



## Research Paper;

### Simulation and Numerical Study of Heat Transfer in the Vortex Combustion Chamber

Davood Moosavian<sup>1</sup>, Morteza Ahmadi Nohedani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dr., Department of Aerospace Engineering, Shahid satari University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

#### Article Information

#### Abstract

**Accepted:**  
2024/04/12

**Received:**  
2023/07/26

#### Keywords:

*Vertex engine, bidirectional vortex Flow, Combustion chamber, Numerical Study.*

**Corresponding Author:**  
Davod Moosavian

**Email:**  
[Davood.moosavian@gmail.com](mailto:Davood.moosavian@gmail.com)

A new method for cooling the combustion chamber walls, it is cooled by the bidirectional vortex Flow. Combustion stability, reducing the temperature of the combustion chamber walls and reduces losses and increase efficiency and uniformity are the properties of the vortex combustion engine. In similar circumstances the volume of flame the vortex engine is greater than the volume of flame at common axial engine. However; temperature of the Wall of the combustion chamber of the vortex engines less than temperature of the Wall of the combustion chamber of the engine Axial. Because cooled by the external vortex. In this study, was carried out Simulation and Numerical Solution the combustion chamber a special vortex engine in conditions single phase gaseous to fuel hydrogen and oxidant oxygen and assuming incompressible flow and irrespective of effect nozzle In order to simplify for review conditions governing on flow the combustion chamber. Examination of the streamlines shows a forced vortex in the center of the core and a free vortex around the core. The simulation results show that the pitch of the Stream lines near the roof is very small and the intensity of the flow rotation is high, which causes the maximum mixing of fuel and oxidizer. The flame is surrounded by an external vortex. In the simulated chamber, by increasing the distance from the edge of the stairs to the ceiling, the mixing and combustion will increase, and as a result, we will have an increase in the temperature of the wall. Also, by moving from the walls to the center of the combustion chamber, the pressure decreases



## فصلنامه علمی دفاع هو فضایی

دوره ۳، شماره ۱  
بهار ۱۴۰۳  
صص ۱-۱۸



### مقاله پژوهشی

## شبیه سازی و حل عددی محفظه احتراق موتور گردابه ای و بررسی انتقال حرارت آن

سید داود موسویان<sup>۱</sup>، مرتضی احمدی نوحدانی<sup>۲</sup>

۱- دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران رایانامه: Davood.moosavian@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران رایانامه: morteza.ahmadi80@yahoo.com

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از روش‌های نوین خنک‌کاری دیواره محفظه احتراق استفاده از جریان گردابه‌ای دو جهته در محفظه احتراق می‌باشد. افزایش پایداری احتراق، کاهش دمای دیواره محفظه احتراق، کاهش افت‌ها، افزایش کارایی و یکنواخت بودن احتراق از خصوصیات موتور گردابه‌ای می‌باشد. همچنین حجم شعله در موتور گردابه‌ای در شرایط مشابه از حجم شعله در موتورهای محوری معمول بیشتر است و با وجود شعله بزرگ‌تر در موتور گردابه‌ای، به علت وجود جریان گردابه‌ای سرد خارجی، دمای دیواره محفظه احتراق از دمای دیواره موتور محوری پایین‌تر است. در این مقاله با شبیه‌سازی و حل عددی محفظه احتراق یک موتور گردابه‌ای خاص در شرایط تک فاز گازی با سوخت هیدروژن و اکسیدکننده اکسیژن و با فرض جریان غیرقابل تراکم و صرف‌نظر از اثر نازل، میدان جریان در داخل محفظه احتراق بررسی شده است. بررسی خطوط جریان نشان‌دهنده‌ی یک گردابه اجباری در مرکز هسته و یک گردابه آزاد در اطراف هسته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد گام خطوط جریان در نزدیکی سقف، بسیار کوچک و شدت چرخش جریان زیاد است و باعث به حداکثر رسیدن میزان اختلاط سوخت و اکسیدکننده می‌گردد. شعله در محاصره گردابه خارجی است. در محفظه شبیه سازی شده با افزایش فاصله از لبه پله به سمت سقف، اختلاط و احتراق افزایش یافته و به تبع آن افزایش دمای دیواره را خواهیم داشت. همچنین با حرکت از دیواره‌ها به سمت مرکز محفظه احتراق فشار کاهش می‌یابد.

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۷/۲۶

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۱/۲۴

### کلیدواژه‌ها:

موتورگردابه‌ای، جریان چرخشی دو جهته، محفظه احتراق، حل عددی.

### نویسنده مسئول:

سید داود موسویان

### ایمیل:

Davood.moosavian@gmail.com

**استناد:** سید داود موسویان، مرتضی احمدی نوحدانی، شبیه سازی و حل عددی محفظه احتراق موتور گردابه ای و بررسی انتقال حرارت آن، مجله علمی پژوهشی دفاع هو فضایی. دوره ۳، شماره ۱ بهار ۱۴۰۳.

## ۱- مقدمه

حرارت ایجاد شده در محفظه احتراق غالباً از طریق جابجایی و تشعشع به جداره موتور انتقال می‌یابد و می‌تواند باعث ذوب دیواره و تخریب محفظه احتراق شود. برای رفع این مشکل می‌توان جداره محفظه احتراق را خنک‌کاری کرد و یا از تماس مستقیم آن با گازهای داغ حاصل از احتراق، جلوگیری کرد. اگر بتوان گرمای منتقل شده به دیواره‌ها را کنترل کرد، بسیاری از مشکلات طراحی محفظه احتراق در رابطه با انتخاب جنس دیواره، وزن محفظه و هزینه تولید حل می‌شود. در روش‌های متداول خنک‌کاری مانند خنک‌کاری غشایی و خنک‌کاری نفوذی، سیال با دمای پایین در امتداد دیواره موتور حرکت می‌کند تا آن را خنک نگاه دارد. روش‌های دیگری نیز مانند استفاده از اکسیدکننده و یا سوخت اضافی برای رقیق یا غنی کردن مخلوط و کاهش دمای احتراق بکار می‌رود. ولی این روش‌ها منجر به کاهش عملکرد احتراق و سنگین شدن موتور می‌شوند.

