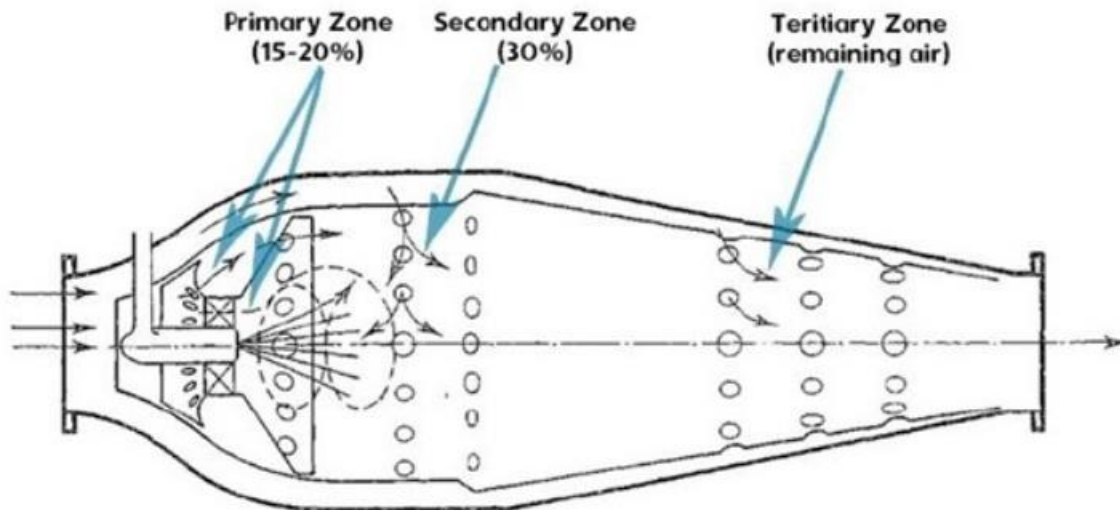


## بررسی عددی و شبیه سازی احتراق در محفظه‌ی احتراق can type

### ۱. مقدمه و تعریف مساله

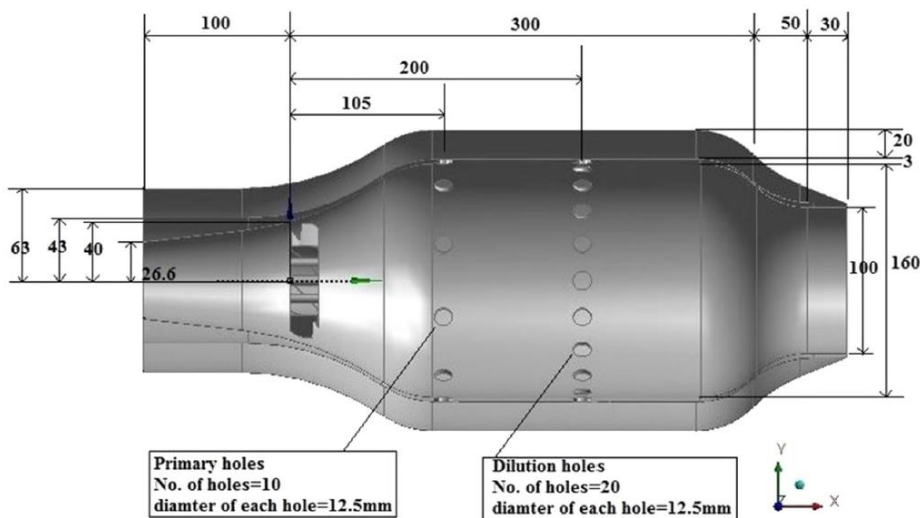
محفظه احتراق بخشی از موتور احتراق داخلی است که در آن احتراق مخلوط هوا و سوخت انجام می شود. که در واقع یک استوانه بسته است. محفظه احتراق به عنوان کامبوستر Combustor نیز شناخته می شود. محفظه احتراق موتور رفت و برگشتی دارای پیستون است که این پیستون در داخل محفظه رفت و برگشت می کند تا مخلوط هوا و سوخت را فشرده کند. همانطور که مخلوط فشرده می شود، یک شمع در موتور جرقه ایجاد می کند و مخلوط هوا و سوخت فشرده شده را مشتعل می کند. فرآیند احتراق مخلوط هوا و سوخت در داخل محفظه احتراق، دما و فشار داخلی محفظه را به شدت افزایش می دهد. پس از فرآیند احتراق، پیستون مخلوط احتراق را از محفظه خارج می کند. سیلندر احتراق شامل قطعات زیادی مانند پمپ سوخت، نازل های سوخت، شمع و پیستون است.

محفظه احتراق توربین گاز، بین کمپرسور و توربین قرار دارد و مجموعاً به عنوان یک موتور جهت سوزاندن سوخت و افزایش دمای هوای ورودی شناخته می شود. احتراق تقریباً در یک فشار ثابت انجام می شود. تمام محفظه احتراق توربین های گاز با یک تابع و پایه مشخص کار می کنند. آنها دمای گازهای با فشار بالا را افزایش می دهند. محفظه احتراق توربین های گازی درصد کمی (تقریباً ۱۰٪) از هوای ورودی را جهت احتراق استفاده می کند و بیشتر هوای ورودی جهت خنک کاری و اختلاط مورد استفاده قرار می گیرد. محفظه های احتراق جدید جهت خنک کاری از گردش بخار استفاده می کنند. محفظه احتراق یکی از مهم ترین قسمت های موتور است. وظیفه اصلی محفظه احتراق سوزاندن مخلوط هوا و سوخت و تولید گازهای با فشار و دمای بالا است.



شکل ۱- شماتیک نوعی محفظه‌ی احتراق در توربین گازی

در پژوهش حاضر به بررسی عددی و شبیه سازی محفظه‌ی احتراق دارای سوراخ‌های پاششی اصلی و رقیق کننده به قطر ۱۰ میلی‌متر و زاویه‌ی همگرایی ۴۵ درجه و همچنین پره‌های چرخان تعبیه شده در فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر از ورودی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ توسط نرم افزار تجاری انسیس فلونت پرداخته شده است. سوخت مورد نظر نفت سفید با فرمول شیمیایی  $C_{12}H_{23}$  می‌باشد. که از فاصله‌ی ۵ میلی‌متر قبل تر از پره‌ی چرخان در دامنه پاشش می‌شود. مدل توربولانسی مورد استفاده در این پژوهش به پیشنهاد مطالعه‌ی Shrivastava و همکاران [۱] RSM (Reynolds stress model) می‌باشد و همچنین مدل احتراق مورد استفاده در این پژوهش non premixed می‌باشد. پس از شبیه سازی عددی نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعه‌ی Shrivastava و همکاران [۱] مقایسه می‌شود.

