

## شبیه‌سازی عددی و بررسی انتقال حرارت اختلاط جریان در میکسر کنگره‌دار یک‌موتور توربو فن

صادق فاضلی<sup>۱</sup>، روح الله خوشخو<sup>۲\*</sup>، سعیدرضا زادسیرجان<sup>۳</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- استادیار مهندسی هوافضا- آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دکتری مهندسی هوافضا-پیش‌رانش، واحد مهندسی تعمیرات موتور، شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا(توگا)

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲)

### چکیده

میکسر یکی از اجزاء موتورهای توربو فن می‌باشد که به منظور اختلاط جریان‌های هوای سرد کنارگذر با جریان هوای گرم هسته مرکزی بکار می‌رود. در این پژوهش، جریان‌های عبوری از میکسر کنگره‌دار یک موتور توربو فن با کنار گذر بالا شبیه‌سازی شده است. معادلات ناویر-استوکس به صورت سه‌بعدی و پایا و جریان به صورت تراکم‌پذیر و مغشوش در نظر گرفته شده است. در ابتدا، روش شبیه‌سازی، اعتبارسنجی شده، سپس پدیده‌های انتقال حرارت و اختلاط جریان‌های سرد و گرم در کنگره‌های میکسر موتور توربو فن با کنار گذر بالا بررسی شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد، که با افزایش طول اختلاط، نفوذ هوای سرد در هوای گرم به طور منظم (لایه‌ای) بیشتر می‌شود و دمای کل کاهش می‌یابد. بیشترین اثرگذاری خنک‌کاری مربوط به اختلاط در کنگره‌های میکسر می‌باشد. میکسر دمای ۸۰۰ کلوین هوای گرم را با اختلاط به دمای ۳۴۰ کلوین می‌رساند. سرعت محوری هوای گرم قبل از ورود به کنگره ها ۲۱۰ متر بر ثانیه و با عبور از کنگره‌های میکسر با اختلاط جریان‌ها در ابتدا کاهش، سپس در فاصله کوتاهی از میکسر درون محفظه بین نازل و جسم مرکزی افزایش یافته و در نهایت، با خروج جریان از نازل، دوباره کاهش می‌یابد. در نهایت، سرعت عرضی تولید شده در عمق کنگره، تاثیر زیادی بر اختلاط جریان دارد.

واژه‌های کلیدی: میکسر، شبیه‌سازی عددی، انتقال حرارت، اختلاط جریان، موتور توربو فن

## Numerical Simulation and Survey of Heat Transfer Flow Mixing in a Lobed Mixer of a Turbofan Engine

Sadegh Fazeli, Rouholah Khoshkhoo\*, Saeed Reza Zadsirjan

### Abstract

Mixer, a component of turbofan engines is used to mix bypass cold flow with central body hot flow. In this study, the flow passing through the lobed mixer of a high bypass turbofan engine are simulated. First phase of the study was validation of the simulation method. The next phase was assessing the effect of heat transfer and mixing of hot and cold flows in the high bypass turbofan engine mixer. The results show that by raising the mixing length, the admixture of cold and hot flow increases regularly (layered) and the total temperature diminish. Alloy in mixer lobes plays the greatest role in this cooling process. Mixer successfully lowers 800 Kelvin temperature to of 340 Kelvin. The axial velocity of hot flow before entering the lobes is 210 m/s, decrease while passing the mixer lobes, re-boost in a short distance between the nozzle and the central body, eventually decreasing during flow exit. Besides, the transverse velocity generated deep inside the lobes have a substantial role in flow mixing.

**Key words:** Mixer, Numerical Simulation, Mixing of Flow, Turbofan Engine

## ۱. مقدمه

میکسر در حال حاضر برای طیف گسترده‌ای از موتورهای جت در نظر گرفته می‌شود، که مزیت عملکرد آن، ترکیب کامل، سریع و مفید دو یا چند جریان می‌باشد. جریان خروجی از نازل دمای بسیار بالایی دارد و پروفیل دمای جریان خروجی نیز غیریکنواخت می‌باشد. با توجه به دو مسئله ذکر شده، برای جلوگیری از شناسایی حرارتی هواپیماها و جلوگیری از آسیب- رسیدن به قطعات و تجهیزات در قسمت خروجی لازم است، جریان خروجی خنک‌سازی شود. در شکل ۱، شماتیک کلی از یک میکسر در موتور توربوفن نشان داده شده است. در این شکل، جریان گاز گرم هسته با سرعت بالا با جریان هوای کنارگذر پس از عبور از روی سطح میکسر اختلاط پیدا می‌کند. تبادل انرژی آنقدر سریع با اختلاط جریان رخ می‌دهد که نه تنها منجر به ترکیب تقریباً کامل دو جریان در مسافت کوتاه می‌شود، بلکه باعث اتلاف انرژی کم در طول مسیر می‌گردد. جریان‌ها با عبور از هندسه کنگره‌ها در انتهای میکسر اختلاط پیدا می‌کنند، که این اختلاط بر روی کمیت‌های فشار، سرعت، دما و چرخش<sup>۲</sup> جریان تاثیرگذار می‌باشد.



