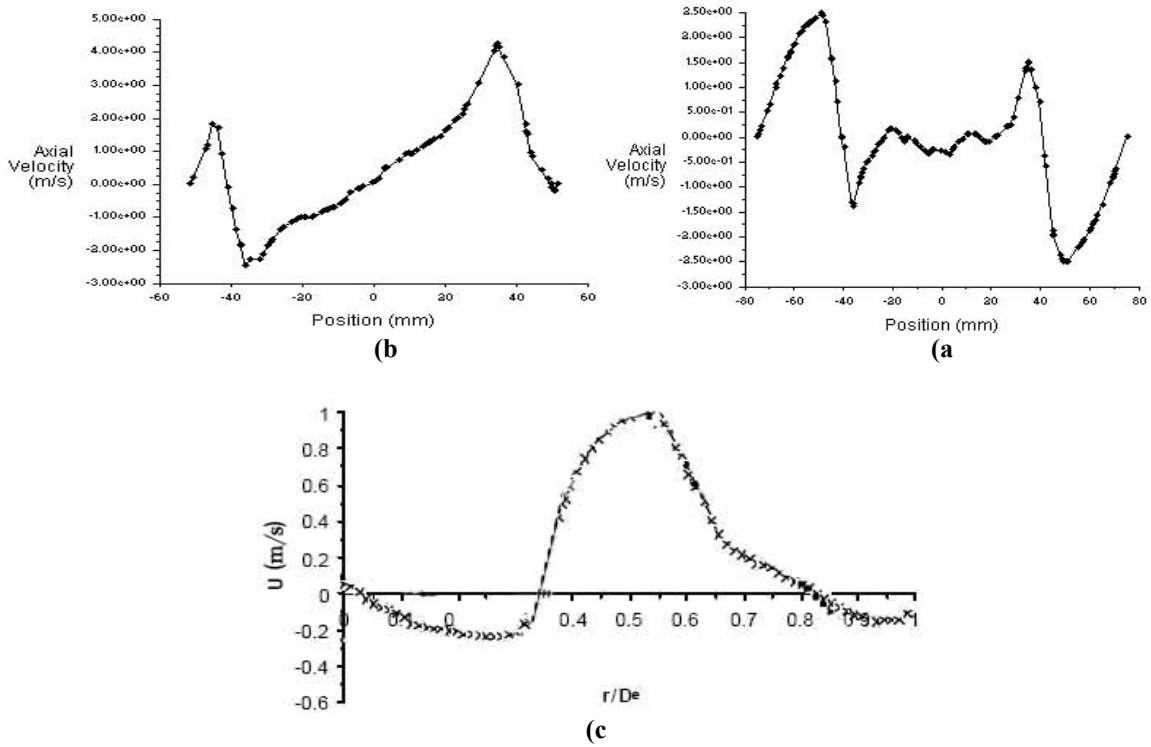


شکل 8- کانتورهای سرعت مماسی در $X/D_e = 0.45$

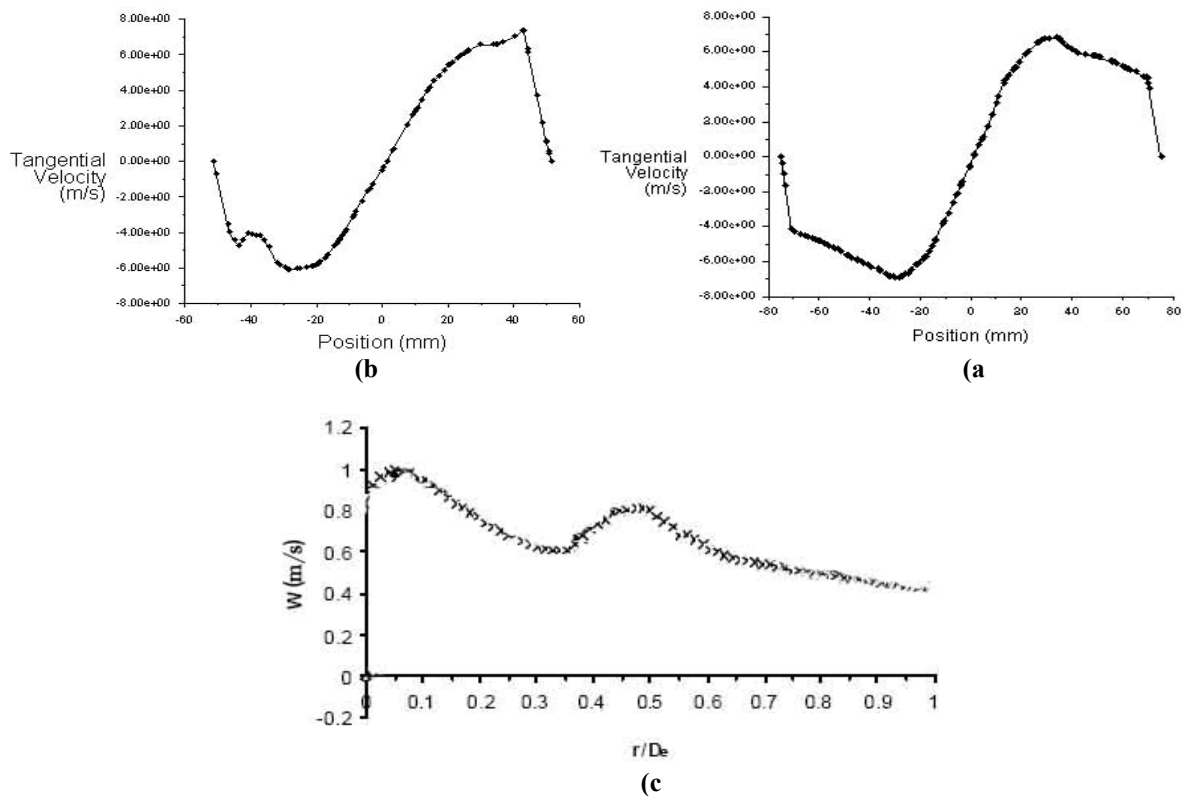
(a) مدل غیر پیش مخلوط مشعل شکل 4 (b) مدل غیر پیش مخلوط مشعل شکل 5 (c) مدل پیش مخلوط

تغییرات سرعت محوری و مماسی دو مدل در شکل های 9 و 10 با مدل آزمایشگاهی آقای ویکتور مورد مقایسه قرار گرفته است [11]. تغییراتی در مدل تحلیلی با مدل آزمایشگاهی مشاهده می شود که به نحوه ورود سوخت و مدل اختلاط مربوط می شود. در مدل آزمایشگاهی آقای ویکتور سوخت و هوا به صورت پیش مخلوط وارد محفظه احتراق می شود اما در مدل تحلیلی سوخت و هوا به صورت غیر پیش مخلوط وارد مشعل می شود.