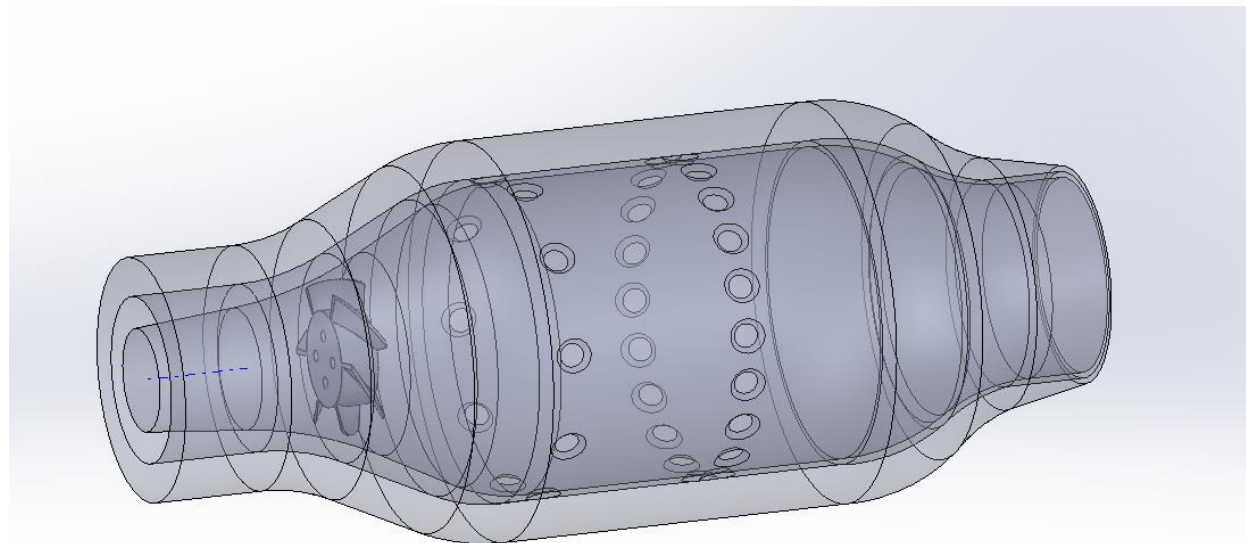


شکل ۲- شماتیک محفظه‌ی احتراق مورد بررسی در پژوهش حاضر

## ۲. مراحل شبیه سازی در انسیس فلونت

- طراحی هندسه

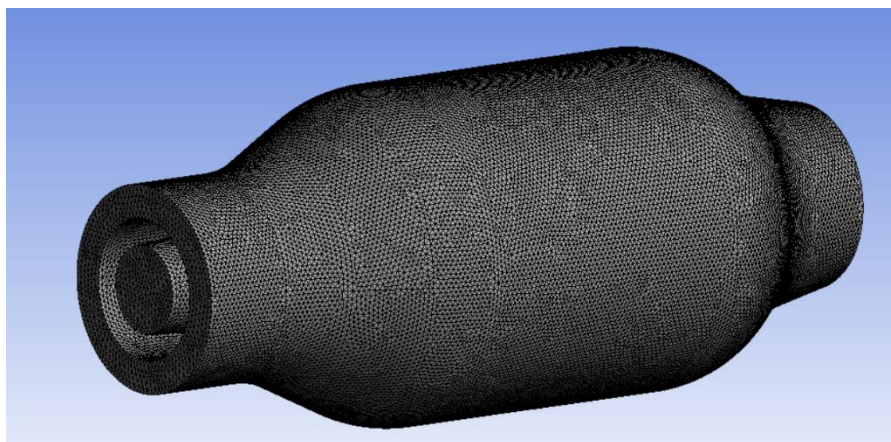
در ابتدای امر مطابق ابعاد و شماتیک ارائه شده در بخش قبل به طراحی هندسه‌ی محفظه‌ی احتراق به صورت سه بعدی در نرم افزار سالیدورک پرداخته می‌شود. در شکل ۳ نمایی از هندسه‌ی طراحی شده مشاهده می‌شود.



شکل ۳- نمایی از هندسه‌ی طراحی شده در نرم افزار سالیدورک

- شبکه بندی

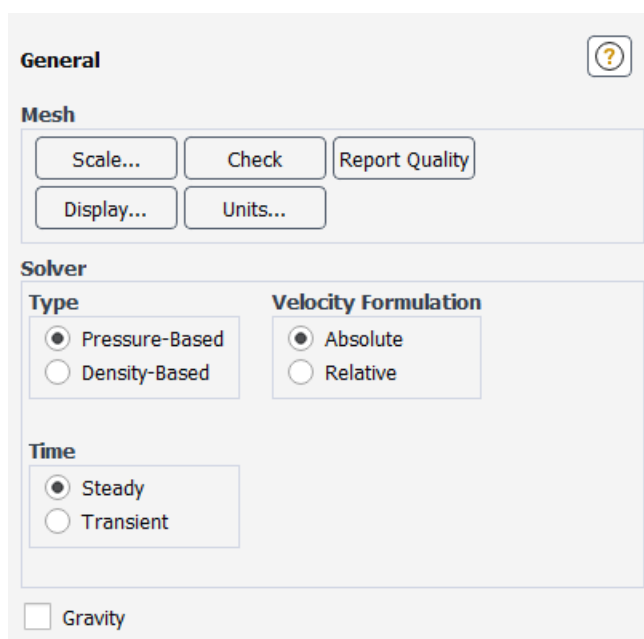
پس از طراحی هندسه محفظه‌ی احتراق با دامنه‌های سیالاتی اطراف آن، به شبکه بندی دامنه‌ی سیالاتی هندسه توسط نرم افزار انسیس مشینگ پرداخته خواهد شد. در ابتدای امر در قسمت physics preference به دلیل استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی جهت شبیه سازی و تحلیل پژوهش حاضر گزینه CFD انتخاب می‌شود و نرم افزار حلگر فلونت تعیین خواهد شد. سپس در قسمت element size اندازه‌ی المان‌های شبکه بندی ۳/۲۵ میلیمتر با ضریب رشد ۱/۲ در نظر گرفته خواهد شد و جهت افزایش دقت شبیه سازی در نزدیکی پره‌ی چرخان تعبیه شده در ۱۰۰ میلیمتری ورودی با متد face sizing تراکم شبکه بندی در آن قسمت مذکور افزایش داده می‌شود. با اعمال تنظیمات فوق مشاهده می‌شود شبکه بندی با المان‌هایی بی سازمان یا مثلثی در دامنه‌ی سیالاتی درون محفظه‌ی احتراق جت ایجاد می‌شود که تعداد آن برابر ۱۹۰۵۰۲۰ المان می‌باشد. شکل زیر نمایی از شبکه بندی پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.



شکل ۴- نمایی از شبکه بندی در پژوهش حاضر

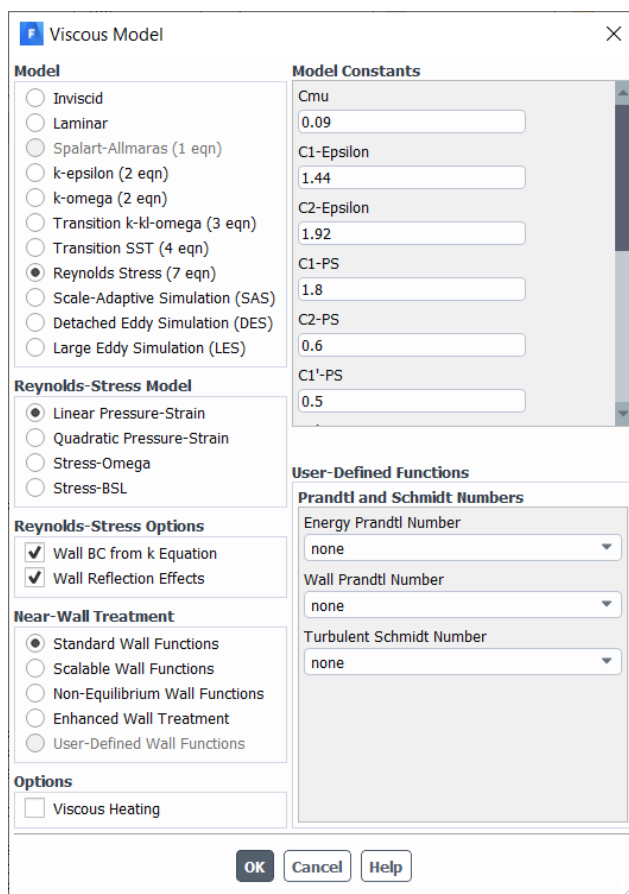
#### • شبیه سازی در انسیس فلونت

پس از شبکه بندی، هندسه و شبکه بندی ایجاد شده در نرم افزار انسیس فلونت بارگذاری می شود. در ابتدا در قسمت general به دلیل فرض تراکم ناپذیری جریان سیالات حلگر فشار مینا انتخاب خواهد شد و در بخش time حل مستقل از زمان یا پایا (steady) در نظر گرفته می شود. قابل ذکر است که از گرانش در این مساله صرف نظر می شود.



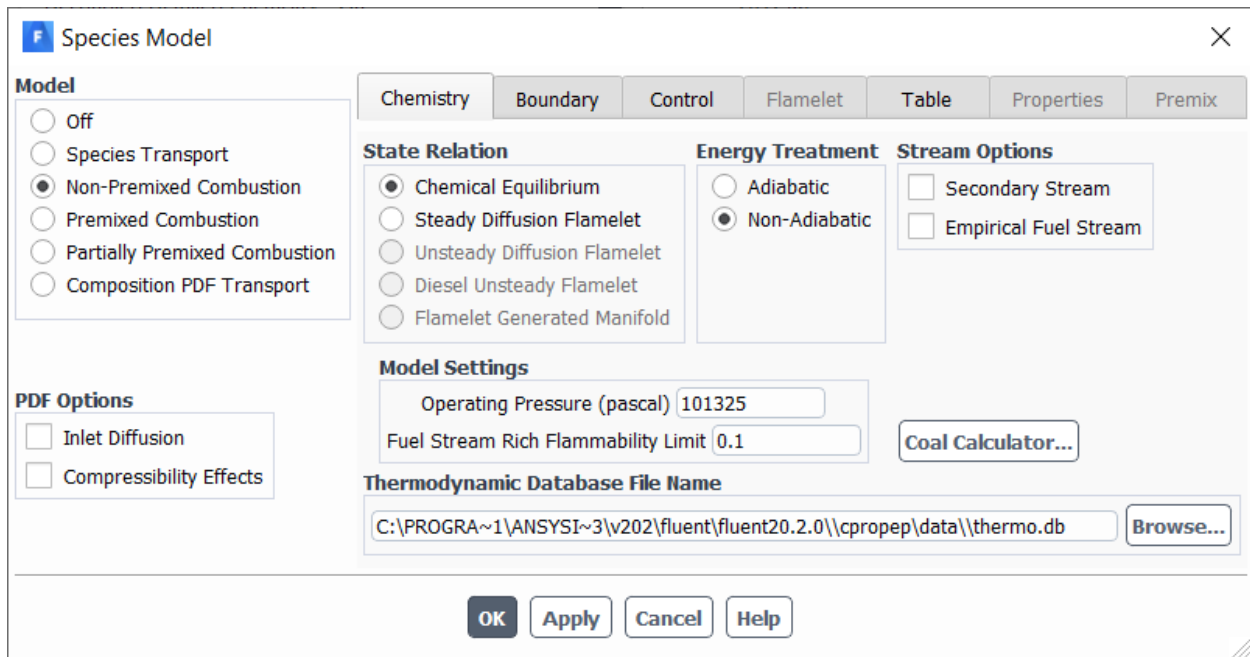
شکل ۵- تنظیمات قسمت general

در ادامه در قسمت models به تعیین مدل آشفستگی جریان سیالات در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق (RMS) و فعال نمودن معادلات انرژی و همچنین تعیین مدل احتراق (non premixed) مطابق شکل زیر پرداخته می شود.