یکی از روش‌های موثر استفاده از جریان ورتکس در داخل موتور است. عملکرد موتور ورتکسی به این صورت است که اکسیدکننده از پایه محفظه بصورت مماسی وارد محفظه احتراق شده و یک جریان چرخشی نزدیک دیواره محفظه ایجاد و به سمت بالای محفظه احتراق حرکت می‌کند. سپس در بالای محفظه بر اثر تحلیل رفتن انرژی سیال، جریان به صورت مارپیچی به سمت داخل می‌چرخد تا گردابی چرخشی دوم ایجاد شده و به سمت نازل خروجی جریان یابد. سوخت در گرداب داخلی تزریق (پاشیده) شده و در آنجا با اکسیدکننده ترکیب و می‌سوزد. احتراق فقط در گرداب داخلی صورت می‌گیرد و دیوار محفظه تنها در معرض گرمای تابشی قرار دارد که با جریان اکسیدکننده در امتداد دیوار خنک می‌شود. گردابه خارجی به عنوان جاذب حرارت عمل نموده و گرمای حاصل از احتراق را تا حد امکان در خود ذخیره نموده و مانع انتقال آن به دیواره‌ی موتور می‌شود. یکی از مزایای این طرح استفاده از دیواره‌هایی با ضخامت کمتر و سبکتر می‌باشد.

تحقیقات زیادی در زمینه‌ی گردابه‌های ستونی انجام گرفته است. یکی از اولین تحقیقات توسط شخصی به نام هاروی [۱] ثبت شده است. هاروی در سال ۱۹۶۲ وجود درهم‌ریختگی و شکست را در گردابه‌هایی که بر روی سطوح در حال حرکت هستند بررسی کرد. بلور و همکاران [۲] در سال ۱۹۷۳ تئوری جریان‌های سیکلونی را مدل‌سازی کردند. آنها با فرض وجود جریان پایدار، متقارن محوری، غیرقابل تراکم و غیرلزج به مدل ساده‌ای دست یافتند که هم‌چنان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلسال [۳] و اسمیت [۴] در ادامه براساس نتایج تجربی خود وجود ناحیه‌ای با جریان گردابه‌ای اجباری در نزدیکی خط مرکزی سیکلون را اثبات کردند. جریان‌های سیکلونی که

حرکتی در راستای یک محور و در دو جهت مخالف است، نمونه‌ی پرکاربردی از جریان‌های گردابه‌ای هستند. سایرد و همکاران [۵] در سال ۱۹۷۴ جریان چرخشی را به عنوان ابزاری جهت کنترل ناپایداری‌های احتراق به کار بردند. فلر و همکاران [۶] در سال ۱۹۷۷ شش گونه‌ی مختلف گردابه را در جریان‌های تراکم‌پذیر شناسایی کردند. ریون و همکاران [۷] در سال ۱۹۸۱ اثر تغییر زاویه‌ی ورودی‌های مماسی را مطالعه کردند. آنها دریافتند که در مرکز سیکلون یک گردابه‌ی اجباری و پیرامون آن گردابه‌ای آزاد تشکیل می‌شود. هم‌چنین با انجام این آزمایشات نقش موثر سرعت مماسی در مقایسه با سرعت شعاعی میدان جریان روشن گردید.

چپاورینی و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۳ مطالعه‌ای بر روی چگونگی احتراق هیدروژن با اکسیژن انجام دادند. مطالعات آنها مشخص کرد عملکرد سیستم به شدت به موقعیت پاشش سوخت وابسته بوده و افزایش چرخش و کاهش فشار باعث بهتر شدن کارایی سیستم می‌گردد.

فنگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از نرم افزار فلونتت یک محفظه‌ی احتراق گردابه‌ای را به صورت عددی مدل‌سازی کردند. در مطالعه آنها نتایج فرایند احتراق به دو ناحیه‌ی مجزای گردابه‌ی داخلی و خارجی تقسیم‌بندی شد. نتایج تحقیقات آنها وجود دو گردابه‌ی هم جهت و حرکت محوری مخالف هم را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج حاصله موقعیت متل (مرز دو گردابه آزاد و اجباری) را به صورت استوانه‌ای به شعاع  $0.707$  از شعاع محفظه احتراق مشخص می‌کند.

وایاس و همکاران [۱۰ و ۱۱] در سال ۲۰۰۳ حرکت محوری دوجهتی و چرخشی را در یک محفظه‌ی احتراق استوانه‌ای بررسی نمودند و حلی تحلیلی برای میدان سرعت و فشار ارائه دادند. این مدل تحلیلی با فرض پایداری، تقارن محوری، غیرقابل تراکم و غیر لزج بودن سیال پایه‌ریزی شد و به همین دلیل برای ناحیه‌ی مرکزی محفظه صادق نبود.

