

## شبیه سازی جریان چرخشی دو جهته در محفظه احتراق موتور توربین گاز

وحید آفاکاشی<sup>۱</sup>، اکبر غفوریان<sup>۲</sup>، محمد حسن سعیدی<sup>۳</sup>

دانشکده هوا فضا، دانشگاه صنعتی شریف  
Vahid\_aghakashi@yahoo.com

### چکیده

این مطالعه یک شبیه سازی عددی از محفظه احتراق جریان چرخشی دیواره سرد را فراهم می کند. تفاوت این محفظه با محفظه هایی که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته است در وجود یک لاینر محافظ در وسط محفظه و دور شفت انتقال قدرت می باشد. همچنین ساختار جریان چرخشی در این محفظه دارای این مشخصه است که اکسید کننده به صورت مماسی به داخل محفظه پاشیده می شود. این کار منجر به میدان احتراقی چرخشی می گردد که به طور ذاتی به دو ناحیه هم محور جداگانه تقسیم می شود: یک جریان چرخشی خارجی در جهت انتهای محفظه و یک جریان چرخشی داخلی هم مرکز در راستای مخالف. چرخش داخلی زمان ماندگاری سوخت، توربولانس، و فرایند اختلاط پیشراجه را افزایش می دهد، و بنابراین بازدهی و تراست کلی بهبود می یابد. به علاوه چرخش های مارپیچی یک مسیر جریان طولانی بزرگتر از طول هندسی محفظه ایجاد می کند، که امکان استفاده از طول های کوتاهتر برای محفظه را فراهم می کند. جریان چرخشی خارجی از طریق خنک کاری جابجایی، دیواره محفظه را از بار حرارتی بالا محافظت می کند، و در نتیجه باعث داشتن دمای دیواره پایین تر می گردد. این مشخصه نه تنها ضرورت خنک کاری دیواره بیرونی را کاهش می دهد، بلکه اجازه انعطاف بیشتر در انتخاب موادی با دوام بالاتر و وزن کمتر را می دهد. تاثیر خنک کاری جریان چرخشی داخلی روی لاینر به اندازه تاثیر جریان چرخشی خارجی روی بدنه نیست. به کمک این شبیه سازی وجود یک جریان چرخشی دو جهته و نیز وجود منتل که ناحیه جدا کننده چرخش داخلی و خارجی است، تایید می شود. مطابق با این شبیه سازی، اثرات دیواره سرد از نمودارهای دما و کسرهای مولی توزیع شده در امتداد محفظه احتراق مشخص می گردد.

واژه های کلیدی: جریان چرخشی دو جهته- محفظه احتراق- لاینر محافظ- شبیه سازی عددی

### 1- مقدمه

کاربرد چرخش به طور گسترده به عنوان ابزاری برای احتراق پایدار و موثر در کوره های صنعتی، بویلرها، توربین های گازی با نواحی چرخشی توربوفن ها با افزایش یافته های چرخشی، و موتورهای احتراق داخلی استفاده می شود. بر خلاف جریان محوری، جریان های چرخشی به وسیله یک حرکت محوری دو جهته که مانع ناپایداری و از بین رفتن چرخش می شود، مشخص می گردد. شاید قدیمی ترین بررسی حرکت های چرخشی توسط لیندن (Linden) انجام شده که اثر پارامترهای هندسی را روی بازدهی جدایش در جداکننده های صنعتی مطالعه کرده است [1]. در سال های اخیر، یک مدل کاملاً تحلیلی ساده برای جریان در یک چرخش مخروطی توسط بلور (Bloor) و اینگهام (Ingham) انجام شده است [2]. سپس شبیه سازی

1- دانشجوی فوق لیسانس دانشکده هوا فضا

2- استاد یار دانشکده هوا فضا

3- دانشیار دانشکده مکانیک

عددی CFD به طور تاییدی توسط سی یه (Hsieh) و راجامانی (Rajamani) [3]، هوکسترا (Hoekstra)، درکسن (Derksen) و وان دن اکر (Van den Akker) [4]، درکسن و وان دن اکر [5] و دیگران انجام شده است.

بکارگیری نرم افزار CFD برای تقریب عددی دینامیک گازها بیشتر و بیشتر مناسب روش کلی مورد انتخاب است. در حوزه جریان چرخشی محدود، یک موضوع مهم که به طور کامل درک نمی شود، امکان پذیری یک مدل بسته توربولانس معین است. مسائل مهمی در مورد جریان چرخشی دو جهته وجود دارد. برای مثال، موضوعاتی همچون پیشروی، پایداری و شکست ورتکس برای نسبت های منطقی محفظه های مختلف و شرایط ورود و خروج متفاوت قابل بررسی هستند. شناسایی مدل توربولانسی که به اندازه کافی برای دستیابی به اندرکنش های جریان در یک میدان چرخشی توربولانس انعطاف پذیر باشد، به طور واضح برای موفقیت نتایج CFD بسیار سخت است. تحقیق برای یک مدل توربولانس ساده نیز مورد نیاز است تا بتوان بررسی هایی در محدوده جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر از سرعت پایین به بالا، هم برای جریان سرد و هم برای جریان واکنشی، انجام داد.

شبیه سازی سه بعدی در یک دامنه جریان پیچیده، به طور محاسباتی، بسیار مشکل می باشد. به خصوص با استفاده از مدل های توربولانس جدیدی که در منابع گزارش می شود. اما این مدل ها برای دستیابی به پیچیدگی های میدان توربولانس ناشی از چرخش لازم می باشد. مقالات زیادی پیش بینی جریان تکفاز را در رفتار سیکلونی با میدان جریان پایا و متقارن محوری بررسی کرده اند [6-8]. بویسان (Boysan)، آیری (Ayers) و سوئین بنک (Swithenbank) برخی از نتایج اولیه را با مدل کردن جداکننده های سیکلونی گاز به کمک شبیه سازی CFD به دست آوردند [6]. اینها از مدل تنش جبری (ASM) برای محاسبه شش مؤلفه تنش رینولدز استفاده کرده اند. بیشتر کارهای اخیر روی شبیه سازی جریان سیکلونی، با مدل های  $k - \epsilon$  استاندارد،  $k - \epsilon$  اصلاح شده و مدل  $RNG - k - \epsilon$  انجام شده است.

مطابق با کار هوکسترا، درکسن و وان دن اکر مدل انتقال تنش رینولدز (RSTM) که به صورت RSM شناخته می شود) مدل موفق تری است، اما این مدل توربولانس به طور محاسباتی پرهزینه تر است. هنگام استفاده از این مدل انتقال هر تنش رینولدز، به وسیله معادله دیفرانسیل جزئی خودش توصیف می شود. نتایج به دست آمده با استفاده از مدل انتقال تنش رینولدز، در توافق مشهودی با داده های تجربی بوده، اگر چه برخی اختلافات نیز وجود داشته است.

