

بررسی عددی پدیده احتراق برای طراحی محفظه احتراق و صرفه جویی در مصرف انرژی

سید مهدی نقوی^۱

نویسنده مسئول: naghavi@iaukhsh.ac.ir

Investigation of combustion phenomena for combustion chamber design and energy consumption minimizing

Seyed Mehdi Naghavi

چکیده	واژه‌های کلیدی
با وجود همه پیشرفت‌ها در جای‌گزینی سوخت فسیلی، هنوز هم این سوخت، منبع اصلی انرژی به‌شمار می‌آید. لذا پیش‌بینی رفتار آن در حین فرایند احتراق برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، پدیده مطلوبی است. از آن‌جا که دمای بالا در این فرآیند، نقش درخور توجهی دارد، بنابراین استفاده از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشی مفیدتر می‌باشد. در کار حاضر، جریان و احتراق، در یک محفظه احتراق متقارن محوری، به‌صورت عددی مدل شده است. از برنامه کامپیوتری آماده شده می‌توان برای حل‌نمودن جریان در محفظه‌های احتراق متقارن محوری، استفاده کرد. در این برنامه، معادلات اعم از پیوستگی، ممتوم، انرژی، غلظت سوخت و محصولات احتراق و معادلات مربوط به جریان مغشوش، به‌وسیله الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. در کار حاضر، برخی از اثرات وجود چرخش و جهت چرخش در محفظه احتراق بررسی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.	اتاق احتراق استوانه‌ای، الگوریتم سیمپل، جریان مغشوش، مدل اتلاف گردابی

۱- مقدمه

معادلات بکار برده شده برای محاسبه خواص جریان عبارتند از معادلات پیوستگی، اندازه حرکت در سه جهت مختصات استوانه‌ای، انتالیسی سکون، غلظت سوخت و محصولات احتراق، انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش. شکل کلی معادلات عبارت است از:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r v \phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_e \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_e \phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_\phi \quad (1)$$

مقادیر Γ_e و S_ϕ متناظر با خاصیت ϕ در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - ضرایب معادلات بقاء مطابق معادله (۱)

خاصیت (ϕ)	Γ_e	S_ϕ
جرم (l)	0	0
اندازه حرکت محوری (u)	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \mu_e}{\partial x}$ $+\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \mu_e}{\partial r}$
اندازه حرکت شعاعی (v)	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial \mu_e}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \frac{\partial \mu_e}{\partial r}$ $-\mu_e \frac{v}{r^2} + \rho \frac{w^2}{r}$
اندازه حرکت مماسی (rw)	μ_e	$-\mu_e \frac{w}{r^2} - \frac{\rho v}{r} w$
انرژی جنبشی اغتشاش (k)	$\frac{\mu_e}{P_F}$	$A - (\rho \frac{\varepsilon_{old}}{k_{old}}) k$
اتلاف انرژی جنبشی	$\frac{\mu_e}{P_F}$	$C_{\varepsilon_1} A \frac{\varepsilon_{old}}{k_{old}} -$ $(C_{\varepsilon_2} \rho \frac{\varepsilon_{old}}{k_{old}}) \varepsilon$
انتالیسی سکون (H)	$\frac{\mu_e}{P_F}$	$A = \mu_e (u_{j,i} + u_{i,j}) u_{j,i}$ $+\frac{\mu_e}{\rho^2} \rho_{,m} P_{,m}$
کسر جرمی مخلوط (f)	$\frac{\mu_e}{P_F}$	0