مجدلانی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۶ با در نظر گرفتن اثرات آشفتگی به شبیه‌سازی میدان جریان، دما و جزءهای شیمیایی با استفاده از نرم افزار تجاری فلونتت پرداختند و نتیجه گرفتند که با توجه به تغییر جهت سرعت محوری جریان در محل تماس دو گردابه می‌توان انتظار داشت که در این ناحیه سرعت محوری جریان صفر گردیده و یا به عبارت بهتر سیال در جهت محوری حرکتی نمی‌نماید. به این ناحیه ساکن، حائل (متل) گفته می‌شود و به شکل یک استوانه فرضی است.

در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای دیگر که در دانشگاه صنعتی شریف توسط آقایان جمالی و همکاران [۱۳] ارائه شد و در آن پیش‌بینی حرکت سیال در فاز گازی که بتواند برای برآوردی کلی از میدان جریان مورد استفاده قرار گیرد، مورد نظر بوده است. غفوریان و همکاران [۱۴] در سال

۲۰۰۷ به بررسی انتقال حرارت در موتور گردابه‌ای پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در این موتورها اثر انتقال حرارت همرفتی بسیار بیشتر از تابش بوده و هم‌چنین می‌توان اثر رسانش را در مقایسه با این دو نادیده گرفت. دهقانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۵] به بررسی خط سیر ذره در یک جریان گردابه‌ای دوجته پراختند و خط سیر ذره را به صورت عددی پیش‌بینی و نتایج آن را به صورت تجربی تایید کردند.

در این مقاله با شبیه‌سازی و حل عددی میدان جریان در محفظه احتراق یک موتور ورتکسی در شرایط تک فاز گازی با سوخت هیدروژن و اکسیدکننده اکسیژن و با فرض جریان غیر قابل تراکم پرداخته شده است.

## ۲- معادلات حاکم و حل مسأله

انتخاب مواد مناسب، تعیین ابعاد موتور، طراحی صفحه انژکتور و سایر پارامترهای ساخت موتور نیازمند مدل‌سازی میدان جریان در محفظه احتراق می‌باشد که خود مستلزم حل معادلات حاکم است. برای بررسی میدان جریان در محیط ورتکسی نیاز به حل معادلات بقا جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau'' + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\tau''_{eff} \cdot \bar{v})) + S_h \quad (4)$$

معادله (۱)، بیانگر معادله بقا جرم است و در آن  $\rho$ ،  $\bar{v}$ ،  $t$ ،  $S_m$  به ترتیب معرف چگالی، سرعت، زمان و مقدار جرم اضافه شده از یک فاز به فاز دیگر است.

معادله (۲)، معادله بقای مومنتم است که در آن  $\tau$  تانسور تنش و  $\rho g$ ،  $\bar{p}$  و  $\bar{F}$  به ترتیب فشار، نیروی گرانش و نیروی خارجی وارد بر سیال می‌باشند.

تانسور تنش مطابق معادله (۳) محاسبه می‌شود که در این رابطه  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی و  $I$  تانسور واحد می‌باشد.

رابطه (۴)، معادله بقای انرژی است. عبارت اول در سمت راست این معادله بیان‌گر انتقال انرژی به وسیله هدایت، نفوذ عناصر و تأثیرات اتلاف‌های لزج است. در رابطه بالا  $K_{eff}$

بیان گر ضریب انتقال حرارت موثر (جمع ضریب انتقال حرارت مولکولی و آشفته)،  $E$  و  $h$  به ترتیب انتالپی محسوس و انرژی و  $J$  شار نفوذ عنصر  $Z$  ام است.  $S_h$  شامل گرمای ناشی از واکنش شیمیایی و سایر چشمه‌های حرارتی می‌باشد.

متاسفانه هیچ نوع مدل آشفستگی وجود ندارد که بتواند به صورت جامع در تمام مسایل مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب یک مدل آشفستگی مناسب به ملاحظات از قبیل فیزیک جریان، دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی در دسترس و زمان لازم برای شبیه‌سازی بستگی دارد. در مساله مورد بررسی به دلیل پیچیدگی و حجم محاسباتی بالا که ذاتی محفظه احتراق است نمی‌توان از مدل‌های پیشرفته استفاده نمود. بنابراین نیاز به یک مدل عمومی است که در همه نواحی به خوبی پاسخ‌گو باشد. در این مساله از مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  استفاده می‌شود. این مدل به این دلیل انتخاب شده که حجم محاسباتی معقولی دارد و نیز در بسیاری از مسایل از دقت کافی برخوردار می‌باشد. مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  استاندارد، مدلی نیمه تجربی است که بر مبنای معادلات انرژی آشفستگی ( $k$ ) و نرخ میرایی آشفستگی ( $\epsilon$ ) می‌باشد. معادلات آشفستگی برای انرژی آشفستگی (۵) و نرخ میرایی (۶) چنین هستند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6)$$

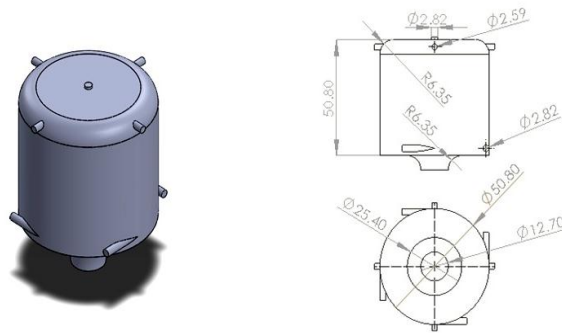
$$\mu_t = C_{\mu\rho} \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