موضوعات تحریک برانگیز جالبی در یک شبیه سازی ورتکس دو جهته به چشم می خورند که قابل تأمل می باشند. گردابه ها یک عدم تقارن محوری شدید و یک ناپایداری فرکانس پایین را نشان می دهند و ساختار های سه بعدی نشان داده شده به وسیله گردش نامتقارن یک لوله ورتکس فقط با یک مطالعه سه بعدی قابل دستیابی است. قبلاً، یک میدان جریان متوسط سه بعدی پیش بینی شده با دقت بالا توسط درکسن و وان دن اکر با استفاده از مدل اسمگورینسکی (Smagorinsky) استاندارد مقیاس شبکه جایگزین (LES) انجام شده است [9]. مدل مقیاس شبکه جایگزین یک روش مناسب برای مدل کردن توربولانس یک جریان ناپایای ذاتی می باشد. در مقابل مدل های توربولانس مبتنی بر معادلات ناویر استوکس رینولدز (RANS)، LES توانایی تفکیک میان مقیاس هایی که حل می شوند و مقیاس هایی که مدل می شوند را دارد. مدل های مناسبی هم برای شبیه سازی واکنش شیمیایی تک جزء یا چند جزء و جریان های چندفاز وجود دارد.

یادآوری این نکته ضروری است که میدان جریان چرخشی هم محور دو جهته در محفظه پیشراشه سوخت مایع تنها یک مقطع خروجی دارد، در حالیکه گردابه ای دو خروجی دارند. گفته می شود که شبیه سازی سه بعدی اثر پارامترهای طراحی هندسی و جریان سیال را روی پیکربندی میدان جریان، روی فرایندهای احتراق سوخت و روی عملکرد موتور مشخص خواهد کرد.

آخرین کار در این حوزه توسط مجدلانی (Majdalani)، فانگ (Fang) و چیاورینی (Chiaverini) روی محفظه احتراق جریان چرخشی انجام شده است. این کار به روش عددی با استفاده از مدل  $k - \epsilon$  استاندارد برای حل جریان سرد و با استفاده از مدل نرخ محدود تعمیم یافته برای شبیه سازی جریان واکنشی انجام شده است [16 و 17]. این کار در ادامه حل تحلیلی انجام

شده بر روی محفظه احتراق جریان چرخشی توسط مجدلانی، ویاس و چیاورینی انجام گرفته که مقایسه حل تحلیلی و حل عددی را مورد بررسی قرار داده است.

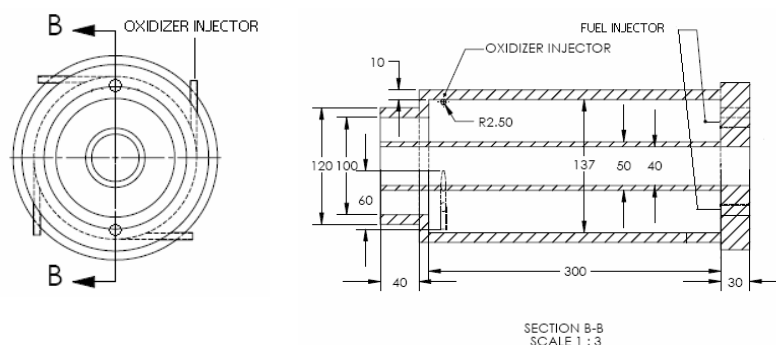
روش به کار فته در این مقاله حجم محدود می باشد که در قالب نرم افزار فلونت (Fluent) از آن استفاده شده است. در حل جریان سرد مدل  $k - \epsilon$  و سپس RSM به کار گرفته شده و برای حل جریان واکنشی مدل نرخ محدود تعمیم یافته به کار گرفته شده است. نحوه عملکرد این روشها در ادامه شرح داده خواهد شد.

## 2- مدل محاسباتی

مرحله اول در انجام شبیه سازی CFD ایجاد شبکه هندسی است. برای ایجاد شبکه و هندسه مورد نیاز از نرم افزار تجاری گمبیت (Gambit) استفاده شده است. جزئیات هندسه محفظه در جدول (1) و شکل (1) آمده است. ترکیبی از قطر داخلی 13.7 سانتیمتر، طول محفظه 30 سانتیمتر و قطر گلوگاه 10 سانتیمتر در شکل (1) مشخص است. نسبت تراکم محفظه 1.88 است. نسبت تراکم (CR) مقطع عرضی محفظه تقسیم بر سطح گلوگاه می باشد.

جدول 1- مشخصات مدل محاسباتی

Parameter	Definition	Value	Units
<b>Chamber Geometry</b>			
Lc	Chamber length	30	cm
De	Chamber diameter	13.7	cm
Di	liner diameter	5	cm
L/D	Length-to-diameter ratio	2.189	-
Lt	Throat length	4	cm
Dt	Throat diameter	10	cm
At	Throat area	78.539	cm <sup>2</sup>
CR	Contraction ratio	1.877	-
<b>Oxidizer Swirl Injector Species (swirl from aft-end)</b>			
Ninj	Number of oxidizer injectors	4	-
Dport	Individual port diameter	0.5	cm
Ainj	Total injection area	0.196	cm <sup>2</sup>
<b>Fuel Radial Injector Species (axial at head-end)</b>			
Ninj	Number of fuel injectors	4	-
Dport	Individual port diameter	0.1	cm
Ainj	Total injection area	0.0078	cm <sup>2</sup>



شکل 1- هندسه محفظه استفاده شده در مدل محاسباتی

ورودیهای اکسید کننده به صورت مماسی در چهار نقطه درست جلوی گلوگاه قرار داده شده است. انژکتورهای سوخت نیز به صورت محوری در انتهای محفظه جا داده شده است. برای استفاده از کمترین سلول های ممکن تا حد امکان از سلول های شش وجهی و چهار وجهی استفاده شده است. از طرفی سلول های هرمی چهار وجهی برای این کار مناسب نیستند.

اما یک مشکل وجود دارد و آن اینکه زاویه بین ورودیهای مماسی و دیواره جانبی تقریباً 180 درجه است. بنابراین المان های این قسمت کج می شوند و کیفیت شبکه بندی کاهش می یابد. برای دور ماندن از این مشکل، حجم کلی به چندین حجم تقسیم شده و هر کدام به طور جداگانه و ساختار یافته شبکه بندی می شود. چگالی بیشتر شبکه بهبود یافته نزدیک دیواره محفظه احتراق منجر به افزایش دقت تحلیل تغییرات سریع با لایه مرزی می شود. و در نهایت بعد از شبکه بندی شرایط مرزی اعمال می شود. چهار شرط مرزی ورودی به صورت نرخ جریان جرم (Mass flow rate) در مکان ورودی های مماسی و یک شرط مرزی خروجی (outflow) در دهانه خروجی محفظه اعمال می گردد.

شبیه سازی بر مبنای یک حل کننده پایا، سه بعدی، غیر کوپل (segregated) و ضمنی انجام می شود. سپس یک مدل توربولانس برای حل جریان غیر قابل تراکم لزج انتخاب می گردد. نرم افزار به کار رفته برای حل مدل محاسباتی تولید شده فلونت می باشد که در آن دو روش برای حل معادلات ناویر استوکس وجود دارد: الف) فیلترینگ (Filtering)، ب) میانگین رینولدز (Reynolds Averaging).

اما فیلترینگ به طور ذاتی یک حل واقعی از معادلات ناویر استوکس برای حذف تنها گردابه هایی که کوچکتر از اندازه فیلتر هستند، می باشد (که معمولاً به عنوان اندازه شبکه در نظر گرفته می شود).