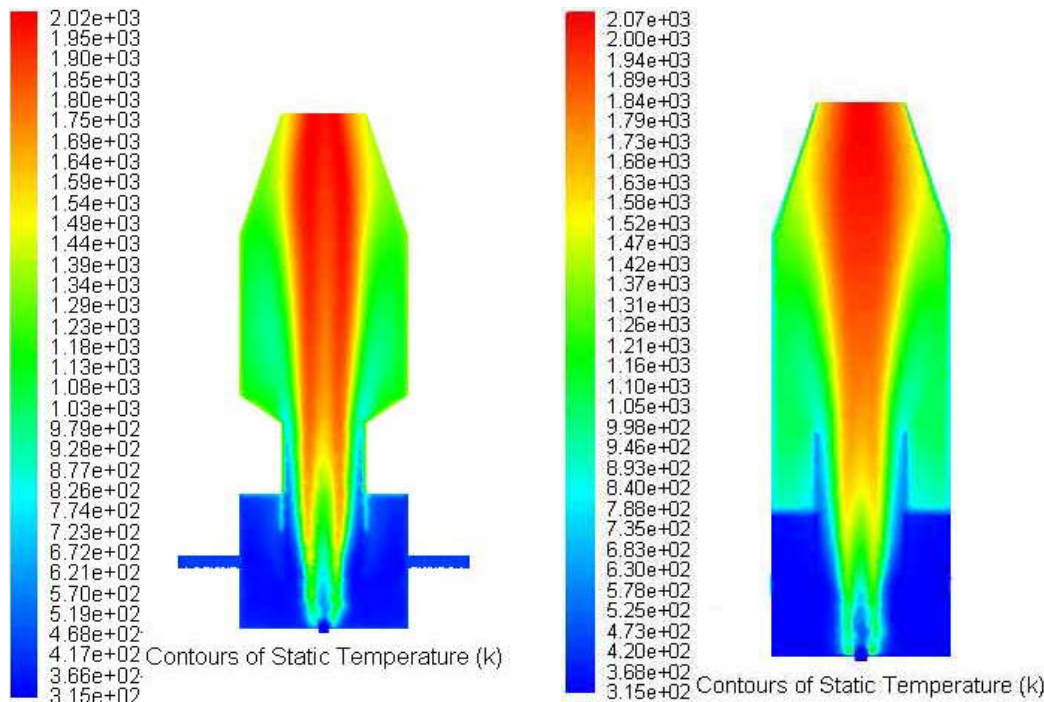
هدف از کاربرد مشعل های چرخشی در صنعت استفاده از شکل شعله نفوذی و پایدار است. لذا طراحی این مشعل ها به نحوی است که بتواند شعله را قبل از اینکه در محفظه احتراق نابود شود از دهانه مشعل به شکل پایدار و بانفوذ خارج سازد. شکل 11 کانتورهای دما مشعل های چرخشی شکل 4 و 5 را نشان می دهد. مشاهده می شود کانتورهای دما در مشعل شکل 4 قبل از اینکه از مشعل خارج شود به حالت پخش در آمده اما در مشعل شکل 5 خلاف این حالت است و شعله خروجی از این مشعل حالت نفوذی داشته و دارای پایداری بیشتری می باشد.