در این معادلات  $G_k$  تولید انرژی جنبشی آشفستگی در اثر گرادیان سرعت،  $G_b$  تولید انرژی جنبشی در اثر شناوری،  $Y_M$  سهم انبساط در جریان آشفته تراکم‌پذیر هستند.  $C_{1\epsilon}$ ،  $C_{2\epsilon}$  و  $C_{3\epsilon}$  مقادیر ثابت که از تجربه بدست می‌آیند و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\epsilon$  اعداد پراتل آشفستگی برای انرژی و میرایی می‌باشند. در نهایت  $S_k$  و  $S_\epsilon$  عبارت‌های منبع برای معادلات انرژی و میرایی آشفستگی هستند. لزجت گردابی  $\mu_t$  نیز از معادله (۷) محاسبه می‌شود که  $C_{\mu\rho}$  مقدار ثابت تجربی است. این معادلات، با استفاده از روشی بر پایه حجم کنترل، گسسته‌سازی شده و یکسری معادلات جبری بوجود می‌آید. این معادلات گسسته‌سازی شده به کمک حل عددی، بصورت جداگانه حل می‌گردند. با استفاده از این معادلات جبری، متغیرهای وابسته مانند فشار، سرعت و غیره بدست می‌آیند.

### ۳- مدل فیزیکی

محفظه احتراق ورتکسی مورد نظر در این بررسی، محفظه‌ای استوانه‌ای با نه ورودی است که هشت عدد از آنان روی دیواره و یکی روی سقف محفظه قرار دارد. چهار ورودی مماسی

در پایین محفظه احتراق برای ورود اکسیژن گازی و چهار ورودی شعاعی در بالای محفظه احتراق برای ورود هیدروژن گازی و یک ورودی محوری روی سقف محفظه برای اکسیژن گازی می باشد. مبدا مختصات در مرکز ورودی محوری روی سقف محفظه احتراق در نظر گرفته شده و محفظه احتراق در سمت منفی محور  $y$  امتداد یافته است. در شکل ۱ ابعاد محفظه احتراق و در جدول ۱ مشخصات هندسی محفظه نمایش داده شده است.



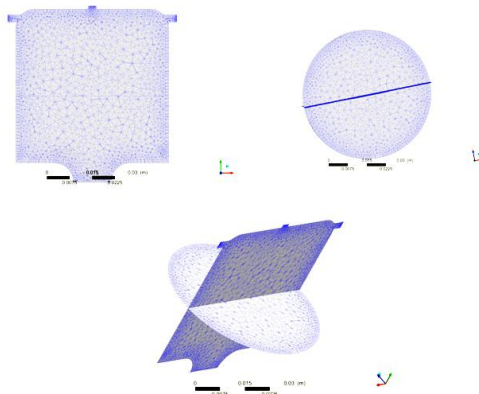
شکل ۱: ابعاد محفظه احتراق

جدول ۱: مشخصات هندسی محفظه

پارامتر	عنوان	مقدار	
$L_c$	طول محفظه	۵۰/۸ mm	۲ in
$D_c$	قطر محفظه	۵۰/۸ mm	۲ in
$L/D$	نسبت طول به قطر		۱
$L_t$	طول گلوگاه	۲/۵۴ mm	۰/۱ in
$D_t$	قطر گلوگاه	۱۲/۷ mm	۰/۵ in
$A_t$	مساحت گلوگاه	۱۲۶/۴۵۱۵ mm <sup>2</sup>	۰/۱۹۶ in <sup>2</sup>
CR	نسبت انقباض		۱۶
$L^*$	طول مشخصه	۸۱۲/۸ mm	۳۲ in
$D_e$	قطر خروجی نازل	۱۷/۹۵۷۸ mm	۰/۷۰۷ in
$A_e$	مساحت خروجی نازل	۲۵۳/۵۴۷۹ mm <sup>2</sup>	۰/۳۹۳ in <sup>2</sup>
$A_e/A_t$	نسبت مساحت		۲

### ۳-۱- شبکه بندی میدان حل

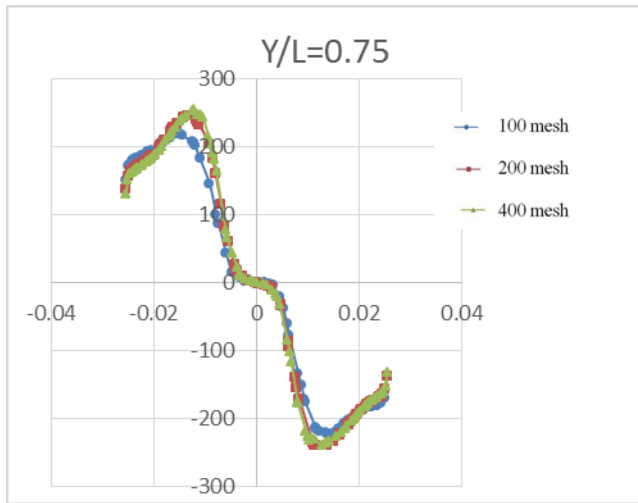
جهت انجام محاسبات عددی نیاز به شبکه بندی میدان حل می باشد. از آنجا که تعداد شبکه بر دقت حل و هزینه‌ی زمانی اثر مستقیم دارد، همواره تعداد شبکه‌ی بهینه مد نظر می باشد. جهت مدل سازی محفظه احتراق، به علت پیچیدگی میدان جریان در این نوع موتورها، ناگزیر به استفاده از شبیه سازی سه بعدی هستیم. شبکه بندی مورد استفاده، ترکیبی از شبکه های چند ضلعی بی سازمان شامل اشکال چهار وجهی و سه گوش و هرمی می باشند (شکل ۲). این نوع شبکه بندی در کنار دیواره ها ریزتر می شود و اندازه سلول های شبکه در بررسی استقلال از شبکه بطور یکنواخت ریز و درشت می شوند.