روش میانگین رینولدز برای تبدیل معادلات ناویر- استوکس به کار می رود، و در جایی که نوسان های توربولانت با اندازه کوچک وجود ندارد، به طور مستقیم از آن استفاده می شود. معادلات ناویر استوکس متوسط شده (RANS)، معادلات انتقال را برای تنها مقادیر جریان متوسط، با همه مقیاس های توربولانس مدل شده نشان می دهد. این روش به طور کلی برای محاسبات مهندسی عملی به کار می رود و از مدل هایی همچون اسپالارت-آلماراس (Spalart-Allmaras)،  $k - \varepsilon$ ،  $k - \omega$ ، و RSM استفاده می کند.

تئوری بوسینسکیو (Boussinesq) که اغلب برای ارتباط دادن تنش های رینولدز به گرادیان های سرعت به کار می رود، در مدل های اسپالارت-آلماراس،  $k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  استفاده می شود. مدل انتقال تنش رینولدز بهترین مدل توربولانت است که نرم افزار موجود از آن بهره می گیرد. این مدل پتانسیل بیشتری برای پیش بینی های دقیق جریان های پشچیده دارد و در موقعیت هایی که ناهمگنی توربولانس اثر غالبی روی جریان متوسط دارد، بهترین روش است. این مسأله به ویژه در جریان های با چرخش شدید درست است.

یک معادله انتقال توربولانس متناسب با مدل اسپالارت-آلماراس به طور محاسباتی ساده ترین مدل توربولانس موجود در گزینه های حاضر است. مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد و مدل  $k - \omega$  نیاز به محاسبات بیشتری نسبت به مدل اسپالارت-آلماراس دارند و این به خاطر حل یک معادله انتقال اضافی است. همچنین RSM نسبت به مدل های  $k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  حافظه بیشتر و زمان محاسباتی بیشتری به جهت افزایش تعداد معادله های انتقال تنش های رینولدز احتیاج دارد. در حل جریان سرد در مقاله حاضر، شبیه سازی ابتدا با مدل  $k - \varepsilon$  اجرا شده و بعد از همگرایی مدل RSM فعال شده است. شرح مختصری از معادلاتی که در این مدل حل می شوند در زیر آورده می شود.

معادله گذرای ناویر-استوکس (NSE) را برای جریان تراکم ناپذیر و بدون نیروهای خارجی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

که در آن  $\rho$ ،  $u_i$ ،  $p$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی جریان، سرعت در جهت  $i$ ، فشار استاتیکی و لزجت جریان می باشند. حل عددی مستقیم (Direct Numerical Solution (DNS)) معادله ی ناویر-استوکس به ظرفیت محاسباتی خیلی زیادی

نیاز دارد و به ندرت در تحقیقات مهندسی به کار می رود. در اینجا از روش میانگین زمانی استفاده می شود. بنابراین می توانیم میانگین گیری رینولدز را در معادله ناویر-استوکس اعمال کنیم:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3)$$

که در آن میانگین زمانی  $u_i$  می باشد (در ادامه متن از  $u_i$  به جای  $\bar{u}_i$  استفاده می شود) و  $u'_i$  مقدار نوسان می باشد. بنابراین می توان معادله ناویر-استوکس (Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)) را به شکل اسکالر زیر نوشت:

(4)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i = 0$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$

عبارت  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  که از متوسط گیری عبارت غیر خطی  $\rho u_j \partial u_i / \partial x_j$  بدست می آید تنش رینولدز (Reynolds stress)  $\tau_{ij}^t$  نامیده می شود و در واقع یک ممنتوم مرتبه دوم است. اولین روش برای به کار بردن تنش رینولدز، اقتباس از یک مدل توربولانس دو معادله ای مانند مدل  $k - \varepsilon$  است. این روش مبتنی بر تقریب بوسینسکیو (Bousinessq) می باشد:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

که در آن  $\mu_t$  لزجت گردابه (eddy viscous) و  $k$  انرژی جنبشی توربولانت می باشد. در مدل  $k - \varepsilon$ ،  $\mu_t$  به صورت تابعی از  $k$  و نرخ اتلاف (Dissipation) بیان می شود. مدل  $k - \varepsilon$  به دو معادله ی انتقال اضافی از  $k$  و  $\varepsilon$  نیاز دارد. تقریب بوسینسکیو از فرض همسان بودن توربولانس استفاده می کند که برای جریانهای گردابه ای (Swirling flow) قابل استفاده نیست. در روش دیگر که مدل تنش رینولدز (RSM) نامیده می شود هر کدام از عبارتهای  $\tau_{ij}^t$  با معادلات انتقال اضافی که با مرتبه سوم ممنتوم مرتبط است حل می شود. با ضرب دو معادله ممنتوم گذرا (معادله 2) در دو جهت  $i$  و  $j$  و باز کردن متغیرهای گذرای  $u_i$ ،  $u_j$  و  $p$  با متوسط گیری رینولدز، می توان معادله انتقال را برای تنش رینولدز (Reynolds stress) بدست آورد:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\overline{u'_i u'_j}) + \rho \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_k u'_i u'_j}) = -\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)]$$

local time derivative                       $C_{ij} \equiv$  convection                       $D_{T,ij} \equiv$  turbulent diffusion

$$+ \frac{\partial}{\partial x_k} [\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j})] - \rho (\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k})$$

$D_{L,ij} \equiv$  molecular diffusion                       $P_{ij} \equiv$  stress production strain

$$+ p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$$

$\phi_{ij} \equiv$  pressure strain                       $\varepsilon_{ij} \equiv$  dissipation

در معادله ی بالا عبارتهای  $C_{ij}$ ،  $D_{L,ij}$  و  $P_{ij}$  نیازی به مدل شدن ندارند اما  $D_{T,ij}$ ،  $\phi_{ij}$  و  $\varepsilon_{ij}$  هنوز باید مدل شوند تا معادله بسته شود. در زیر مهمترین روش مدل این پارامترها آمده است:

1- پخش توربولانت  $D_{T,ij}$ : در فلوئنت  $D_{T,ij}$  به صورت ضریب پخش اسکالر ساده شده است.

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (8)$$

که در آن لزجت گردابه  $\mu_t$  در معادله  $k - \varepsilon$  با مقادیر پیشنهادی  $C_\mu = 0.09$  و  $\sigma_k = 0.82$  داده شده است.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

در مدل  $k - \varepsilon$  معمولا  $\sigma_k = 1$  است.

2- کرنش فشار  $\phi_{ij}$ : مدل کردن  $\phi_{ij}$  مهمترین موضوع مدل تنش رینولدز (RSM) است. دو روش اصلی برای اعمال کرنش فشاری وجود دارد: مدل LRR<sup>1</sup> و مدل SSG<sup>2</sup>.

مدل LRR در فلوئنت مدل فشار-کرنش خطی (Linear pressure-strain) نامیده می شود و همچنین مدل SSG در فلوئنت مدل فشار-کرنش درجه دوم (Quadratic pressure-strain) نامیده می شود.