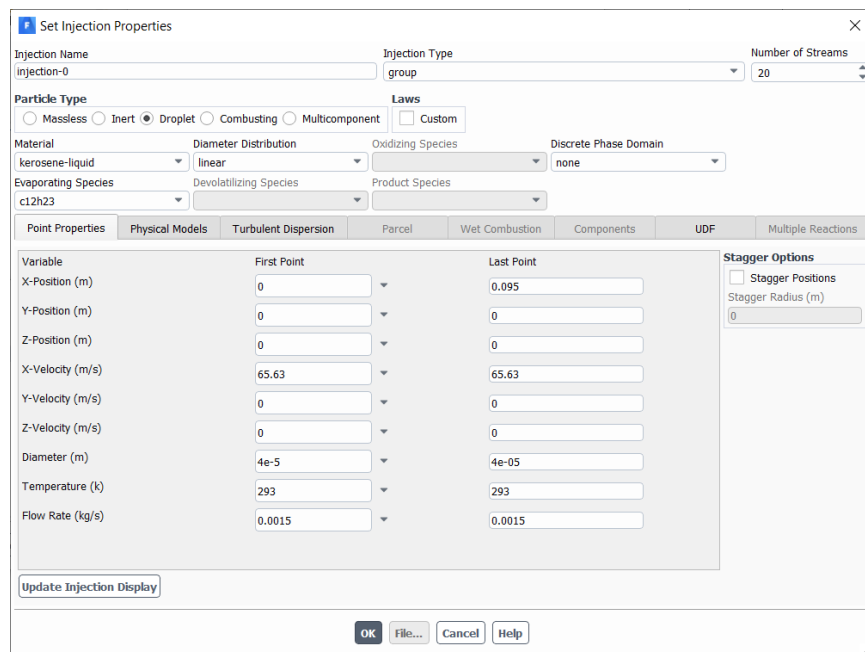
شکل ۶- تعیین مدل آشفتگی جریان

در شکل ۷ تنظیمات قسمت تعیین مدل احتراق مشاهده می‌شود. سوخت مورد نظر  $C_{12}H_{23}$  میباشد که با دمای  $293/15$  درجه‌ی کلوین وارد دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق شده و با هوا که شامل  $23$  درصد اکسیژن و حدود  $77$  درصد نیتروژن می‌باشد وارد واکنش شیمیایی شده و احتراق صورت می‌گیرد. قابل ذکر است که دمای هوا موجود در محفظه‌ی احتراق  $450$  درجه‌ی کلوین در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۷- تعیین مدل احتراق

برای وارد شدن سوخت به محفظه‌ی احتراق از مدل DPM جهت پاشش آن در فاصله‌ی ۹۵ میلیمتری از ورودی استفاده شده است. ورودی سوخت به صورت قطرات ریز مایع به قطر  $0.04$  میلیمتر و سرعت  $65/63$  متر بر ثانیه و دبی جرمی  $0.015$  کیلوگرم بر ثانیه و دمای  $293/15$  درجه‌ی کلون می‌باشد. در شکل ۸ دیتاهای پاشش سوخت مشاهده می‌شود.



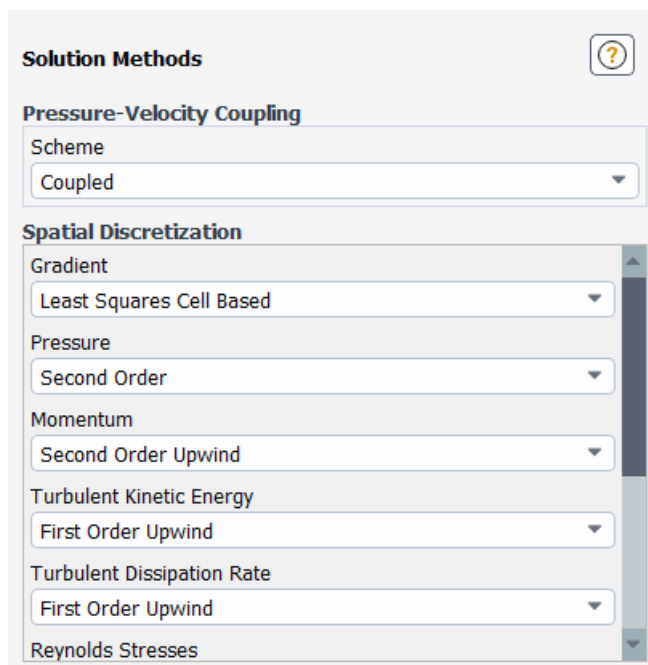
شکل ۸- تعیین پاشش سوخت در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق

پس از تعریف مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر که با اعمال آن‌ها معادلات حاکم بر مساله مشخص می‌شود، به تعیین شرایط مرزی در قسمت boundary condition مطابق مطالعه‌ی Shrivastava و همکاران [۱] پرداخته خواهد شد. مرزهای ورودی هوا به محفظه‌ی احتراق از نوع mass flow inlet می‌باشد که دارای دبی ۰/۶ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۴۵۰ درجه‌ی کلون می‌باشد. مرز خروجی دامنه‌ی از نوع pressure outlet در نظر گرفته خواهد شد که مقدار gauge pressure برای آن صفر در نظر گرفته می‌شود، بدین معنا که در خروجی فشار جو وجود دارد. دیواره‌های دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق و همچنین دیواره‌ی پره‌ی چرخان از نوع wall در نظر گرفته شده که همگی شرط هدم لغزش و آدیاباتیک ( $heat\ flux=0$ ) دارند.

شکل ۷- تعیین دیتاهای مرز ورودی دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق

شکل ۸- تعیین دیتاهای مرز خروجی دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق

پس از اعمال شرایط مرزی، در قسمت **methods** به تعیین الگوریتم حل پرداخته خواهد شد که در پژوهش حاضر الگوریتم **couple** استفاده شده است و الگوریتم‌های گسسته سازی معادلات مومنتوم، انرژی و آشفتگی و ... مطابق شکل زیر در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۷- تعیین الگوریتم حل

در ادامه در قسمت **monitor** به تعریف پارامترهای فشار دینامیکی خروجی سیال هوا از دامنه‌ی سیالاتی و همچنین دمای خروجی سیالات از دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق و همچنین میزان کسر جرمی متوسط گاز کربن دی اکسید حاصل از احتراق جهت نمودار شدن آن‌ها همزمان با حل برای بررسی روند همگرایی مساله انتخاب می‌شود. در آخر پس از مقدار دهی اولیه به روش هیبرید در قسمت **initialization** به شروع حل و شبیه سازی پس از تعیین گام زمانی و تعداد آن و همچنین تعداد تکرارها در هر گام زمانی در بخش **run calculation** پرداخته خواهد شد.

### ۳. آزمون استقلال از شبکه بندی

برای آزمون استقلال از شبکه بندی در پژوهش حاضر از دمای خروجی متوسط سیالات از دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق برای سه شبکه بندی با تعداد المان‌های مختلف استفاده شده است. براساس جدول ۱ مشاهده می‌شود که شبکه بندی دوم با تعداد المان کمتر جهت افزایش سرعت محاسبات و همچنین کمترین درصد تغییرات در حدود ۱/۰۲٪، شبکه بندی بهینه برای شبیه سازی حاضر می‌باشد.