انجام کارهای تجربی، دشوار هستند و از سوی دیگر گران و پرهزینه. بنابراین طراحی محفظه‌های احتراق به وسیله روش‌های عددی، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ به این ترتیب، با این کار می‌توان شرایط بهینه را با حداقل هزینه طراحی کرد و اثر پارامترهای مختلف را در فرایند احتراق بر روی خواص جریان داخل محفظه به دست آورد. به تبع آن می‌توان باعث بهبود در راندمان و کارکرد محفظه احتراق شد و گاهی مشکلی را در محفظه احتراق مدنظر، برطرف نمود. به عنوان مثال، با کنترل دمای خروجی، می‌توان از خوردگی در دودکش‌ها جلوگیری نمود. با کنترل درصد گازهای خروجی هم می‌توان آلودگی ناشی از احتراق را به حداقل رساند. با طراحی کوره مناسب هم میزان مصرف انرژی کاهش خواهد یافت. در زمینه شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق، کارهای زیادی انجام شده است که می‌توان به کار جونز و همکارانش اشاره کرد. آنها ساده‌سازی‌های معمول و مسائل مهم در شبیه‌سازی محفظه احتراق را نشان داده‌اند. در سال ۱۹۷۸ جونز و پریدین [۱] حل سه بعدی برای جریان و میدان‌های دما و غلظت نمونه‌های جرمی را در یک محفظه با سوخت مایع ارائه کردند. به علت موجود نبودن نتایج تجربی برای این مسئله، اعتبار شبیه‌سازی توسط یک محفظه دیگر بررسی شده است. در سال ۱۳۸۲ صابونچی و خردمند [۲] جریان و احتراق را در یک محفظه احتراق سه بعدی با هفت مشعل مدل نمودند. آنها تأثیر شکل محفظه مستقیم و محفظه زانویی شکل را بررسی کردند. در سال ۲۰۰۷ دینلر و یوسل [۳] یک محفظه احتراق متقارن محوری را بررسی نموده‌اند. آنها یک استوانه و پیستون به همراه سوپاپ ورودی آن را مورد بررسی قرار داده و اثر زاویه جریان ورودی در داخل محفظه را بررسی کرده‌اند. در کار حاضر، اثر چرخش همجهت و برعکس در ورودی هوا و ورودی سوخت به محفظه احتراق بررسی می‌شود.

۲- معادلات حاکم و فرضیات به کار برده شده

جایگذاری می‌شود [۴]. شکل کلی معادلات $k - \varepsilon$ در معادله (۱) معرفی شدند.

معادله (۲) $\frac{H}{P_F}$ غلظت سوخت (Y_F)

۴- مدل احتراق

برای بررسی احتراق در داخل محفظه، دو مدل احتراق بی‌نهایت سریع و مدل احتراق دو معادله‌ای، بررسی شدند و در نهایت، مدل احتراق دو معادله‌ای که جواب‌های واقعی‌تری را ارائه می‌کرد، برای بدست آوردن جواب‌های نهایی به کار گرفته شد. در مدل احتراق دو معادله‌ای، دو معادله کسر جرمی مخلوط و معادله غلظت سوخت همزمان برای تمام نقاط حل می‌شوند. معادله کسر جرمی مخلوط و معادله غلظت سوخت، مشابه معادله اندازه حرکت هستند؛ با این تفاوت که معادله غلظت سوخت، یک جمله چشمه نیز دارد. برای جای‌گذاری جمله چشمه معادله غلظت سوخت، از روش تلفات گردابه‌ای استفاده شده است. این روش توسط مگنوسن و هایر تاگر ارائه شده و جمله چشمه با معادله (۲) جای‌گذاری می‌شود. (مرجع [۵])

$$S_{Y_F} = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \text{Min} \left(A Y_F, \frac{A Y_{Ox}}{s}, \frac{A B Y_{\text{Product}}}{1+s} \right) \quad (2)$$

در رابطه فوق B, A اعداد ثابت هستند که برای شعله پیش‌مخلوط ۳۲ و ۴ و برای شعله نفوذی ۴ و ۰/۵ جای‌گذاری می‌شود. s نیز نسبت جرم اکسیژن به جرم سوخت مصرفی در معادله واکنش سوخت و هوا می‌باشد. برای اعمال اثر تشعشع در داخل محفظه احتراق، از روش چهار شار که در مرجع [۶] توضیح داده شده، استفاده شد.

۵- روش حل

در معادلات حاکم بر مسئله، مشکل اصلی، وجود متغیر فشار است. از آنجا که سایر متغیرها برای خود معادله مشخصی دارند، ولی فشار دارای معادله‌ای مجزا نمی‌باشد، این مشکل خودنمایی می‌کند. لذا برای حل معادلات، باید روشی را انتخاب نمود که مشکلی با حل فشار نداشته باشد.

برای این که مدل کردن محفظه احتراق مقدور باشد، در آغاز فرضیات ساده‌کننده‌ای در کار اعمال می‌شود. سپس مسئله مدنظر ساده‌سازی شده و آنگاه حل می‌شود. در این مقاله فرضیات زیر بکار برده شده و مدل به ترتیب زیر ساده شده است:

الف. حرارت تولیدشده ناشی از اتلاف اصطکاکی ناچیز در نظر گرفته شده است.