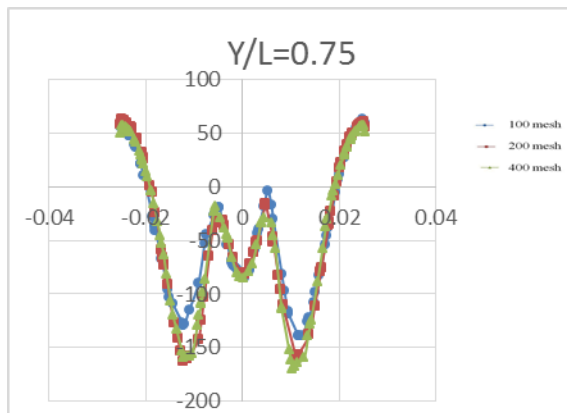
شکل ۲: شبکه بندی محفظه احتراق

برای حصول شبکه بندی اقتصادی و بررسی استقلال شبکه، سه شبکه با حدود ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۴۰۰ هزار المان تولید و درصد خطای منحنی سرعت مماسی و محوری روی خط قطری با مشخصه  $Y/L=0.75$  در هر کدام از شبکه بندی ها محاسبه شد. بررسی نمودارهای شکل ۳ و ۴ مشخص می کند که نمودارهای سرعت های بدست آمده از حل میدان جریان با ۲۰۰ و ۴۰۰ هزار شبکه نزدیکی و مقاربت دارد، در حالی که منحنی سرعت حاصل از میدان جریان با ۱۰۰ هزار شبکه بر دو منحنی دیگر منطبق نیست. بنابراین میدان جریان با ۲۰۰ هزار شبکه برای بررسی های بعدی در نظر گرفته می شود.





شکل ۳: نتایج مربوط به سرعت مماسی  $w$  در خط  $Y/L=0.75$



شکل ۴: نتایج مربوط به سرعت محوری  $v$  در خط  $Y/L=0.75$

#### ۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی در ورودی محفظه احتراق سرعت ثابت، در خروجی محفظه احتراق فشار ثابت، در دیواره‌ها، شرط مرزی دیواره بدون لغزش با دمای ثابت در نظر گرفته می‌شود. جریان سیال لزج و ویسکوز می‌باشد و دیواره‌ها بدون هیچ لغزش و بدون نفوذ جریان در نظر گرفته شده است.

سرعت ورودی هیدروژن گازی در نازل‌های شعاعی سوخت ۴۷۷ متر بر ثانیه و سرعت اکسیژن گازی ورودی از پنج نازل ۱۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نرخ اختلاط ۰.۶

نسبت تعادل ۱/۳۳ و احتراق به صورت کامل و غیر پیش مخلوط و بصورت تک مرحله می‌باشد.

دمای گازهای ورودی به محفظه ۳۶۳ کلوین و دمای هوای اطراف محفظه ۲۸۸ کلوین و فشار در خروجی محفظه ۱۰۰ psi فرض می‌شود. در نزدیکی دیواره ضریب انتقال حرارت محیط پیرامونی  $1000 \text{ w/m}^2\text{k}$  در نظر گرفته می‌شود.

## ۵- نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و حل عددی میدان جریان در محفظه احتراق یک موتور ورتکسی در شرایط تک فاز گازی با سوخت هیدروژن و اکسیدکننده اکسیژن و با فرض جریان غیرقابل تراکم پرداخته شده است. برای ساده کردن محاسبات، اثر نازل در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین خروجی نازل را به عنوان یک لوله مستقیم فرض می‌کنیم. جدول ۲ نتایج کسر جرمی، سرعت، عدد ماخ دما، فشار متوسط محفظه احتراق، حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

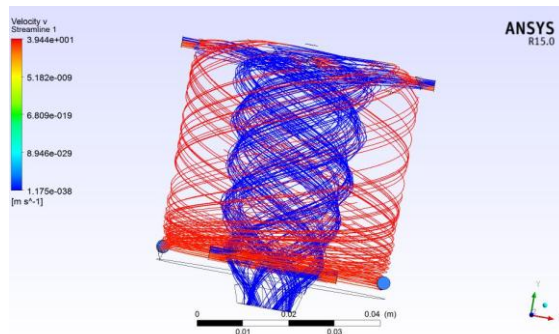
جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
متوسط کسر جرمی آب در خروجی	۰/۹۶۰۰۶
سرعت متوسط در خروجی	۱۶۳۳/۲۱ m/s
دمای متوسط در خروجی	۴۳۰۲/۱۷ K
عدد ماخ متوسط در خروجی	۰/۹۸۴۲۹۸
تابش متوسط در دیواره	$4/48561 \times 10^6 \text{ w/m}^2$
فشار متوسط در دیواره	$1/5125 \times 10^6 \text{ w/m}^2$
دمای متوسط در دیواره	۲۴۸۷/۴۴ K

## ۵-۱- بررسی پیمایش گردابه

شکل ۵ تغییرات گام خطوط جریان در محفظه احتراق را نشان می‌دهد. بررسی خطوط میدان جریان نشان دهنده جریان گردابه خارجی رو به سقف محفظه احتراق و جریان گردابه داخلی رو به خروجی است. جهت جریان در سقف محفظه تغییر کرده و شعاع گردابه خارجی در نزدیکی سقف و قبل از معکوس شدن جهت حرکت محوری، بتدریج کاهش می‌یابد.