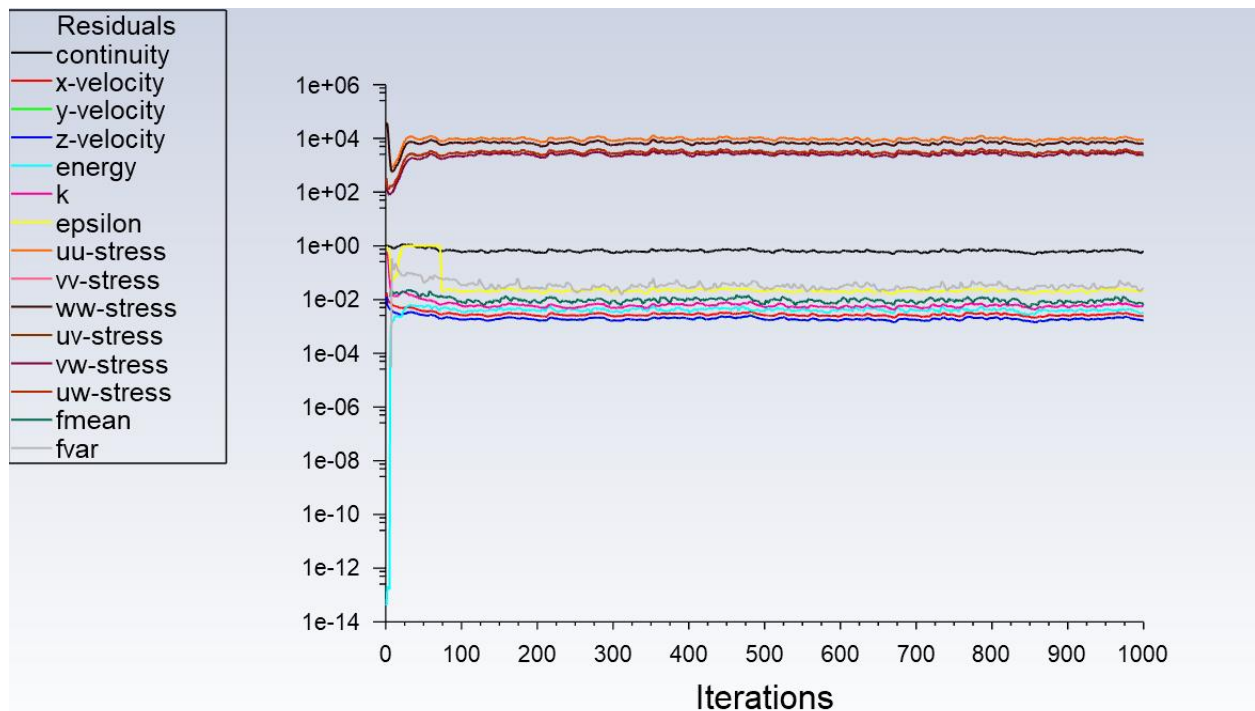


جدول ۱- آزمون استقلال از شبکه بندی

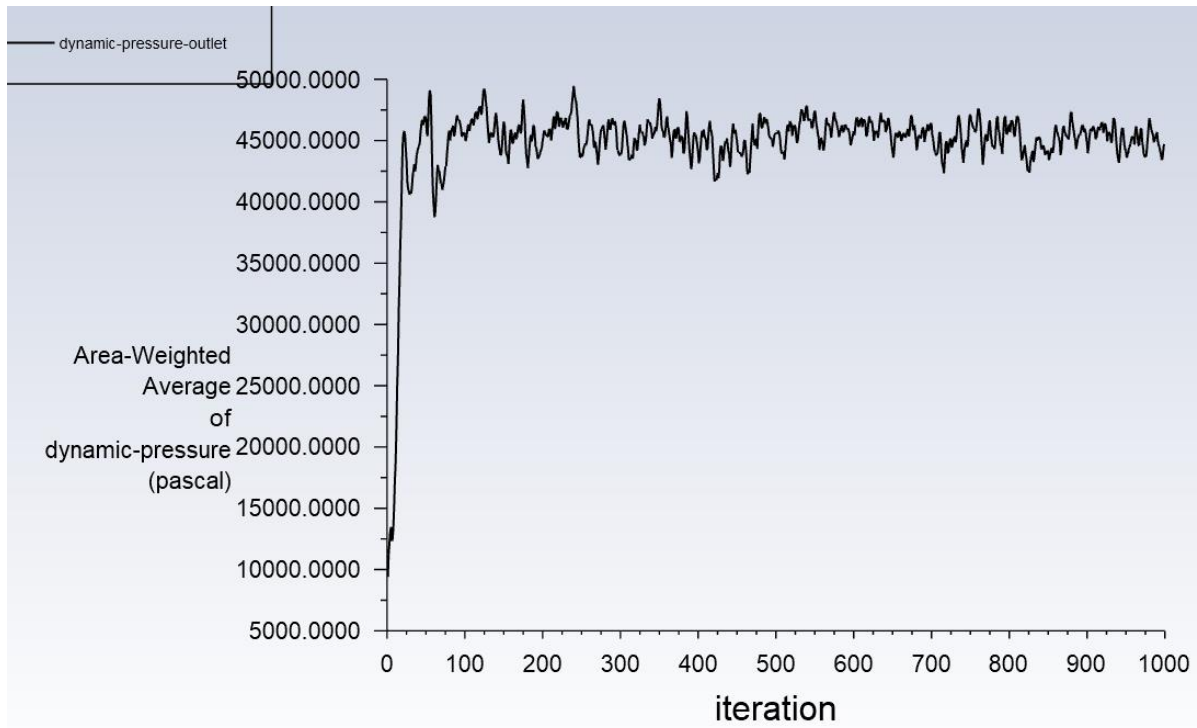
درصد تغییرات %	دمای متوسط خروجی هوا از سالن A	تعداد المانها
۴/۱	۱۲۵۵/۳۲۶۵	۱۵۵۳۲۰۲
۱/۰۲	۱۳۰۶/۷۳۸۸	۱۹۰۵۰۲۰
-	۱۳۲۰/۰۶۶۱	۲۳۲۴۱۴۴

#### ۴. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی

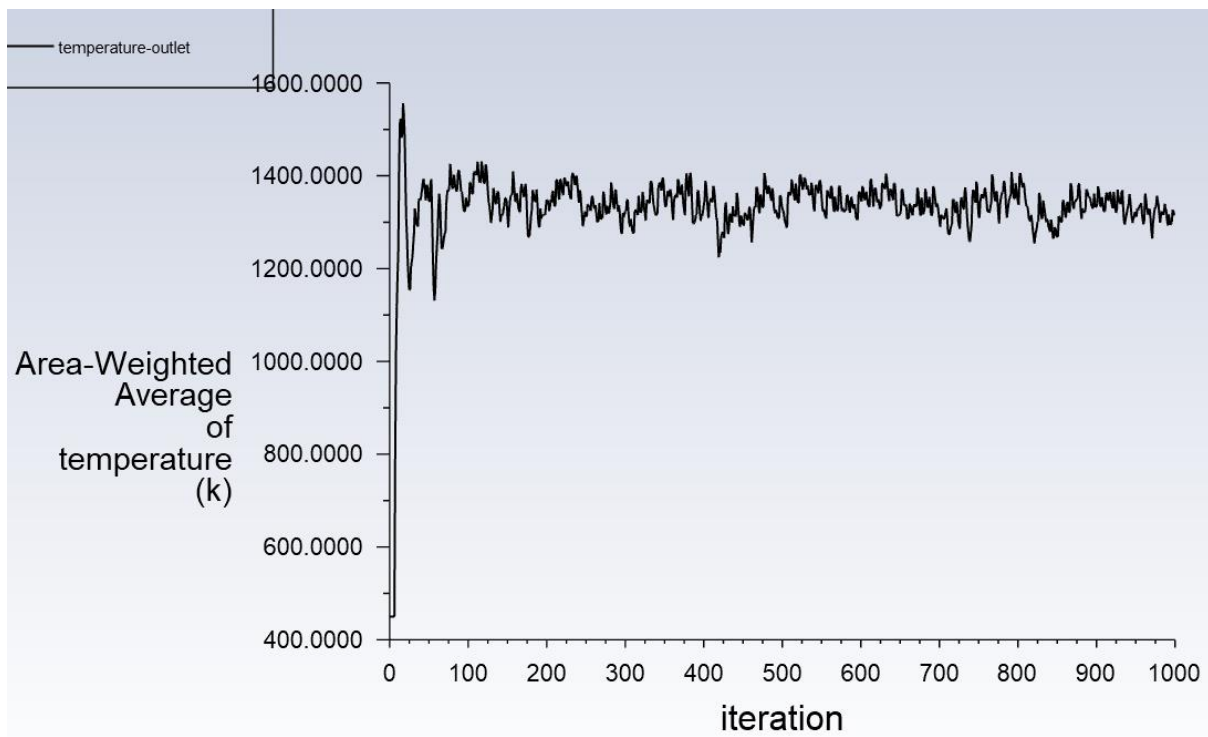
در شکل های زیر نمودار همگرایی باقیمانده ها و همچنین نمودار همگرایی فشار دینامیکی متوسط خروجی هوا از دامنه ی سیالاتی و همچنین نمودار همگرایی دمای متوسط خروجی از دامنه ی سیالاتی محافظه ی احتراق و همچنین میزان کسر جرمی متوسط کربن دی اکسید از خروجی محافظه ی احتراق، پس از حدود ۱۰۰۰ تکرار (iteration) مشاهده می شود. همانطور که مشاهده می شود پس از حدود ۱۰۰۰ تکرار نتایج نمودارهای همگرایی به یک روند نوسانی تقریباً ثابتی رسیده اند و با افزایش تکرار در آنها تغییرات محسوسی در آنها مشاهده نخواهد شد که در نتیجه ی آن می توان همگرایی حل حاضر را استنتاج نمود.