مدل SSG برای افزایش عملکرد در محدوده ای از جریانهای برشی، شامل کرنش صفحه ای (Plane Stress)، برش صفحه ای چرخشی و تراکم و انبساط متقارن محوری بوجود آمده است. این افزایش دقت و عملکرد برای محدوده وسیعتری از جریانهای پیچیده ی مهندسی بخصوص جریانهایی با انحنای خط جریان زیاد مفید است.

در مدل LRR کرنش فشار  $\phi_{ij}$  به سه قسمت تقسیم می شود: کرنش- فشار آهسته، کرنش- فشار سریع و بازخورد دیوار (wall-rejection). هر کدام از این کمیتهها به طور خطی با تنش رینولدز، انرژی جنبش و  $P_{ij}$  مرتبط اند.

3- انرژی جنبشی توربولانت  $k$ : اگر چه این کمیت به طور آشکار در معادله ی (7) وجود ندارد اما برای محاسبه  $\mu_t$  که در معادله (9) داده شده است و همچنین شرایط مرزی تنش رینولدز وارد مدل تنش رینولدز (RSM) می شود. از نظر ریاضی  $k$  خلاصه شده مدل تنش رینولدز است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$(10)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$

به هنگام شبیه سازی مقدار  $k$  برای محاسبه لزجت جریان  $\mu_t$  از رابطه (10) بدست می آید. هنگام استفاده  $k$  برای شرایط مرزی تنش رینولدز، مقدار  $k$  باید از حل معادله انتقال آن با شرایط دیواره ای مناسب بدست آید. با خلاصه کردن معادله انتقال تنش رینولدز یعنی با قرار دادن  $i = j$  معادله انتقال  $k$  به شکل زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ii} - \rho \varepsilon \quad (11)$$

4- نرخ اتلاف توربولانت  $\varepsilon_{ij}$ : در مقایسه با کمیتهای دیگر، طبیعت  $\varepsilon_{ij}$  کمتر شناخته شده است. معادله انتقال آن تا حد زیادی مشابه معادله  $k$  است. مقدار  $\varepsilon_{ij}$  به شکل زیر مدل می شود:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \varepsilon) \quad (12)$$

معادله ی انتقال  $\varepsilon$  به شکل زیر است:

<sup>1</sup> B. E. Launder, G. J. Reece and W. Rodi

<sup>2</sup> C. G. Speziale, S. Sarkar and T. B. Gatski

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1,\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\frac{1}{2}P_{ii} - C_{2,\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

با مقادیر پیشنهادی  $\sigma_\varepsilon = 1, C_{1,\varepsilon} = 1.44, C_{2,\varepsilon} = 1.92$ . این مقادیر مشابه مدل  $k - \varepsilon$  است.

برای شبیه سازی جریان واکنشی گونه های شیمیایی تعریف می شوند. این نرم افزار چندین روش برای مدل کردن جریان های واکنشی فراهم می کند که شامل مدل نرخ محدود تعمیم یافته، مدل احتراق غیر پیش مخلوط، مدل احتراق پیش مخلوط، و مدل احتراق تا حدودی پیش مخلوط.

در مدل نرخ محدود تعمیم یافته معادلات انتقال برای کسرهای جرمی گونه های شیمیایی حل می شود. اما برای شروع، باید مکانیزم واکنش شیمیایی را تعریف کرد. این مکانیزم نرخ های واکنش را از عبارت های نرخ آرنیوس (Arrhenius)، مدل تلفات گردابه ای (Eddy Dissipation) مگنوسن (Magnussen) و جرتاگر (Hjertager) [11] و یا از مدل EDC محاسبه می کند. مدل احتراق غیر پیش مخلوط معادلات انتقال گونه های شیمیایی مجزا را حل نمی کند. بلکه، در این مدل معادلات انتقال برای یک یا دو اسکالر باقی مانده حل می شود و غلظت های اجزاء منفرد از توزیع کسر جرمی مخلوط پیش بینی شده به دست می آید. در روش اسکالر باقی مانده، اثرات توربولانس با کمک یک تابع توزیع احتمال (PDF) بیان می شود. مکانیزم های واکنش در اینجا تعریف نمی شوند، در عوض سیستم واکنشی با استفاده از محاسبات تعادل شیمیایی عمل می کند.

مدل احتراق پیش مخلوط برای سیستم های واکنشی که فقط پیش مخلوط می شوند، به کار می رود. در این مسایل واکنش دهنده ها به طور کامل مخلوط می شوند و محصولات به وسیله یک جبهه شعله جدا می شوند. متغیر پیشرفت واکنش برای پیش بینی موقعیت این جبهه حل می شود. اثر توربولانس به وسیله سرعت شعله توربولانت بیان می گردد.

مدل احتراق تا حدودی پیش مخلوط برای سیستم هایی به کار می رود که ترکیبی از احتراق غیر پیش مخلوط و به طور کامل پیش مخلوط دارند. معادلات کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش به ترتیب برای تعیین غلظت های گونه های شیمیایی و موقعیت جبهه شعله حل می شوند.

در مسأله ما از مدل نرخ محدود تعمیم یافته استفاده شده است. این روش برای دامنه وسیعی از کاربردها شامل سیستم های واکنشی لامینار و توربولانت، احتراق پیش مخلوط، تا حدودی پیش مخلوط، و غیر پیش مخلوط مناسب است. هنگام حل معادلات بقاء برای جزءهای شیمیایی، فلونت کسر جرمی محلی هر جزء یعنی  $Y_i$  را از طریق حل یک معادله نفوذ-جابجایی برای جزء نام پیش بینی می کند. این معادله بقاء در حالت کلی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (14)$$

که  $R_i$  نرخ خالص تولید جزءهای شیمیایی  $i$  توسط واکنش شیمیایی است و  $S_i$  نرخ تشکیل به وسیله ترکیب فاز ناپیوسته با هر منبع تعریف شده مورد استفاده می باشد.  $\mathbf{J}_i$  شار نفوذ جزءهای شیمیایی  $i$  است که به خاطر گرادیان های چگالی به وجود می آید. مدل تلفات گردابه ای بر مبنای کار مگنوسن و جرتاگر گزینه ای است که در این روش استفاده شده است. وقتی مدل تلفات گردابه ای در ارتباط با روش احتراق کلی یک مرحله ای استفاده می شود، همگرایی با راحتی نسبی به دست می آید.

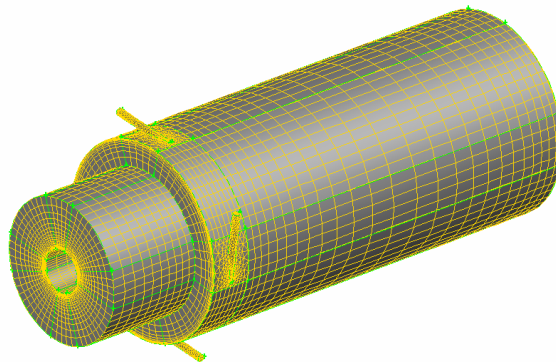
ما برای کنترل در همه روشهای گسسته سازی از روش بالادست (upwind) مرتبه اول استفاده کردیم. همگرایی با کمک این روش گسسته سازی حاصل می شود. سپس برای به دست آوردن دقت بالاتر، روش به بالادست مرتبه دوم تغییر داده می شود. بعد از تعریف شرایط مرزی و خواص مواد برنامه مقداری اولیه می شود و اجرا می گردد. شرط همگرایی بر مبنای این معیار تعیین می شود که خطای باقی مانده در تعادل مومنت کمتر از  $10^{-3}$  و تعادل انرژی کمتر از  $10^{-6}$  باقی بماند. برای افزایش سرعت همگرایی، فاکتورهای تخفیف را تا حد کافی کوچک در نظر می گیریم.