لازم بذکر است گام خطوط جریان در طول محفظه احتراق تغییر می کند و در نزدیکی سقف بسیار کوچک می شود و در نیمه راه دارای حداکثر مقدار خود می باشد. این تأیید کننده افزایش شدت چرخش در نزدیکی سقف در مجاورت انژکتور سوخت است که باعث به حداکثر رسیدن میزان اختلاط و مخلوط شدن بهتر سوخت و اکسیدکننده می گردد. گردابه داخلی با افزایش زمان اقامت سوخت در محفظه، به توربولانس حاکم اجازه اختلاط بهتر سوخت و اکسیدکننده را می دهد. همچنین چرخش سبب می شود که مسیر حرکت قطرات بسیار طولانی تر از طول هندسی محفظه احتراق باشد و با تکمیل زودتر احتراق به طراح اجازه کاهش طول محفظه و وزن موتور را می دهد. گردابه خارجی نیز با خنک کاری دیواره به عنوان حائل حرارتی از اعمال بار حرارتی به دیواره جلوگیری کرده و دمای آن را کاهش می دهد. این موارد انعطاف پذیری بیشتری در زمینه خنک کاری و جنس بدنه به طراحان می دهد و منجر به کاهش وزن موتور می شود.

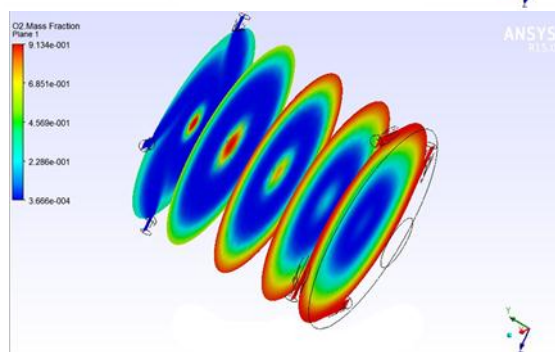
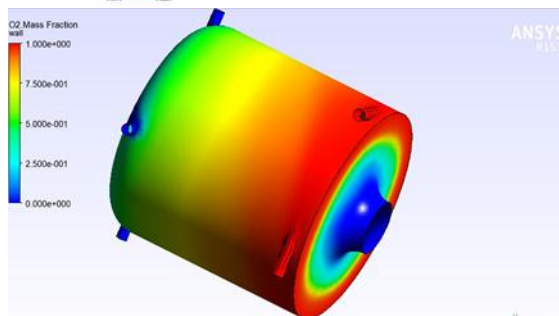
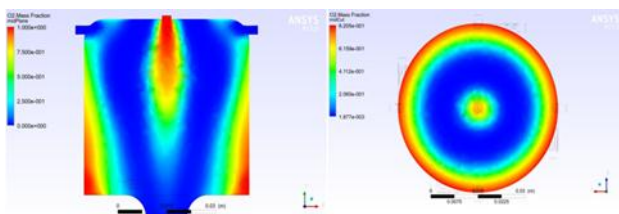


شکل ۵: تغییرات گام خطوط جریان در محفظه احتراق

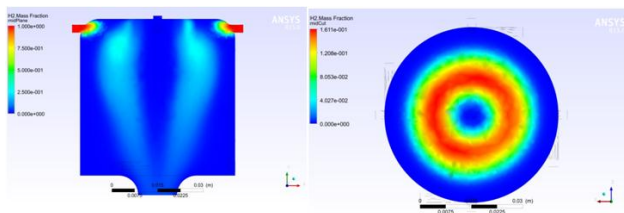
## ۵-۲- تغییرات کسر جرمی اکسیژن و هیدروژن در محفظه احتراق

شکل ۶ کانتور کسر جرمی اکسیژن را در محفظه احتراق نشان می دهد. همان طور که در شکل مشهود است در مجاورت پنج انژکتور ورودی اکسیژن، مقدار کسر جرمی اکسیژن بیشتر است. هرچه به محل انژکتور سوخت نزدیک می شویم به علت افزایش اختلاط سوخت و اکسیدکننده و احتراق سریع و تک مرحله ای در نظر گرفته شده، مقدار اکسیژن به حداقل می رسد.

شکل ۷ کانتور کسر جرمی هیدروژن در محفظه احتراق را نشان می دهد. همان طور که از شکل مشهود است سوخت هیدروژن به محض پاشش با گردابه اول تماس می گیرد و به علت اختلاط زیاد در آن ناحیه و احتراق تک مرحله ای به ناگهان دچار کاهش کسر جرمی سوخت می شود.



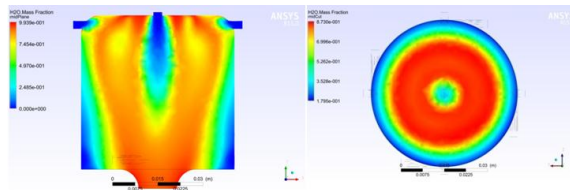
شکل ۶: کانتور کسر جرمی اکسیژن در محفظه احتراق



شکل ۷: کانتور کسر جرمی هیدروژن در محفظه احتراق

### ۵-۳- تغییرات کسر جرمی آب در محفظه احتراق

آب یکی از محصولات احتراق است و می‌تواند نشان‌دهنده محل احتراق نیز باشد. شکل ۸ کانتور کسر جرمی آب در محفظه احتراق را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر دید از بالا بوضوح دیده می‌شود کسر جرمی آب و شعله در محاصره گردابه خارجی است و از دیواره‌های محفظه احتراق فاصله دارد. این بدان معنی است که دیواره محفظه احتراق به دلیل گردش هوا و عدم تماس شعله با آن نیاز به خنک‌کاری ندارد.