ب. جریان، متقارن محوری است لذا تغییرات نسبت به مختصه زاویه‌ای صفر است.

ج. جریان تراکم‌پذیر فرض می‌شود. (زیرا با توجه به تغییر زیاد دما در محفظه احتراق، نمی‌توان چگالی را ثابت فرض کرد).

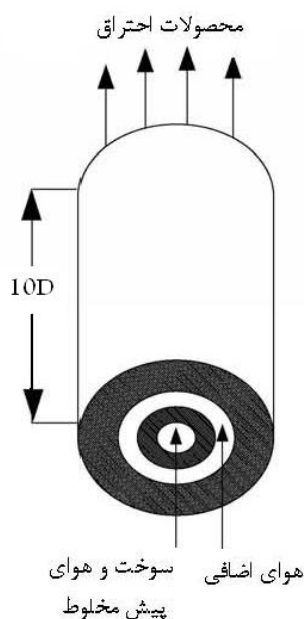
د. نیروهای حجمی ناچیز هستند.

ه. جریان دایم فرض می‌شود.

۳- مدل جریان مغشوش

یکی از نکات مهم برای مدل کردن جریان در یک محفظه احتراقی، تعیین مدل جریان مغشوش است. زیرا توزیع سرعت، با توجه به مدل به کار برده شده برای جریان مغشوش بدست می‌آید و سرعت بر روی همه خواص دیگر تأثیر می‌گذارد. در این مقاله از روش $k - \varepsilon$ استفاده می‌شود. در این روش دو معادله دیفرانسیلی، برای انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش به کار برده می‌شود و از روی مقدار انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش در هر نقطه، مقدار لزجت مغشوش حساب می‌شود. این مقدار که تابعی از نوع جریان می‌باشد، به لزجت سیال که از خواص سیال است اضافه می‌شود و لزجت مؤثر جریان به دست می‌آید. در روابط حاکم بر جریان، هر جا لزجت سیال استفاده می‌شود، لزجت مؤثر

مثل فشار، تصحیح فشار، دما، چگالی و ... شبکه دیگری



شکل ۱- شکل ساده ای از محفظه احتراق

به کار برده می شود. در کار حاضر، اندازه شبکه بندی به کار برده شده 22×22 است. همه متغیرها به جز سرعت، در نقاط اصلی شبکه حساب می شوند و مؤلفه های سرعت در بین نقاط شبکه محاسبه می شوند. با این کار، از نوسانی شدن فشار جلوگیری می شود اما در کنار آن مشکلی ایجاد خواهد شد. اشکال به وجود آمده، افزوده شدن میان یابی به برنامه است که باید سرعت در نقاط اصلی شبکه را با میان یابی از طرفین هر نقطه به دست آورد.

۸- نتایج بدست آمده از بررسی جهت چرخش در ورودی هوا و ورودی سوخت

در کار حاضر، برنامه ای کامپیوتری تهیه شده است که به زبان برنامه نویسی فرترن می باشد. با این برنامه می توان فرآیند احتراق را برای سوخت های مختلف مدل سازی کرد و اثرات تشعشع، تراکم پذیری، نوع سوخت، درصد هوای اضافی و ... را نیز بررسی نمود. با توجه به این که در کار حاضر بررسی جهت چرخش در ورودی هوا و ورودی سوخت در محفظه احتراق مدنظر بود، با برنامه کامپیوتری یک محفظه احتراق، یک بار با چرخش همجهت و بار دیگر با چرخش

روشی که در این کار انتخاب شده است، روشی به نام روش سیمپل^۲ است که توسط پاتانکار و همکارانش پیشنهاد شده است [۷]. در این روش، معادله پیوستگی به عنوان معادله ای برای تصحیح فشار به کار می رود و فشار به صورت مجموع فشار لحظه قبلی، به اضافه تصحیح فشار در هر گره تعریف می شود. بقیه معادلات نیز همراه با تصحیح فشار حل می شوند و در هر تکرار، فشار تصحیح می شود. آنگاه همان طور که متغیرها به سمت جواب همگرا می شوند، مقدار متغیر تصحیح فشار به سمت صفر میل می کند و معادله پیوستگی که در دل معادله تصحیح فشار نهفته است، خود به خود برقرار می شود.