### 3- نتایج و بحث

به دلیل اینکه عدد ماخ پاشش حدود 0.35 است، می توانیم جریان را نزدیک حالت تراکم ناپذیر فرض کنیم.

#### 3-1- شبیه سازی جریان سرد

برای تایید وجود یک جریان دو جهته در شبیه سازی جریان سرد، چهار شرط مرزی ورودی برای ورود اکسید کننده و یک شرط مرزی خروجی برای جریان خروجی در انتها استفاده شده است. همان طور که قبلا اشاره شد، شرط مرزی خروجی outflow می باشد که شرط مناسبی برای حل حاضر است. میدان حل در خروج در حدود یک سوم طول کل محفظه در نظر گرفته شده است. این کار باعث شده تا در حین همگرایی برگشت جریانی مشاهده نشود و حل دقیق تری داشته باشیم. شرایط مرزی دیگر شامل پیش فرض داخلی (Default Interior) دیواره تولید شده به وسیله نرم افزار تولید کننده شبکه می باشد. شبکه مورد نظر در شکل (2) نشان داده شده است.

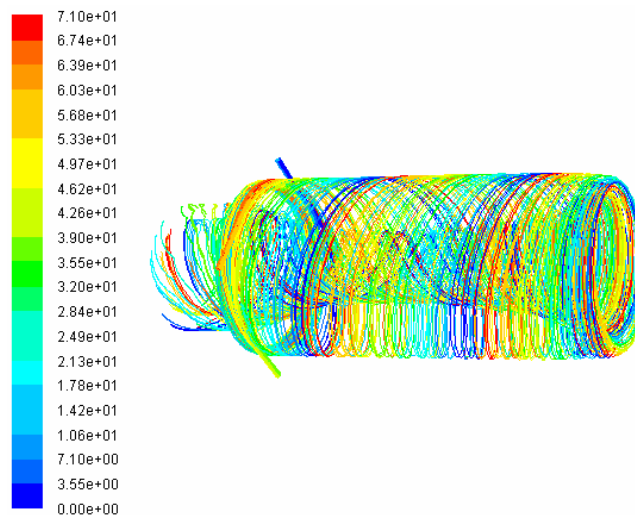


شکل 2- شبکه هندسی

در شکل (3) خطوط مسیر جریان مشخص که حرکت یک ذره اکسید کننده را دنبال می کند، نمایش داده شده است. این شکل به طور واضح یک مارپیچ چرخشی خارجی با حرکت در جهت انتها و یک مارپیچ چرخشی داخلی با حرکت به طرف گلوگاه را نشان می دهد. برگشت جریان در انتها در شکل (3) مشخص است، جایی که شعاع خط مسیر مارپیچی قبل از حرکت محوری برگشتی به آهستگی کاهش می یابد.

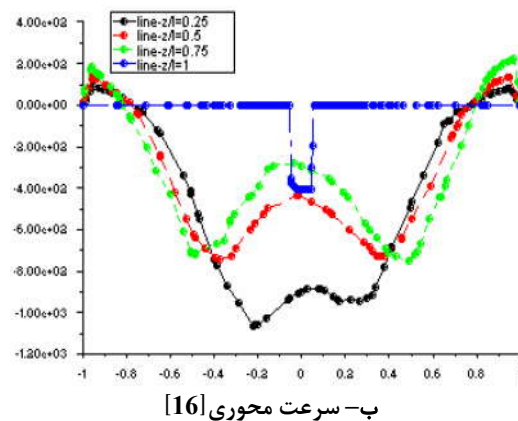
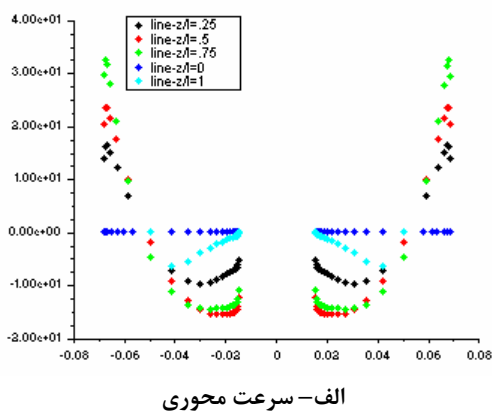
نتایج نشان می دهد که شدت چرخش نزدیک دیواره انتهایی، جایی که سوخت پاشیده می شود، افزایش می یابد. همانطور که در شکل (3) مشخص است، گام خط مسیر در امتداد طول محفظه تغییر می کند. این گام در نزدیکی دیواره انتهایی کوچک است و بزرگترین مقدار آن در مقطع میانی محفظه می باشد.