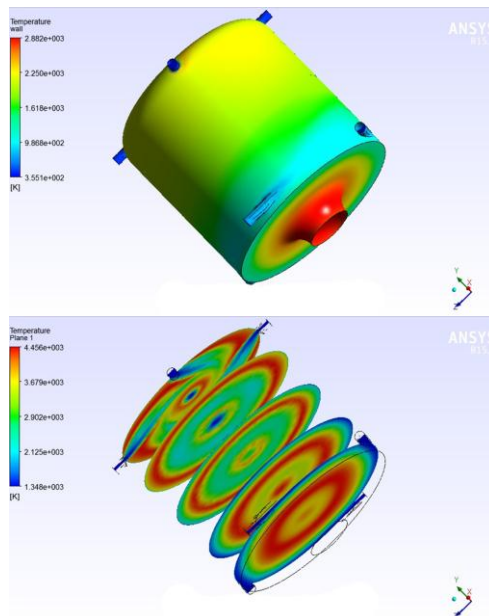


شکل ۸: کانتور کسر جرمی آب را در محفظه احتراق

### ۵-۴- توزیع دما در محفظه

یکی از مسائل اصلی در طراحی محفظه احتراق، دمای دیواره و روش‌های خنک‌کاری آن می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص است، در محفظه احتراق شبیه‌سازی شده، هرچه از لبه پله به سمت سقف می‌رویم، به علت افزایش نسبت سوخت به اکسیدکننده و افزایش چرخش و تراکم گام‌های گردابه، اختلاط و احتراق افزایش یافته و به تبع آن افزایش دمای دیواره را خواهیم داشت.

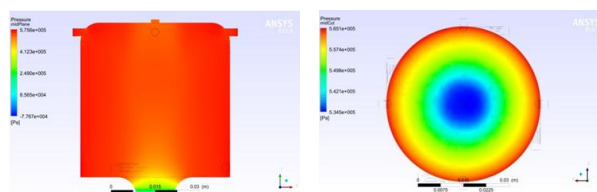
گردابه خارجی نیز با خنک‌کاری دیواره به عنوان حائل حرارتی از اعمال بار حرارتی به دیواره جلوگیری کرده و دمای آن را کاهش و خنک‌کاری را بهبود می‌بخشد. در نتیجه دست‌پراخان در انتخاب جنس دیواره بازتر بوده و می‌توان وزن موتور را کاهش داد.



شکل ۹: کانتور توزیع دما در محفظه احتراق

### ۵-۵- توزیع فشار در محفظه احتراق

شکل ۱۰ کانتور فشار در محفظه احتراق را نشان می‌دهد. با حرکت از دیواره‌ها به سمت مرکز محفظه احتراق فشار کاهش می‌یابد. ناحیه کم فشار داخلی به سبب وجود گردابه خارجی به وجود آمده و باعث کشش جریان به داخل و هدایت آن به سمت خروجی محفظه احتراق می‌شود. در یک موتور واقعی، افت فشار داخلی کمک فراوانی به مکش سوخت، اختلاط آن با اکسیدکننده و نگهداری گازهای احتراقی در این قسمت می‌کند.



شکل ۱۰: کانتور فشار در محفظه احتراق

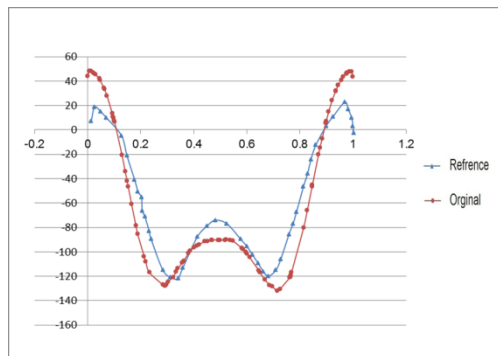
### ۵-۶- تغییرات سرعت محوری (v) در محفظه احتراق

سرعت محوری در برخی گره‌های داخلی به صفر می‌رسد. محل این گره‌ها منطبق با محل جدایش دو گردابه یا منتل می‌باشد. محل قرارگیری منتل در  $0.7$  شعاع محفظه قرار دارد. شکل ۱۱ سرعت محوری در محفظه احتراق را در  $y/l=0.5$  نشان می‌دهد. در این نمودار نتایج شبیه‌سازی‌های آقای فنگ نیز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود سرعت محوری حاصل از شبیه‌سازی با یافته‌های فنگ تطابق مطلوبی دارد. به خاطر اینکه آقای فنگ برای ساده‌سازی، انحنای خروجی محفظه را حذف کردند برخی تفاوت‌ها بخصوص نزدیک به سقف محفظه بین نتایج وجود دارد.

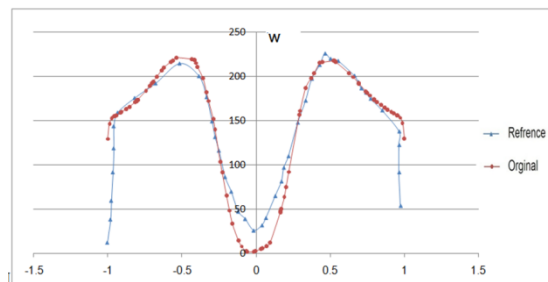
### ۵-۷- تغییرات سرعت مماسی (w) در محفظه احتراق

بررسی خطوط جریان نشان دهنده‌ی یک گردابه اجباری در مرکز هسته و یک گردابه آزاد در اطراف هسته است. با افزایش شعاع در گردابه مرکزی سرعت مماسی بیشتر می‌شود و با ورود به گردابه آزاد خارجی و دور شدن از مرکز سرعت مماسی کاهش می‌یابد. همچنین ماکزیمم سرعت مماسی از دو برابر سرعت مماسی ورودی تجاوز نمی‌کند.