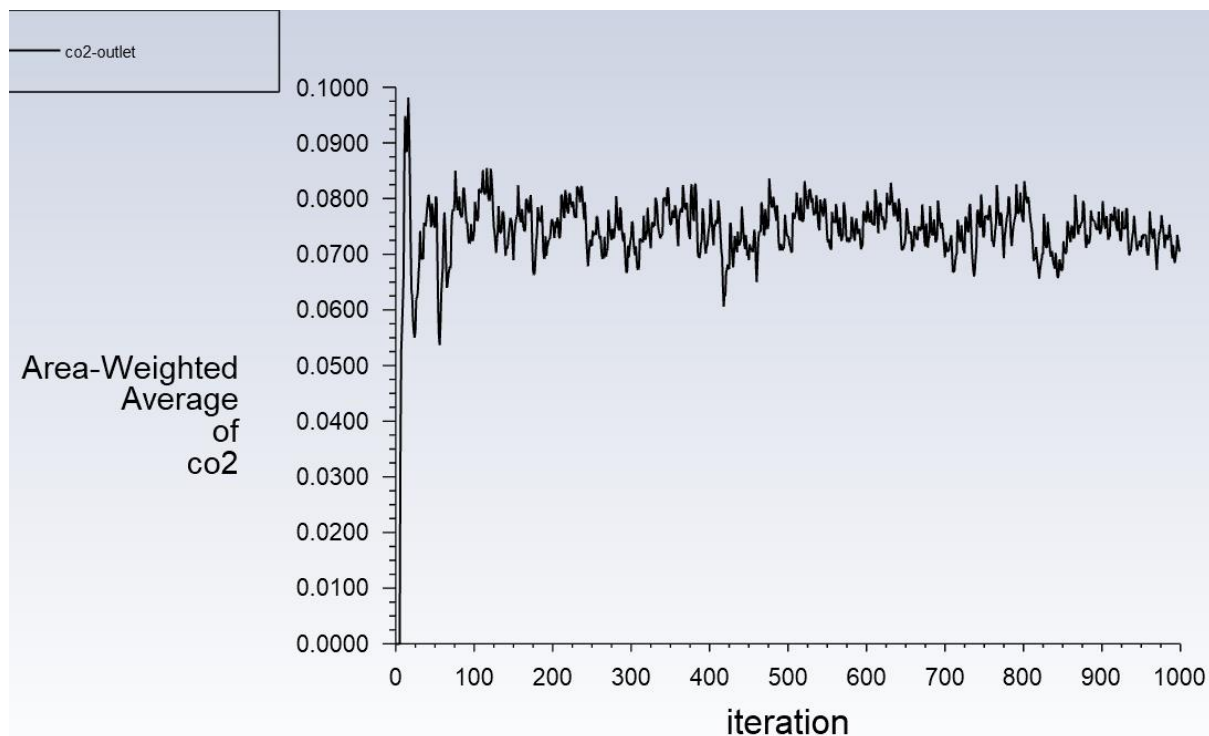
شکل ۸- نمودار همگرایی باقیمانده ها



شکل ۹- نمودار همگرایی فشار دینامیکی خروجی سیالات از دامنه‌ی محافظه‌ی احتراق

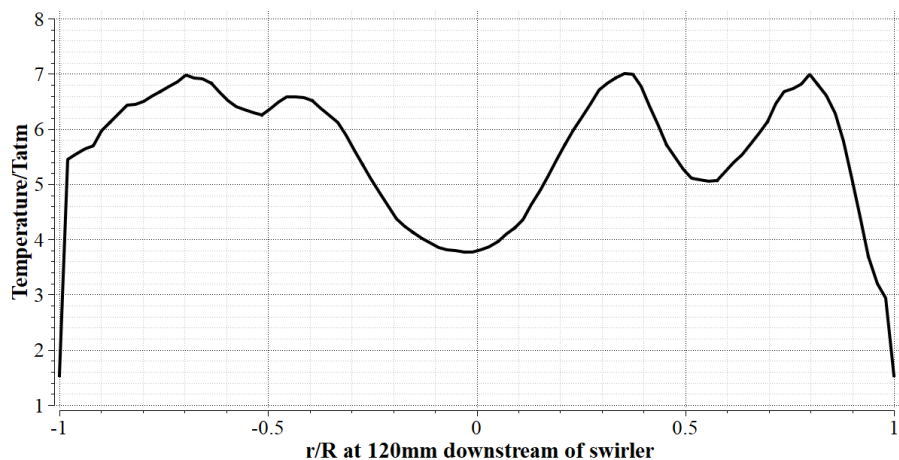


شکل ۱۰- نمودار همگرایی دمای متوسط خروجی سیالات از دامنه‌ی محافظه‌ی احتراق

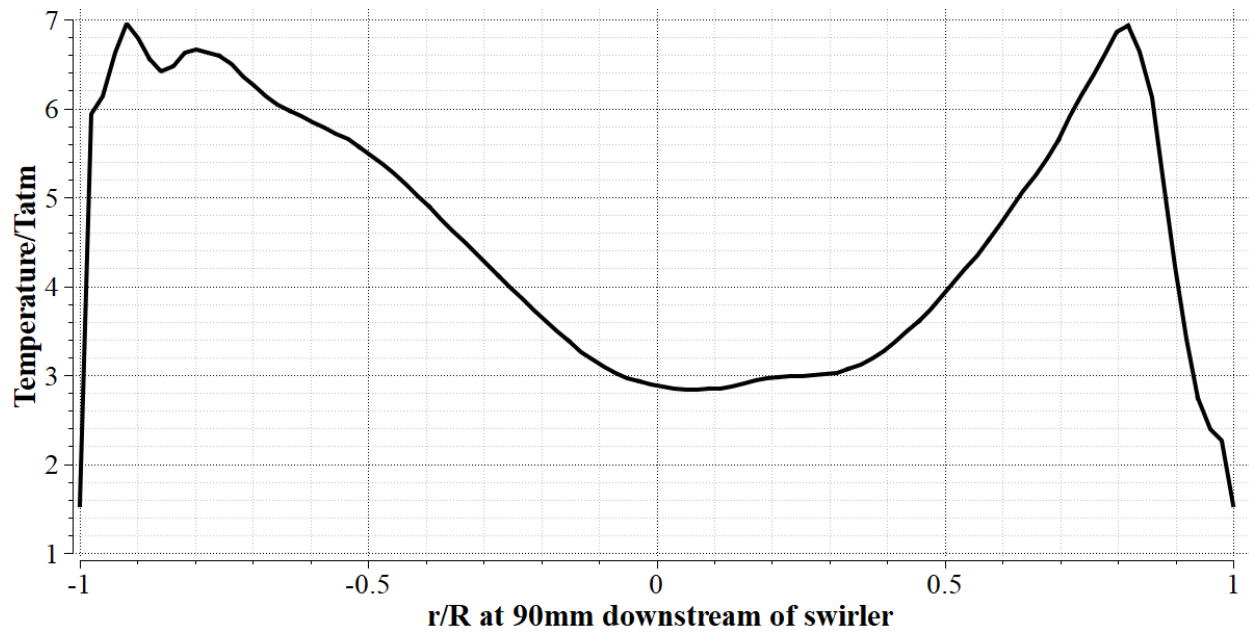


شکل ۱۱- نمودار همگرایی کر جرمی خروجی متوسط کربن دی اکسید سیالات از دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق

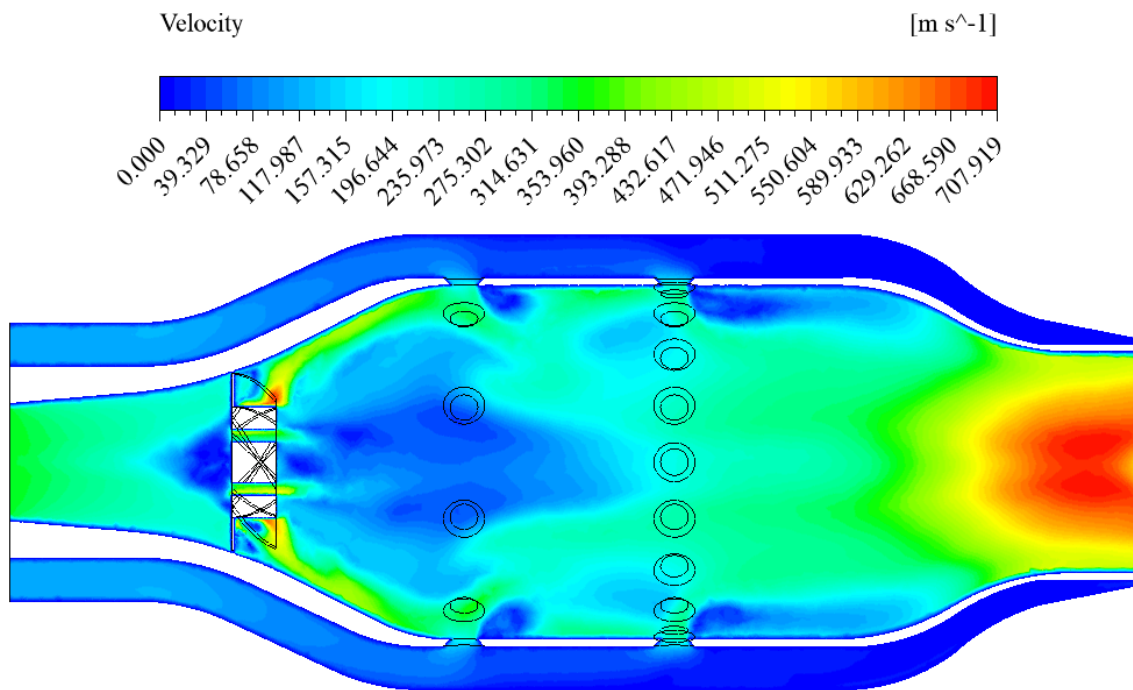
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودار پروفیل دمای بی بعد ( $Temperature/T_{atm}$ ) در فواصل ۱۵۰ و ۹۰ میلی‌متر از پره‌ی چرخان محاسبه شده است. همانطور که در نتایج نمودارهای زیر مشاهده می‌شود تطابق نزدیکی با نتایج مطالعه‌ی عددی Shrivastava و همکاران [۱] وجود دارد. در شکل‌های ۱۴ تا انتها نتایج کانتورهای سرعت و دما و فشار و بردارهای سرعت و خطوط جریان در محفظه‌ی احتراق مورد مطالعه توسط نرم افزار انسیس فلونت محاسبه شده است.



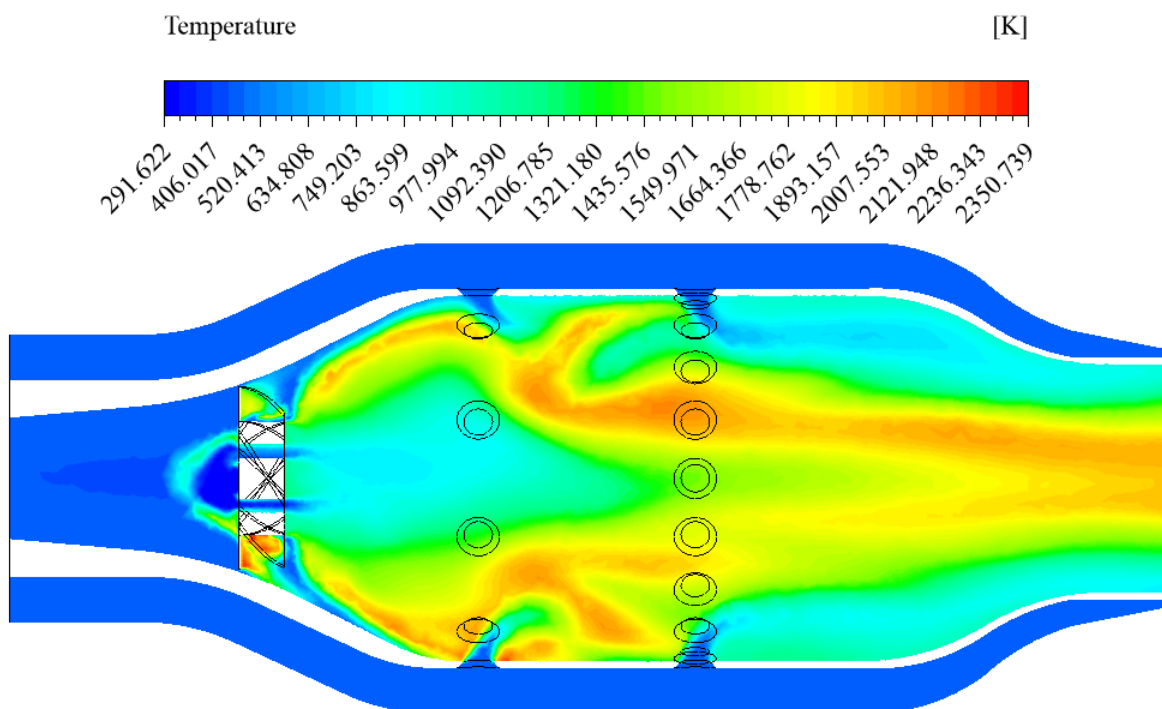
شکل ۱۲- نمودار پروفیل دمای بی بعد در راستای شعاعی محفظه‌ی احتراق در فاصله‌ی ۱۵۰ میلی‌متر از پره‌ی چرخان



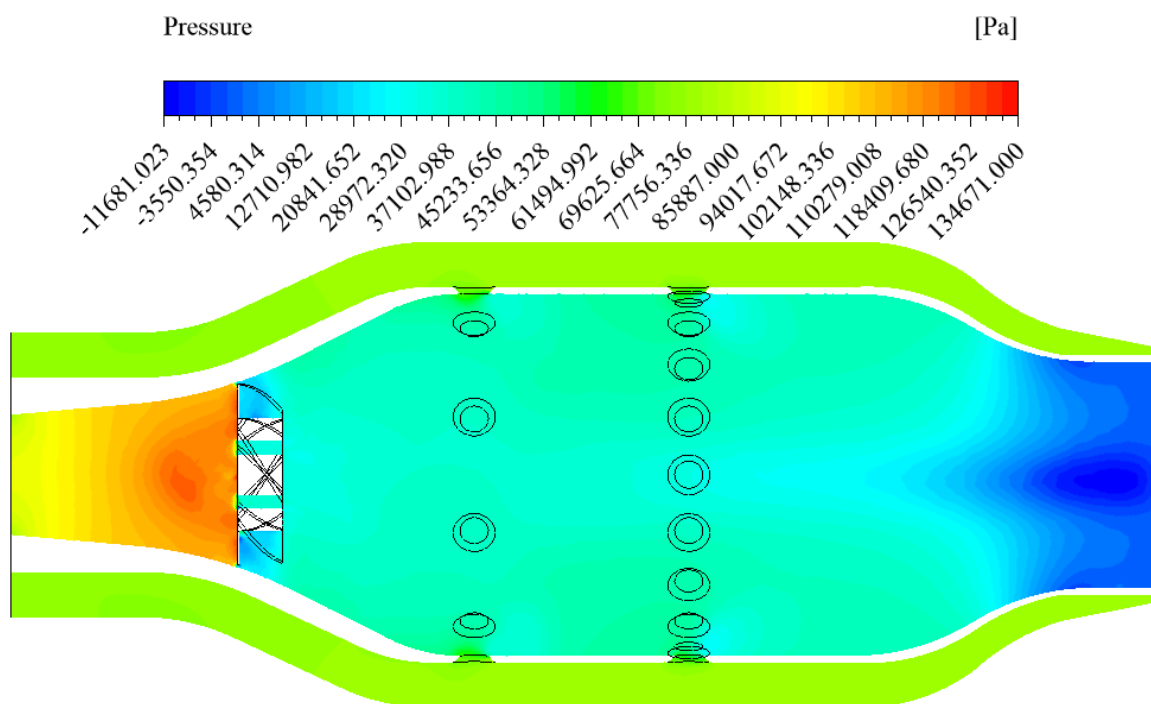
شکل ۱۳- نمودار پروفیل دمایی بی بعد در راستای شعاعی محفظه‌ی احتراق در فاصله‌ی ۹۰ میلی‌متر از پره‌ی چرخان



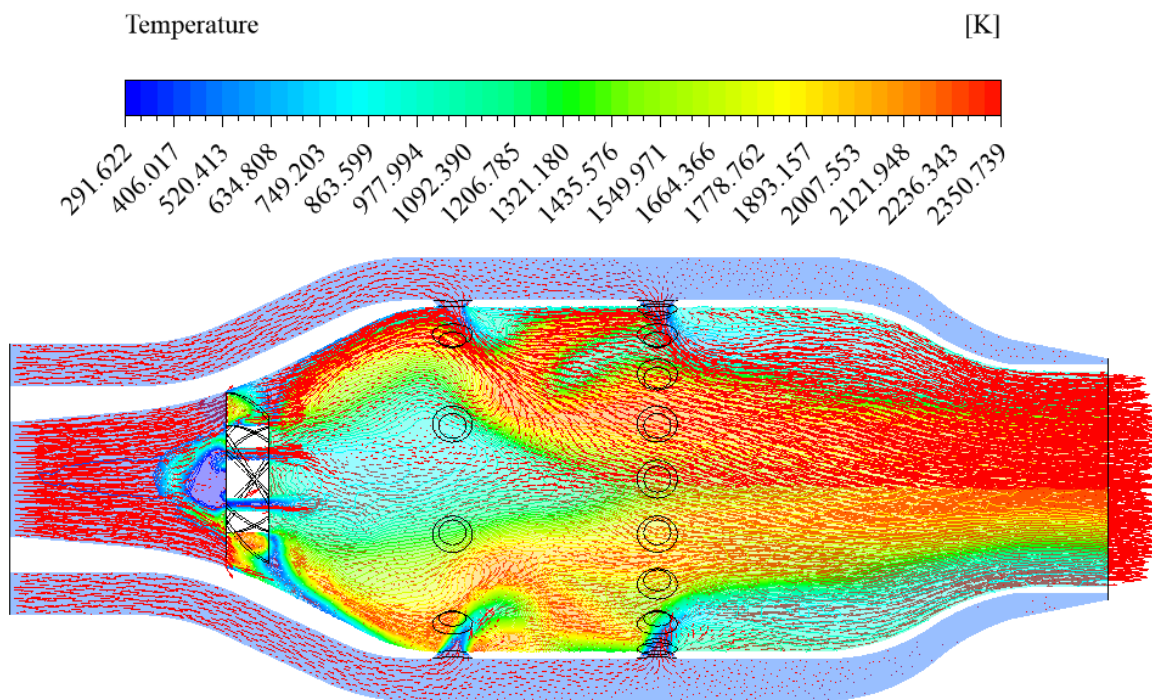
شکل ۱۴- کانتور سرعت سیالات در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی xy