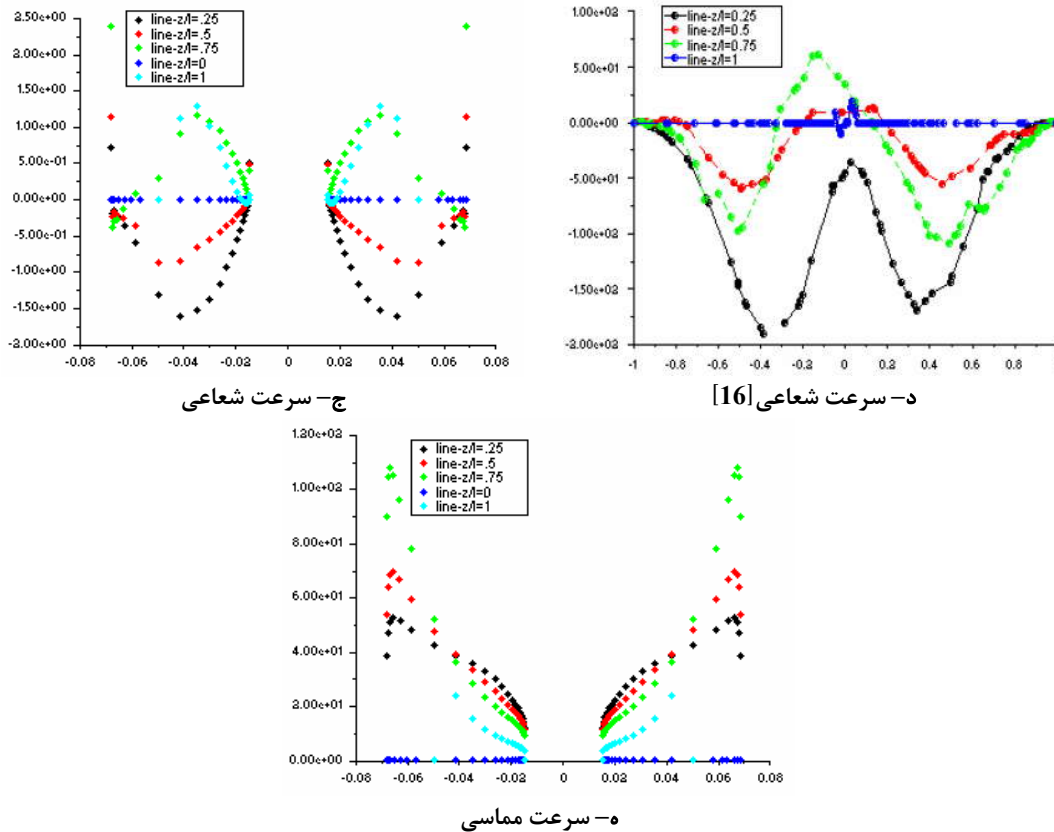




شکل 3- خطوط مسیر جریان

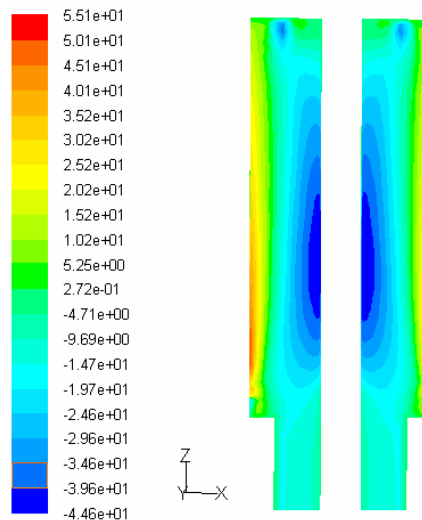
به لحاظ عملی، مکان پاشش سوخت نزدیک دیواره انتهایی اینگونه توجیه می شود که اختلاط به جهت چرخش ماکزیمم می گردد. نتایج تحلیلی به دست آمده توسط ویاس (Vyas)، مجدلانی و چیاورینی [12] برای شدت چرخش به طور کلی از لحاظ روند نتایج عددی ما را تایید می کند، هر چند که هندسه ما تا حدودی متفاوت از هندسه آنهاست. مطابق مدل تئوری انتظار می رود که بیشترین مقدار شدت چرخش نزدیک دیواره انتهایی باشد. همه کاراکترهای سرعت می تواند از شکل (4) برونیایی شود، جایی که پروفیل های سرعت محوری، مماسی و شعاعی در چهار موقعیت محوری هم اندازه رسم می شوند. قابل توجه اینکه نسبت های 0.25، 0.5، 0.75، و 1 از انتهای محفظه در نظر گرفته می شوند. نکته اینکه هر سه مولفه سرعت در انتهای محفظه صفر می شوند، زیرا شرایط عدم لغزش و شرایط مرزی عدم نفوذ جریان باید ارضا شوند.





شکل 4- نمودار سرعت های محوری، مماسی و شعاعی در امتداد شعاع محفظه (واحد همه سرعت ها متر بر ثانیه است)

شکل (4) نشان می دهد که مولفه سرعت محوری نه تنها در دیواره جانبی صفر می شود، بلکه در یک نقطه میانی جایی که جهت جریان عوض می گردد نیز صفر می شود. مکان این نقطه میانی منطبق با موقعیتی است که جبهه (Mantle) نامیده می شود و جدا کننده ورتکس داخلی از ورتکس خارجی است [12-14]. ذکر این نکته می تواند جالب باشد که مکان جبهه به طور تقریبی در همه موقعیت های محوری در 0/73 شعاع محفظه است. اسمیت (Smith) در تحقیق خود برای یک محفظه تو خالی مقدار متوسط 0/72 شعاع را برای جبهه به دست آورده است [15]. با این وجود توافق خوبی بین مقادیر به دست آمده وجود دارد. کار او نشان می دهد که مکان جبهه به طور ضعیفی به فاصله در امتداد طول محفظه حساس است. ویاس، مجدالدانی و چیاورینی برای یک محفظه خالی، به طور تئوری، مقدار ثابت 0/707 شعاع را از حل غیر لزج در جریان دو جهته پشی بینی کردند [12]. آنها برای همین محفظه از حل عددی مقدار 0/74 را به دست آوردند که نمودار سرعت محوری بر حسب شعاع آن در شکل (4ب) برای مقایسه آورده شده است [16]. ملاحظه میشود که روند جواب ها برای سرعت محوری در دو شکل (4الف) و (4ب) کاملاً شبیه بوده و تفاوت در مقادیر سرعت به خاطر تفاوت در ورودی ها می باشد. با وجود اینکه همه تحقیقات قبلی برای محفظه استوانه ای خالی بوده است، ولی با نتایج ما برای یک محفظه استوانه ای همراه با لاینر مطابقت بسیار خوبی دارد. مکان جبهه، جایی که علامت سرعت عوض می شود، به وضوح در شکل (5) قابل مشاهده است.



شکل 5- کانتور سرعت محوری

در قیاس با مطالعات جریان یک جهته شامل حرکت های چرخشی، یک ورتکس اجباری در ناحیه هسته، جایی که اثرات لزجت محسوس می شوند، پیش بینی می گردد. این موضوع در شکل (4) تأیید می شود، به طوری که از روی شکل می توان به وجود یک ورتکس اجباری در ناحیه هسته و یک ورتکس آزاد نزدیک دیواره خارجی استناد کرد. به ویژه تضعیف سرعت چرخشی قابل یادآوری است، به طوری که به خط مرکزی نزدیک می شود. این نتیجه با وجود تفاوت هندسی موجود بین دو محفظه در توافق کیفی با فرمولاسیون صریح به دست آمده توسط ویاس، مجدلانی و چیاورینی است [13]، به طوری که رفتار ورتکس اجباری قابل تحلیل است. این نکته مهم است که پروفیل سرعت مماسی از 0.25 تا 0.75 در امتداد طول محفظه تغییر قابل توجهی نمی کند. همچنین این رفتار، به طور گسترده ای فرض استفاده شده به صورت عدم وابستگی محوری سرعت چرخشی دور از دیواره انتهایی را تأیید می کند.