شکل ۱۲ سرعت محوری در محفظه احتراق را در  $y/l=0.5$  نشان می‌دهد. در این نمودار نتایج شبیه‌سازی‌های آقای فنگ نیز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود سرعت محوری حاصل از شبیه‌سازی با یافته‌های فنگ تطابق خوبی دارد.



شکل ۱۱: نمودار سرعت محوری در  $y/l=0.5$



شکل ۱۲: نمودار سرعت مماسی در  $y/l=0.5$

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به صورت عددی میدان جریان در داخل محفظه احتراق یک موتور گردابه‌ای خاص در شرایط تک فاز گازی با سوخت هیدروژن و اکسیدکننده اکسیژن و با فرض جریان غیرقابل تراکم و صرف نظر از اثر نازل، بررسی شده است. محفظه احتراق ورتکسی مورد نظر، محفظه‌ای استوانه‌ای با نه ورودی است که چهار ورودی مماسی در پایین محفظه احتراق روی دیواره برای اکسیژن گازی و چهار ورودی شعاعی در بالای محفظه احتراق روی دیواره برای هیدروژن گازی و یک ورودی محوری روی سقف محفظه برای اکسیژن گازی می‌باشد. با بررسی شبیه‌سازی و حل عددی میدان جریان در محفظه احتراق نتایج زیر بدست می‌آید.

- ۱- بررسی خطوط میدان جریان نشان‌دهنده جریان گردابه خارجی رو به سقف محفظه احتراق و جریان گردابه داخلی رو به خروجی است. شدت چرخش در نزدیکی سقف در مجاورت انژکتور سوخت افزایش می‌یابد که باعث به حداکثر رسیدن میزان اختلاط و مخلوط شدن بهتر سوخت و اکسیدکننده می‌گردد.
- ۲- در محفظه احتراق، شعله در محاصره گردابه خارجی است. در نتیجه دیواره محفظه احتراق به دلیل گردش هوا و عدم تماس شعله با آن نیاز به خنک‌کاری ندارد.
- ۳- با نزدیک شدن به سقف محفظه احتراق، به علت افزایش نسبت سوخت به اکسیدکننده و افزایش چرخش و تراکم گام‌های گردابه، اختلاط و احتراق افزایش یافته و به تبع آن افزایش دمای دیواره را خواهیم داشت.
- ۴- با نزدیک شدن به مرکز محفظه احتراق، فشار کاهش می‌یابد. ناحیه کم فشار داخلی به سبب وجود گردابه خارجی به وجود آمده و باعث کشش جریان به داخل و هدایت آن به سمت خروجی محفظه احتراق می‌شود.
- ۵- ماکزیمم سرعت مماسی از دو برابر سرعت مماسی ورودی تجاوز نمی‌کند.



## ۷- منابع

- [1] Harvey, J. K., "Some Observations of the Vortex Breakdown Phenomenon," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 14, 1962, pp. 585-592.
- [2] Bloor, M. I. G., and Ingham, D. B., "Theoretical Investigation of the Flow in a Conical Hydrocyclone", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 51, pp. 36-41, 1973.
- [3] Kelsall, D. F., "A Study of Motion of Solid Particles in a Hydraulic Cyclone," *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 30, pp. 87-103, 1952.
- [4] Smith, J.L. "An Experimental Study of the vortex in the Cyclone Separator," *Journal of Basic Engineering*, vol. 84, pp. 609-618, Dec. 1962.
- [5] Syred, N., Beer, J. M., 1974, "Combustion in Swirling Flows: A Review", *Combustion and Flame*, Vol. 23, 143-201.
- [6] Faler, J. H., and Leibovich, S., "Disrupted States of Vortex Flow and Vortex Breakdown," *Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 9, 1977, pp. 1385-1400.
- [7] Reydon, R. F., Gauvin, W. H., 1981, "Theoretical and experimental studies of confined vortex flow", *AIAA Journal of Chemical Engineering*, Vol. 59, pp. 14-23.
- [8] Chiaverini, M. J., Malecki, M. J., Sauer, J. A., Knuth, W. H., and Majdalani, J., "Vortex Thrust Chamber Testing and Analysis for O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> Propulsion Applications," *AIAA Paper 2003-4473*, July 2003.
- [9] Fang, D., Majdalani, J., and Chiaverini, M. J. (2003) "Simulation of the cold-wall swirl driven combustion chamber", *AIAA-2003-5055*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, pp. 1-9
- [10] Vyas, A. B., Majdalani, J. and Chiaverini, M. J. (2003) "The bidirectional vortex. part1:an exact inviscid solution", *AIAA-2003-5052*, 39th AIA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. pp. 1-16.
- [11] Vyas, A. B., Majdalani, J. and Chiaverini, M. J. (2003) "The bidirectional vortex. part2: viscous core corrections", *AIAA-2003-5053*, 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, pp. 1-9.

[12] Majdalani, J., Sjoerd, W., "On the bidirectional vortex and other similarity solutions in spherical coordinates", July 2006.

[13] Jamali, M., Saidi, M. H., Ghafourian, A., Mozafari, A. A., "Analytical and Numerical Investigation of Bidirectional Vortex Flow," July 2006.

[14] Ghafourian, A., Saidi, M.H., 2007, "Effect of Vortex Flow on Heat Transfer to Combustion Chamber Wall" ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 129, 622 – 624.

[15] Dehghani, S. R., Saidi, M. H., Mozafari, A. A. and Ghafourian, A. (2009) "Particle trajectory in a bidirectional vortex flow", Journal of Particulate Science and Technology, In Press.