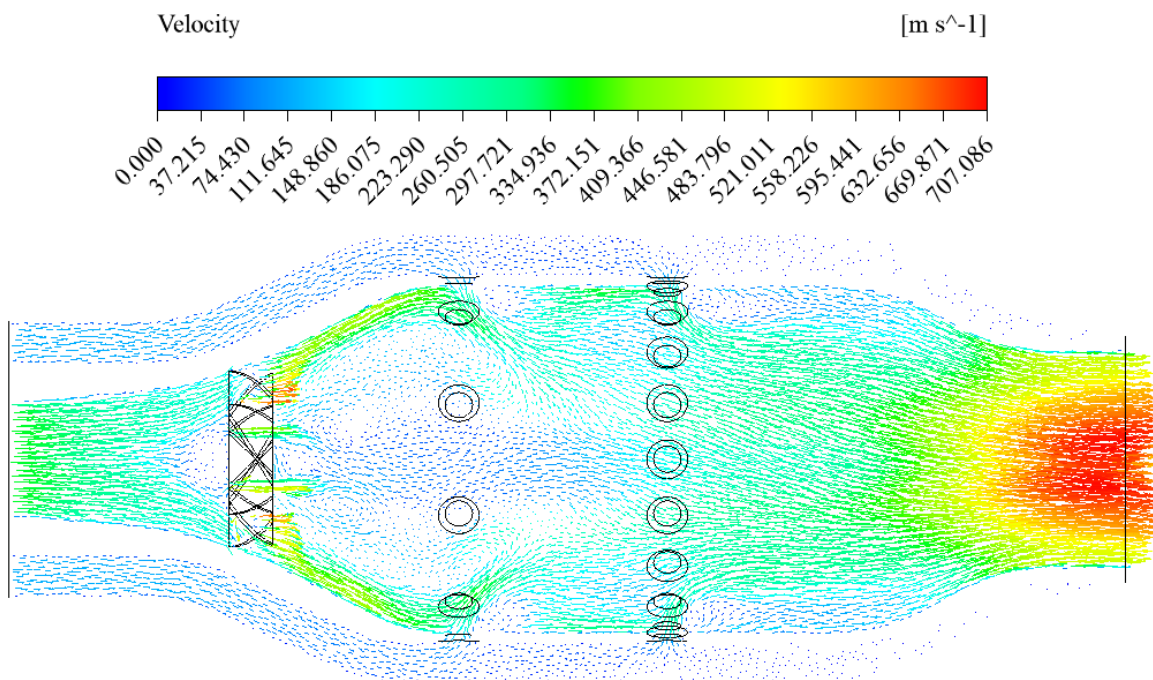
شکل ۱۵- کانتور دمای سیالات در دامنه‌ی محافظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY



شکل ۱۶- کانتور فشار سیالات در دامنه‌ی محافظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

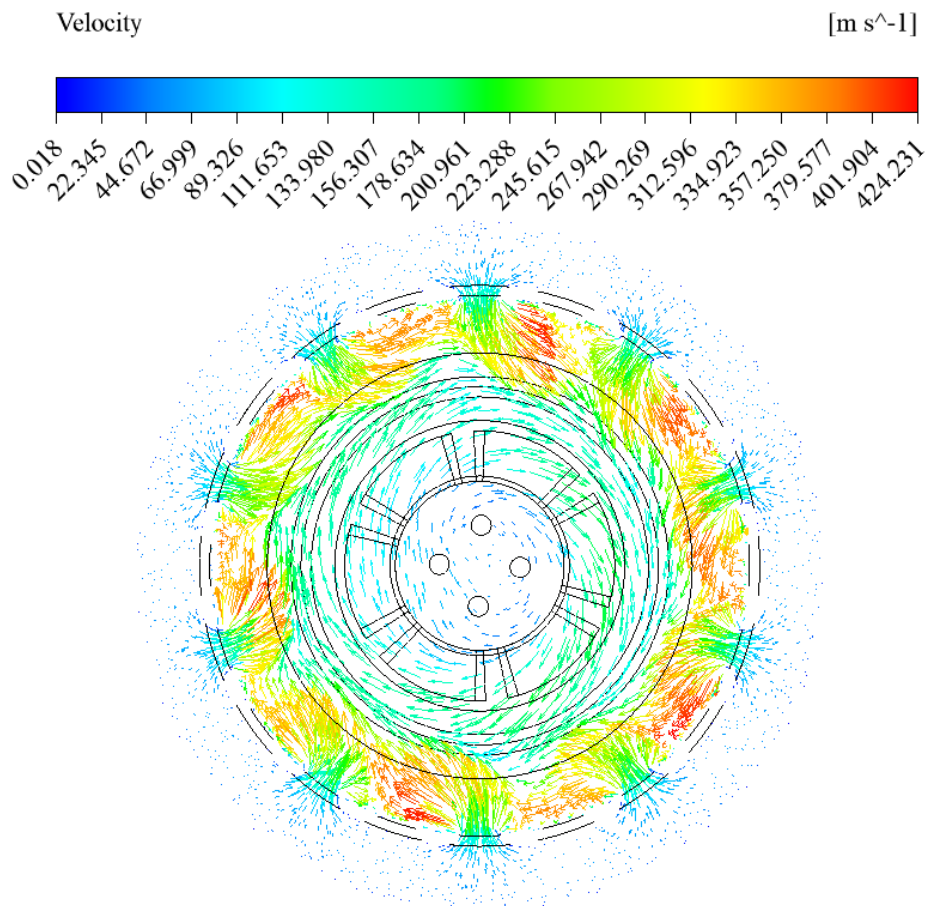


شکل ۱۷- کانتور دما و بردارهای سرعت در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

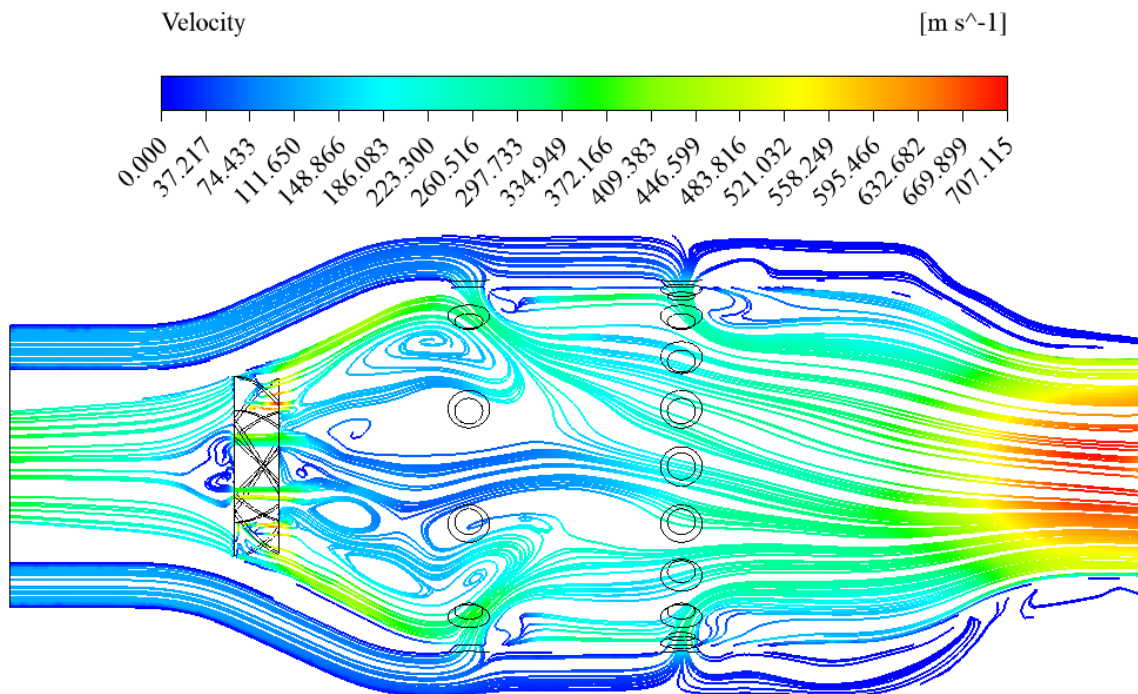


شکل ۱۸- کانتور بردار سرعت در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