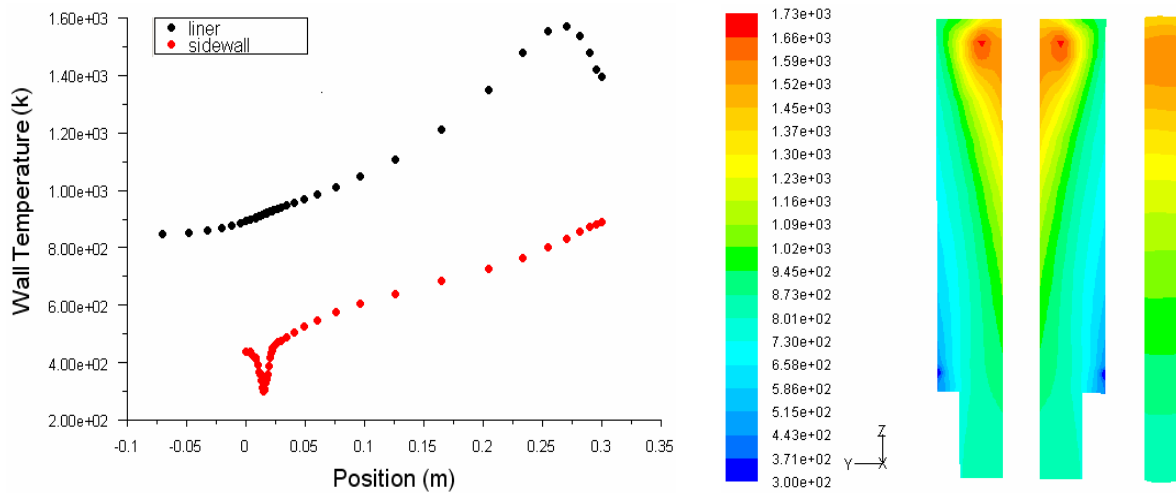
سرعت شعاعی در شکل (4) دیده می شود. این پروفیل به لحاظ روند با نتایج تحلیلی به دست آمده توسط ویاس، مجدلانی و چیاورینی مطابقت دارد [12-14]، هر چند هندسه ما تا حدودی متفاوت از هندسه نتایج تحلیلی است. شکل (4) نمودار سرعت شعاعی از حل ویاس، مجدلانی و چیاورینی برای یک محفظه خالی می باشد که برای مقایسه با حل ما در شکل (4) آورده شده است و نشان می دهد که تطابق در روند جواب ها قابل قبول است [16]. در ضمن تفاوت در مقادیر سرعت شعاعی به خاطر تفاوت در ورودی ها می باشد. پروفیل سرعت شعاعی تقریباً همه جا منفی است، به جز امتداد دیواره جانبی و امتداد خط مرکزی، جایی که حرکت ورتکس اجباری غالب می باشد. سرعت شعاعی منفی متناسب با یک جریانی است که همیشه در حال عبور از خارج یک ناحیه حلقوی به ورتکس داخلی است.

## 2-3- شبیه سازی جریان واکنشی

بعد از شبیه سازی جریان سرد نوع و نحوه پاشش سوخت را مشخص می کنیم. سوخت مایعی که استفاده شده اتیل الکل می باشد و از هوا به عنوان اکسید کننده استفاده شده است. دو نازل سوخت مخروط یکپارچه (solid cone) به صورت متقارن برای تزریق سوخت مایع استفاده می شود. از مدل تلفات گردابه ای به عنوان مکانیزم واکنش استفاده شده است. برای شبیه سازی جریان واکنشی نیز مدل  $k - \epsilon$  به کار گرفته شده است.

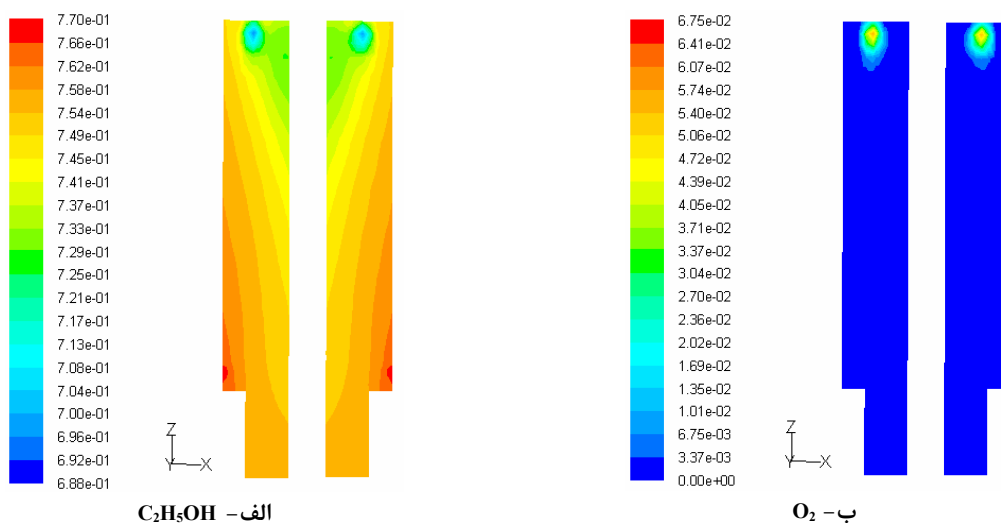
کانتور دمای استاتیکی در شکل (6) دیده می شود. در این نمودار ملاحظه می شود که بیشترین دمای شعله حدود 1700 کلوین است. مکان این دما حدوداً در وسط فاصله ما بین دیواره خارجی و لاینر قرار دارد که اشتعال در آنجا آغاز شده و

غلظت سوخت از بقیه قسمت ها بیشتر است. مقادیر دماها در امتداد طول موتور بر روی دیواره و لاینر در شکل (6الف) دیده می شود.



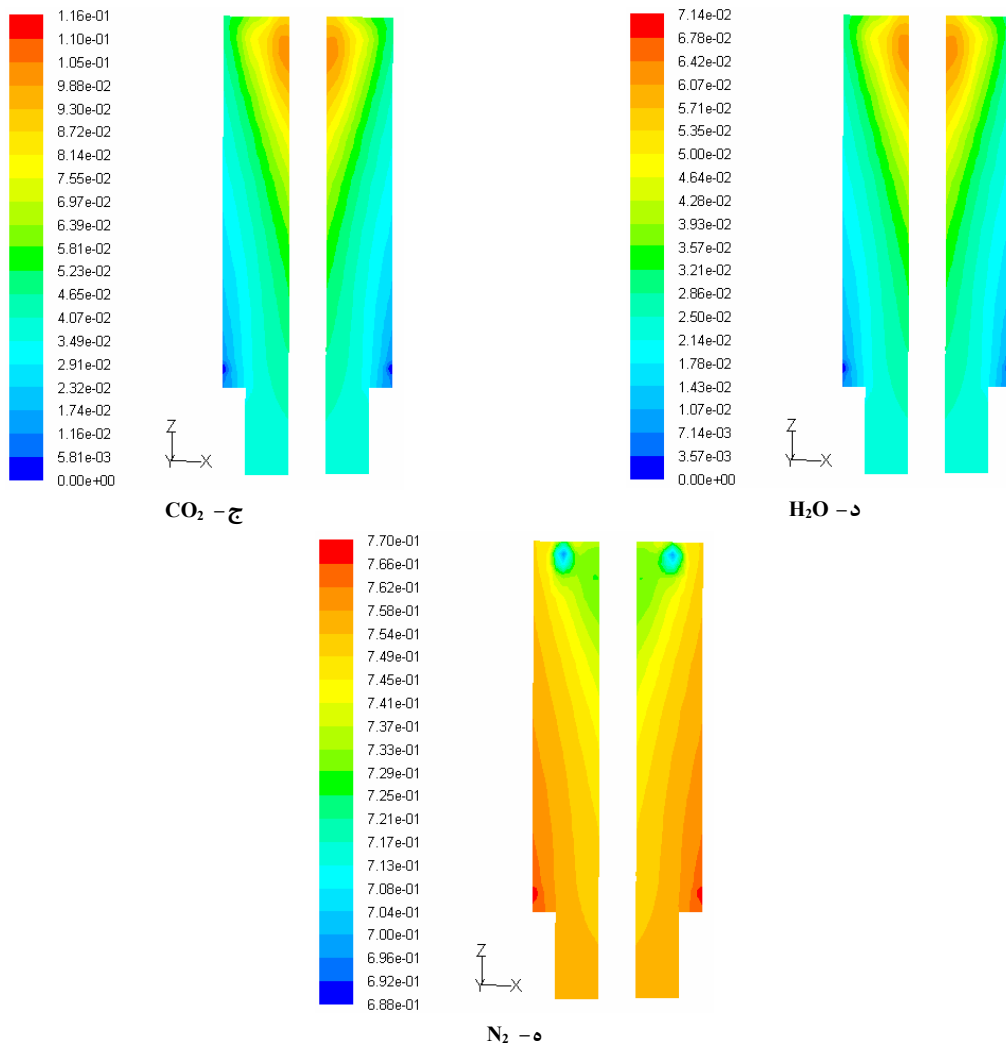
الف- کانتور دمای مقطع طولی محفظه  
ب- توزیع دما روی دیواره جانبی و لاینر  
شکل 6- توزیع دمای ماکزیمم