۶- ابعاد محفظه

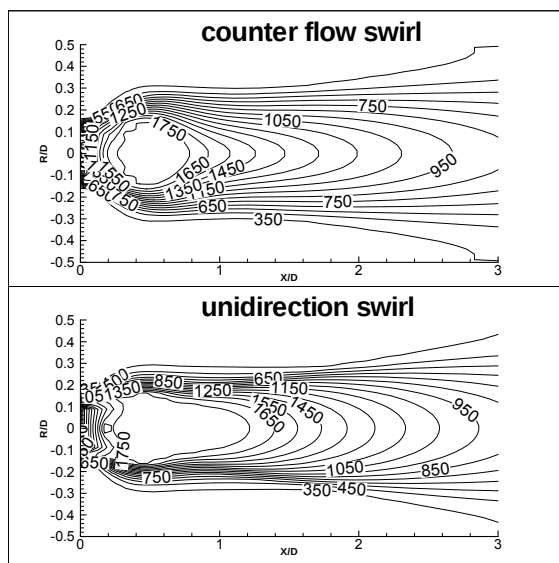
محفظة ای که در این مقاله بررسی می شود، محفظه ای استوانه ای است که قطر آن ۱۰ سانتیمتر و طول آن ۱۰۰ سانتیمتر می باشد. دو سوراخ در ورودی آن وجود دارد که یکی در شعاع صفر تا یک سانتیمتر است و از طریق آن سوخت و هوای پیش مخلوط وارد می شود. دیگری سوراخی حلقوی است که در شعاع دو تا چهار سانتیمتر است و از طریق آن بقیه هوای لازم برای احتراق، به همراه هوای اضافی به محفظه افزوده می شود. شکل (۱) نمای ساده ای از محفظه احتراق را نشان می دهد. لازم به ذکر است که ابعاد عنوان شده، ابعاد یک کوره آزمایشگاهی است که در مرجع [۸] معرفی شده است.

۷- شبکه بندی استفاده شده

برای حل مسائلی که دارای متغیر فشار هستند و در حل آنها از روش سیمپل استفاده می شود، از شبکه ای به نام شبکه جابجاشده استفاده می شود. به این ترتیب که برای متغیرهای سرعت، شبکه مستقلی استفاده می شود و برای سایر متغیرها

همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود دمای وسط محفظه با وجود چرخش به سرعت افت می‌کند، زیرا چرخش باعث اختلاط بیشتر و پهن شدن شعله و رفتن حرارت به سمت دیواره‌ها می‌گردد. لذا طول شعله کم می‌شود و دمای خط محور کوره افت می‌کند. همچنین این موضوع در مورد چرخش برعکس بیشتر از چرخش همجهت رخ می‌دهد زیرا در چرخش همجهت حرکت صلب سیال اتفاق می‌افتد و اختلاط کمتر از چرخش برعکس رخ می‌دهد لذا طول شعله در چرخش همجهت بیشتر از طول شعله در چرخش برعکس است. لذا برای استفاده از کوره کوچکتر و اختلاط بیشتر چرخش برعکس ترجیح داده می‌شود.

در شکل (۳) توزیع دمای داخل محفظه برای دو حالت چرخش همجهت و چرخش برعکس نشان داده شده است.



شکل ۳- توزیع دما در محفظه احتراق با وجود چرخش برعکس (شکل بالایی) و چرخش همجهت (شکل پایینی)

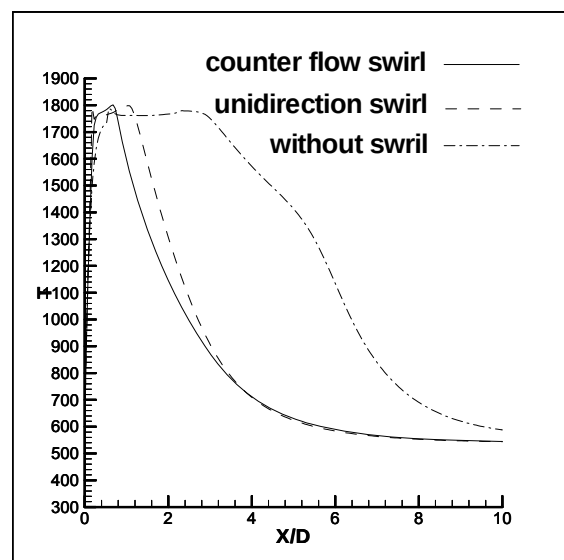
همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود دمای داخل محفظه با وجود چرخش برعکس زودتر از چرخش همجهت افت می‌کند زیرا همان‌طور که قبلاً ذکر شد در چرخش همجهت حرکت صلب سیال اتفاق می‌افتد و اختلاط کمتر از چرخش برعکس رخ می‌دهد لذا طول شعله