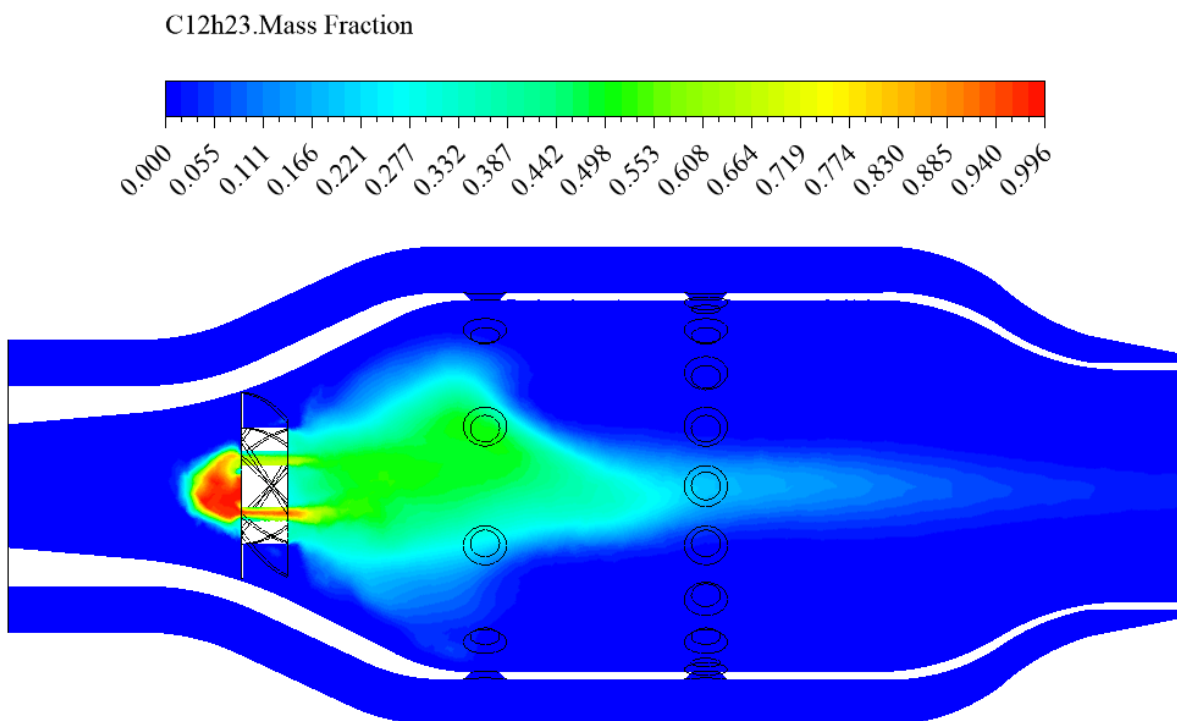




شکل ۱۹- کانتور بردارهای سرعت در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی yz



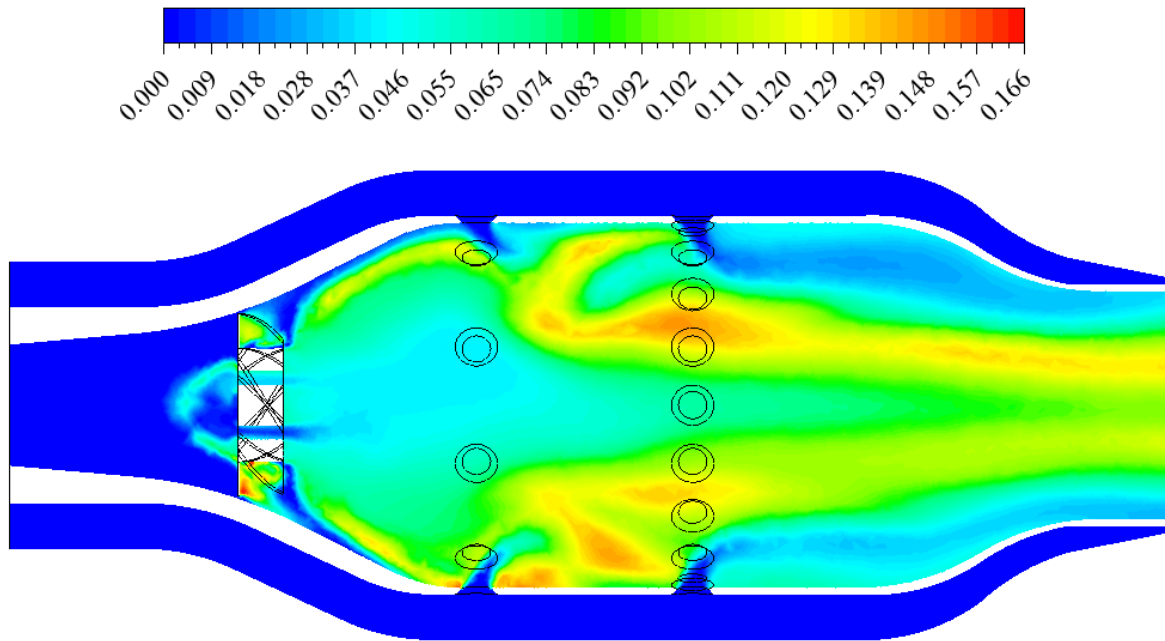
شکل ۲۰- کانتور خطوط جریان در محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY



شکل ۲۱- کانتور کسر جرمی C12H23 در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

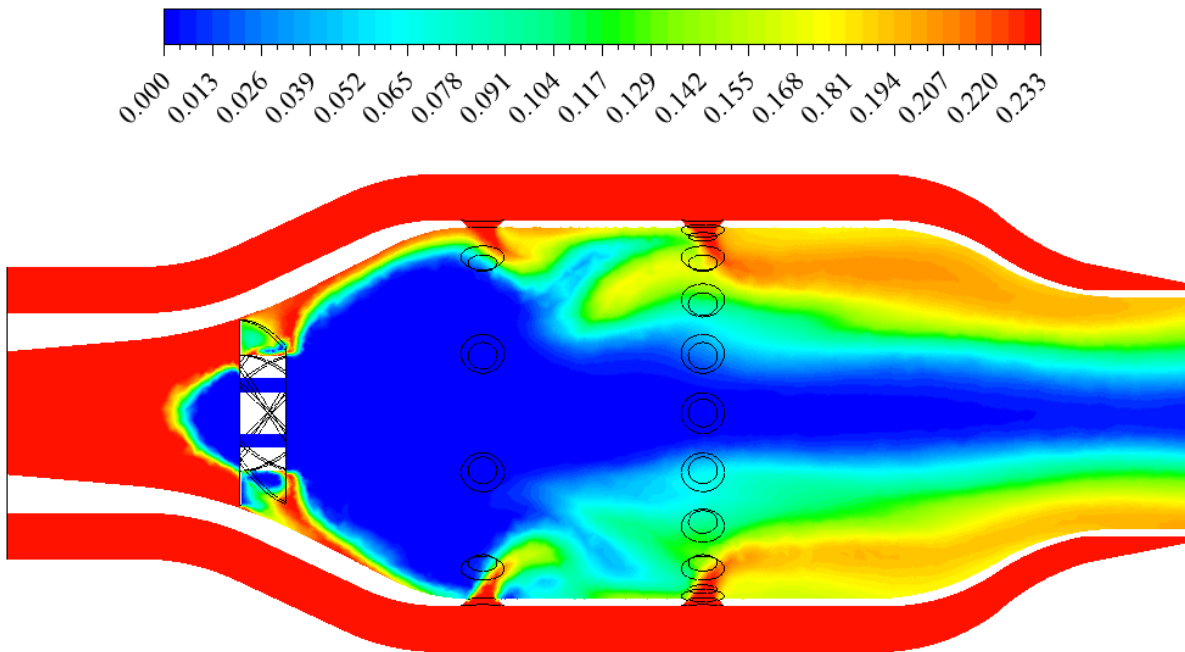


Co2.Mass Fraction



شکل ۲۲- کانتور کسر جرمی CO2 در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

O2.Mass Fraction



شکل ۲۳- کانتور کسر جرمی O2 در دامنه‌ی محفظه‌ی احتراق در صفحه‌ی XY

- [1] Shrivastava, Abhishek, and Vivek Kumar Patel. "Effect of injection angle of primary and secondary holes on the mixing and combustion in a can type combustor using CFD." *SN Applied Sciences* 1 (2019): 1-13.