دمای نزدیک دیواره جانبی به اندازه کافی پایین است. در واقع میانگین دمای دیواره تقریباً 700 کلوین است. دمای پایین دیواره به طور آشکار به خاطر اثرات سرمایشی ورتکس خارجی است که یک سیال خنک را حمل می کند. دما روی لاینر بیشتر از دما روی دیواره خارجی است. بیشترین دما روی لاینر 1600 کلوین است که بیانگر این نکته است که، ورتکس داخلی به اندازه ورتکس بیرونی در خنک کاری دیواره موثر نیست. از نمودار نشان داده شده در شکل (7الف) ملاحظه می شود که بیشترین مقدار کسر جرمی  $C_2H_5OH$  نزدیک دیواره انتهایی است. برعکس، کسر جرمی  $O_2$  بیشترین مقدار خود را نزدیک دیواره دارد، همان طوریکه در شکل (7ب) دیده می شود. به همین ترتیب کسر جرمی  $H_2O$  و  $CO_2$  در شکل (7) مشاهده می شود. کسر جرمی  $H_2O$ ،  $CO_2$  در نزدیکی دیواره انتهایی جایی که احتراق صورت می گیرد خیلی بیشتر است. کسر جرمی  $N_2$  در محل تزریق مماسی اکسید کننده از سایر قسمت ها بالاتر است.



الف -  $C_2H_5OH$

ب -  $O_2$



شکل 7- توزیع کسرهای گونه های شیمیایی داخل محفظه احتراق

## 9- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک شبیه سازی عددی به عنوان ابزاری برای تحقیق روی پارامترهای جریان و دمای محفظه احتراق جریان چرخشی دو جهته دیواره سرد به همراه یک لاینر در وسط آن ارائه شده است که پیشرفت فنی خوبی به شمار می آید. این شبیه سازی اطلاعات مفیدی را در مورد میدان جریان دو جهته فراهم می کند و پروفیل های دمایی داخل محفظه را نشان می دهد.

شبیه سازی در ابتدا مبتنی بر یک فرایند دو مرحله ای بود که مستلزم یک جریان سرد همگرا قبل از فعال سازی واکنش ها بود. مدل لزجی که ما در شبیه سازی جریان سرد استفاده کردیم مدل انتقال تنش رینولدز (RSTM) بود. با توجه به نتایج ارائه شده توسط هوکسترا، درکسن و وان دن اکر تنها مدل برای تولید روندهای مشاهده شده در این پژوهش RSTM می باشد. در واقع، مدل RSTM یا همان RSM تنها مدل توصیه شده توسط توسعه دهندگان نرم افزار برای تحلیل جریان گردابی است. در شبیه سازی احتراق، یک مدل  $k-\epsilon$  در ترکیب با روش تلفات گردابه ای استفاده می شود.

در شبیه سازی جریان سرد، مشخصات ویژه میدان جریان دو جهته به دقت بررسی شد. همچنین وجود شدت چرخش بالا نزدیک دیواره انتهایی مشاهده شد. پروفیل های سرعت یک لایه بدون تغییر را در  $0/73$  شعاع محفظه نشان دادند.

## مراجع

- 1- ter Linden, A. J., "Investigations into Cyclone Dust Collectors," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 160, pp. 233-251, 1949.
- 2- Bloor, M. I. G., and Ingham, D. B., "The Flow in Industrial Cyclones," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 178, pp. 507 - 519, 1987.
- 3- Hsieh, K. T., and Rajamani, R. K., "Mathematical Model of the Hydrocyclone Based on Physics of Fluid Flow," AIChE Journal, Vol. 37, No. 5, pp. 735-746, 1991.
- 4- Hoekstra, A. J., Derksen, J. J., and Van den Akker, H. E. A., "An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones," Chemical Engineering Science, Vol. 54, pp. 2055-2065, 1999.
- 5- Dotson, K. W., Baker, R. L., and Bywater, R. J., "Systems Analysis of Launch Vehicle Aeroelastic Coupling," 4th International Symposium on Fluid Structure Interactions, Aeroelasticity, Flow Induced Vibration and Noise American Society of Mechanical Engineers, Aerospace Division, pp. 53-3, 1997.
- 6- Boysan, F., Ayers, W. H., and Swithenbank, J., "A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design," Institute of Chemical Engineers, Vol. 60, p. 222, 1982.
- 7- Zhou, L. X., and Soo, S. L., "Gas-Solids Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator," Power Technology, Vol. 63, p. 45, 1990.
- 8- Dyakowski, T., and Williams, R. A., "Modelling Turbulent Flow within a Small-Diameter Hydrocyclone," Chemical Engineering Science, Vol. 48, p. 1143, 1993.
- 9- Derksen, J. J., and Van den Akker, H. E. A., "Simulation of Vortex Core Precession in a Reverse-Flow Cyclone," AIChE Journal, Vol. 46, No. 7, pp. 1317-1331, 2000.
- 10- 10Fluent UNS Theory Manual, 6.1 ed., Fluent Inc., Palo Alto, California, 2002.
- 11- Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," International Symposium on Combustion The Combustion Institute Paper 16, 1976.
- 12- Vyas, A. B., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J., "The Bidirectional Vortex. Part 1: An Exact Inviscid Solution," AIAA Paper 2003-5052, July 2003.
- 13- Vyas, A. B., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J., "The Bidirectional Vortex. Part 2: Viscous Core Corrections," AIAA Paper 2003-5053, July 2003.
- 14- Vyas, A. B., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J., "The Bidirectional Vortex. Part 3: Multiple Solutions," AIAA Paper 2003-5054, July 2003.
- 15- Smith, J. L., "An Analysis of the Vortex Flow in the Cyclone Separator," Journal of Basic Engineering-Transactions of the ASME, pp. 609-618, 1962.
- 16- Vyas, A. B., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J., "Simulation of the Cold-Wall Swirl Driven Combustion Chamber," AIAA Paper 2003-5055, July 2003.
- 17- Vyas, A. B., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J., "Hot Flow Model of the Vortex Cold Wall Liquid Rocket," AIAA Paper 2004-3676, July 2003.
- 18- Peters, N., "Flame Calculations with Reduced Mechanisms: An Outline," Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems, edited by N. Peters and B. Rogg, Springer-Verlag, 1993.