برعکس مورد بررسی قرار گرفت. برای این که فقط اثر جهت چرخش بررسی شود، کلیه شرایط دیگر بدون تغییر حفظ شد.

در شبیه‌سازی اول که جریان با چرخش هوای ورودی و سوخت ورودی در جهت برعکس در نظر گرفته شد، مانند مرجع [۸] سوخت و هوای پیش مخلوط که از سوراخ وسط ورودی وارد محفظه می‌شود، با چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت (جهت مثبت مثلثاتی) و هوای اضافی با چرخش در جهت موافق عقربه‌های ساعت (جهت منفی مثلثاتی) از اطراف سوخت وارد محفظه شد.

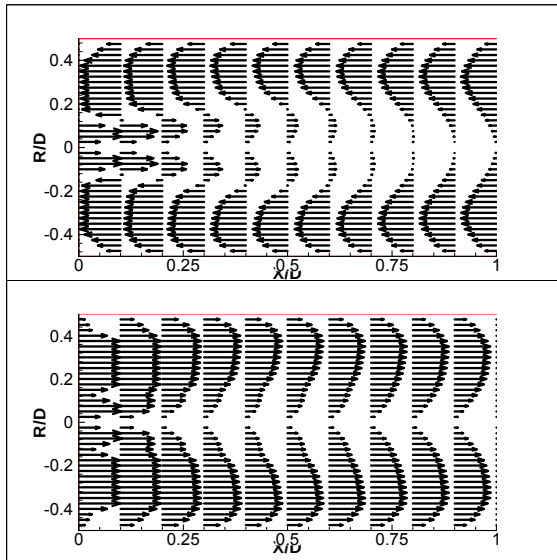
در شبیه‌سازی دوم که جریان با چرخش هوای ورودی و سوخت ورودی با جهت یکسان در نظر گرفته شد تمام شرایط مانند شبیه‌سازی اول انتخاب شد و فقط جهت چرخش در ورودی سوخت و ورودی هوا یکسان در نظر گرفته شد.

در شبیه‌سازی سوم تمام شرایط مانند شبیه‌سازی اول انتخاب شد و فقط برای ورودی سوخت و ورودی هوا چرخش حذف شد و چرخشی در نظر گرفته نشد. در شکل (۲) توزیع دمای ناشی از سه شبیه‌سازی ذکر شده در محور محفظه احتراق نشان داده شده است.



شکل ۲- توزیع دما در خط محور محفظه احتراق

حاکم بر حرکت سیال، در جهت محوری باشد، لذا به مرور زمان مؤلفه مماسی به سمت صفر میل می کند.



شکل ۵- مؤلفه سرعت در جهت مختص مماسی در محفظه احتراق با وجود چرخش برعکس (شکل بالایی) و چرخش همجهت (شکل پایینی)

۹- مقایسه نتایج برنامه با نتایج آزمایشگاهی

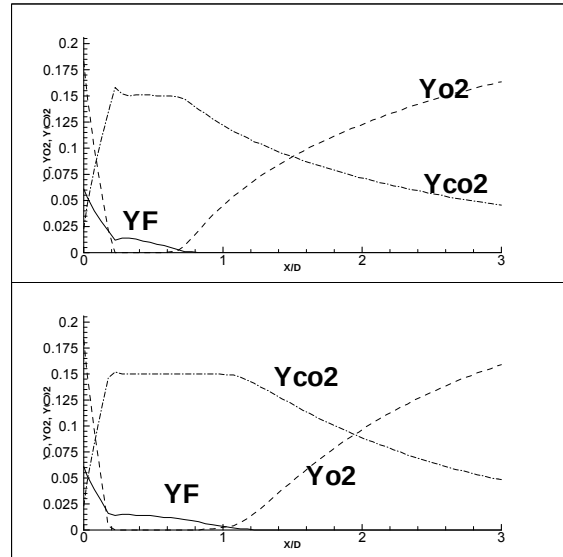
بدون مقایسه تجربی، نمی توان از درست بودن نتایج حاصل از برنامه اطمینان حاصل کرد. لذا برنامه برای هندسه داده شده در مرجع [۸] اجراء و توزیع دمای به دست آمده با توزیع دمای حاصل از آزمایش مقایسه گردید.