شکل 9- تغییرات سرعت محوری
(a) - مشعل شکل 4 (b) - مشعل شکل 5 (c) - مدل آزمایشگاهی آقای سایرد (اختلاط پیش مخلوط)



شکل 10- تغییرات سرعت مماسی
(a) - مشعل شکل 4 (b) - مشعل شکل 5 (c) - مدل آزمایشگاهی آقای سایرد (اختلاط پیش مخلوط)



شکل 11 - کانتورهای دما در دو مشعل مورد تحلیل

8- نتیجه گیری

- فرآیندهای تشکیل و پیشروی هسته گردابی در مشعل های چرخشی به دلیل طراحی در هندسه مشعل صورت می گیرد. وجود این فرآیندها کمک به اختلاط خوب سوخت و هوا کرده در نتیجه راندمان حرارتی این مشعل ها در مقایسه با مشعل های دیگر بیشتر است.
- وجود سطح مایل قبل از کوره در هندسه مشعل شکل 5 در مقایسه با مشعل شکل 4 سبب شده که شعله خروجی از این مشعل پایدارتر باشد.
- تشکیل هسته گردابی در مشعل شکل 5 به آسانی صورت می گیرد لذا این مشعل بدون سر و صدا کار می کند.
- وجود مومنوم مماسی در جریان خروجی این مشعل ها باعث می شود که برگشت جریان در خروجی اتفاق نیفتد.

مراجع

- 1- Syred, N., Beer, J.M., Combustion in Swirling Flows: a Review, Combustion and Flame, 23,143-201, 1974.
- 2- Roux, S., Lartigue, G., Poinso, T., Meier, U., Bérat, C., Studies of Mean and Unsteady Flow in a Swirled Combustor using experiments, acoustic analysis and Large eddy Simulations, Combustion and Flame, 141, p 40-54, 2005.
- 3- www.johnzink.com.
- 4- Sato, K., O'Doherty, T., Biffin, M., Analysis of strong swirling flows in a swirl burner/furnaces, Proc 1st Int Symp on Combustion and Emissions Control, Cardiff, Institute of Energy, London, p. 243-256, 1993 ISBN 0902597434.
- 5- Beer, J.M., Chigier, N.A., Davies, T.W., Combustion and Flame, 16, 1, p. 39-45, 1971.
- 6- Fick, W., Griffiths, A. J., and O'Doherty, T., Visualisation of the precessing vortex core in an unconfined swirling flow, Optical Diagnostics in Engineering, Vol. 2(1), pp 19-31, 1997.
- 7- Wang, S., On the stability of swirling flows in a finite pipe, 16 July 2007.
- 8- Froud, D., O'Doherty, T., Phase averaging of the precessing vortex core in a swirl burner under piloted and premixed combustion conditions, Combustion and Flame, 100, pp 407-412, 1995.
- 9- Kayatas, K., Albayrak, B., Numerical calculation of local entropy generation in a methane-air burner, Energy Conversion and Management, 46 (2005) 1885-1919.
- 10- Fluent Inc, FLUENT 6.2.16 User Manual (2005).
- 11- Rodriguez-Martinez, V.M., PhD thesis, Cardiff University, 2003.