در مرجع مذکور، اتاقی احتراقی با قطر ۱۰ سانتیمتر با دو سوراخ در ورودی مدل شده است. به این ترتیب که سوخت و هوا به صورت پیش مخلوط از شعاع صفر تا یک سانتیمتر وارد می شوند و هوا از شعاع دو تا چهار سانتیمتر به محفظه اضافه می شود. نسبت هوا به سوخت در ورودی ۰/۷۸، سرعت متوسط ۲۴/۶ متر بر ثانیه، سرعت سوخت و هوا ۱/۴ برابر سرعت هوای ثانویه، چرخش برای جریان سوخت و هوا برابر ۰/۴۹۳ و برای جریان هوای ثانویه ۰/۵۵۹- می باشد. (علامت منفی، مخالف بودن جهت چرخش هوای ثانویه با چرخش سوخت و هوای پیش مخلوط را نشان می دهد).

در اشکال (۶) و (۷) توزیع دمای داخل محفظه را که توسط برنامه به دست آمده است، به همراه توزیع دمای حاصل از آزمایش (مرجع [۸]) مشاهده می کنید. همان طور که در دو شکل مذکور دیده می شود، برنامه تهیه شده،

در چرخش همجهت بیشتر از طول شعله در چرخش برعکس است.

در شکل (۴) توزیع غلظت سوخت، اکسیژن و دی اکسید کربن در محور محفظه احتراق برای دو حالت چرخش همجهت و چرخش برعکس نشان داده شده است.



شکل ۴- توزیع غلظت سوخت، اکسیژن و دی اکسید کربن با وجود چرخش برعکس (شکل بالایی) و چرخش همجهت (شکل پایینی)

همچنان که در شکل (۴) دیده می شود زمانی که سوخت و هوای ورودی در جهت برعکس چرخش داشته باشند اختلاط بهتر از چرخش همجهت اتفاق می افتد و لذا سوخت زودتر تمام می شود و محفظه کوتاهتری مورد نیاز است.

در شکل (۵) مؤلفه سرعت مماسی در داخل محفظه احتراق برای دو حالت چرخش همجهت و چرخش برعکس نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، چرخش برعکس جریان تا حدود ۰/۶ برابر قطر محفظه در داخل محفظه دیده می شود و لذا اختلاط بهتر اتفاق می افتد در حالی که برای چرخش همجهت به سرعت سوخت و هوای در حال چرخش با هم به تعادل می رسند و با هم چرخش می کنند، لذا اختلاط دیرتر رخ می دهد و همانطور که قبلاً ذکر شد طول شعله بیشتر می شود و کوره بزرگتری مورد نیاز است. لازم به تاکید است که جریان

پدیده می‌توان در مبدل‌های حرارتی برای افزایش انتقال حرارت و صرفه‌جویی در مصرف سوخت استفاده کرد. لازم به ذکر است که در ادامه کار می‌توان با تغییر سرعت عبور و سرعت چرخش سوخت و هوا، محفظه‌هایی با کارایی مناسب و راندمان حرارتی بالا طراحی نمود.

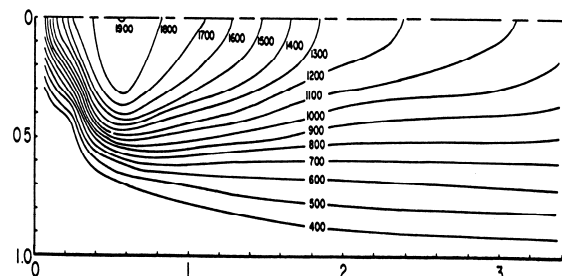
فهرست علائم

A, B	ضرایب ثابت
H	انتالپی
K	انرژی جنبشی اغتشاش
P	فشار
Pr	عدد پراندتل
r	مختص شعاعی
s	جمله چشمه - نسبت هوا به سوخت
u	مولفه سرعت محوری
v	مولفه سرعت شعاعی
w	مولفه سرعت مماسی
x	مختص محوری
Y	غلظت
ρ	چگالی
φ	خاصیت باقی
Γ	ضریب در معادله (۱)
ε	اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش
μ	لزجت سیال

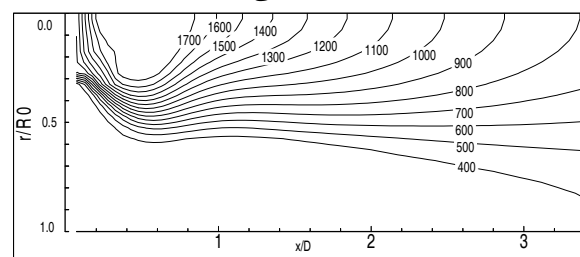
مراجع

- [1] Jones, W. P. and Priddin, C. H., Predictions of the Flow Field and Local Gas Composition in Gas Turbine Combustion, in 17th Sym. On Combustion, 1978, 398-409.
- [2] صابونچی، ا. و خردمند، س، شبیه‌سازی عددی سه بعدی محفظه احتراق توربین گاز، استقلال، سال 22 (شماره 2)، 1382.
- [3] Dinler, N. and Yucel, N., Numerical Simulation of Flow and Combustion in an Axisymmetric Internal Combustion Engine, World Academy of Science,

توزیع دما را مشابه توزیع دمای حاصل از آزمایش پیش‌بینی کرده است.



شکل ۶- توزیع دما در داخل محفظه احتراق نتیجه آزمایشگاهی (۱۸) ابعاد و شرایط محفظه در داخل متن آورده شده است



شکل ۷- توزیع دمای بدست آمده در داخل محفظه احتراق از شبیه‌سازی کار حاضر

دلیل اختلاف ناچیزی که در شکل (۶) و (۷) وجود دارد، این است که اولاً در اندازه‌گیری خطا وجود دارد، تعداد نقاط اندازه‌گیری محدود است و منحنی‌ها از روی چند نقطه رسم می‌شوند، ثانیاً اطلاعات ورودی در برنامه رایانه‌ای برای متان جای‌گذاری شد، درحالی‌که سوخت استفاده‌شده گاز طبیعی بوده است و زمانی که اطلاعات ورودی کمی تغییر می‌کند، توزیع دما نیز تغییر می‌کند. از بین خواص ورودی، توزیع دما وابستگی زیادی به ظرفیت گرمایی ویژه دارد. مقدار این خاصیت از مرجع [۹] جای‌گذاری شد.

۱۰- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در نتایج ارائه شده، دیده می‌شود، چرخش برعکس بر چرخش همجهت ترجیح داده می‌شود زیرا باعث اختلاط بیشتر، کاهش طول شعله و کاهش طول محفظه احتراق مورد نیاز می‌شود. همچنین چرخش باعث پهن شدن شعله و رفتن حرارت به سمت دیواره‌ها می‌گردد. از این

- International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 1 (12),2007, 692-697.
- [4] Bai, X. S. and Fuch, L., Sensitivity study of turbulent reacting flow modeling in gas turbine combustors, AIAA J, 33 (10),1995, 1857-1864.
- [5] پسندیدفرد، ا، شبیه سازی جریان همراه با احتراق در لوله تشعشعی دو راهه یک طرف بسته، دانشگاه صنعتی اصفهان، دکترا، ۱۳۷۸.
- [6] Gosman, A. D. and Lockwood, F. C., Incorporation of a flux model for radiation into a finite-difference procedure for furnace calculation, in 14th Symposium (Int.) on combustion, 1973, 661-671.
- [7] پاتانکار، س، محاسبات عددی کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات، موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۲.
- [8] Oven, M. J., Gouldin, F. C., and McLean, W., Temperature and species concentration measurements in a swirl-stabilized combustor, in 17th Symposium (Int.) on combustion, USA, 1978, 363-374.
- [9] Turns, S. R., An introduction to combustion concepts and applications. Newyork: McGraw Hill, 1996.