الف) شماتیک ایزوگرایی میکسر در موتور توربوفن

جریان هسته داغ



ج) جریان سرد کنارگذر



ب) جریان شعاعی

شکل ۱. الف) شماتیک دوبعدی از موتور توربوفن و میکسر آن  
ب) جریان شعاعی در کنگره‌های میکسر و ج) جریان محوری در  
نمای جانبی میکسر [۱]

در سال ۱۹۸۸ اولین تحقیقات در زمینه بررسی دمایی میکسر توربوفن توسط باربر صورت گرفت. هدف کلی این برنامه ناسا، توسعه و اجرای چندین برنامه کامپیوتری مناسب برای طراحی تحلیلی میکسر برای بررسی اختلاط دو جریان است. میکسر نیز در کاربردهای نظامی به عنوان ابزار مساحت متغیر در نظر گرفته می‌شود و به عنوان روشی برای گسترش گازهای داغ خروجی از جریان هسته بکار می‌رود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که

کنگره‌ها با هندسه‌های مختلف می‌توانند به منظور بهبود عمل اختلاط حرارتی و کاهش بیشتر دمای داغ گاز هسته موثر باشند [۲]. در سال ۲۰۱۱، شان و همکارانش به بررسی عددی و تجربی تاثیر شکل کنگره‌های نازل بر جریان خروجی از نازل و اجکتور موتور توربوجت پرداختند. در ابتدا، عملکرد آیرودینامیک چندین نازل کنگره‌دار با هندسه‌های مختلف با استفاده از معادلات ناویراستوکس و مدل توربولانسی  $k - \epsilon$  بررسی شد. نتایج عددی نشان می‌دهد که نازل کنگره‌دار، نیروی پیشران موتور را ۲/۹۹ درصد نسبت به نازل بدون کنگره و ساده افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نازل کنگره‌دار، دمای بیشینه دیواره نازل را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، اختلاط هوای سرد کنارگذر با هوای گرم، دمای هوای گرم را نیز کاهش می‌دهد و قدرت ورتیسیته در نازل کنگره‌دار با افزایش زاویه انبساط، بیشتر می‌شود [۳].

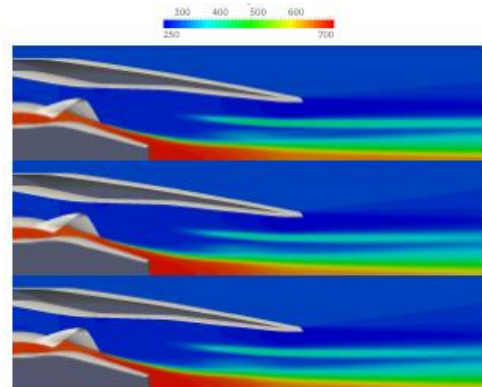
در سال ۲۰۱۱، یی و همکارانش، به بررسی عددی در مورد طول ناحیه اختلاط روی عملکرد کنگره‌های میکسر نازل پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که طول ناحیه اختلاط جریان، تاثیر نسبتاً زیادی بر ایجاد گردابه‌های جریان دارد و با توجه فضای بیشتر برای اختلاط جریان‌ها، بردار سرعت عرضی فرصت بیشتری برای ایجاد گردابه پیدا می‌کند و در بخش خروجی نازل، بازده اختلاط حرارتی در ابتدا، افزایش و سپس کمی کاهش می‌یابد. ورتیسیته جریان با توجه به قدرت گردابی نزدیک کنگره از قدرت بیشتری برای اختلاط جریان‌ها برخوردار می‌باشد و می‌تواند منجر به کاهش دمای هوای گرم گردد [۴]. سال ۲۰۱۳، برینکرهاف و همکاران به مطالعه عددی مکانیزم اختلاط جریان در یک هندسه میکسر دوازده کنگره متقارن محوری پرداختند. در این پژوهش، از شبکه‌ای بی- سازمان جهت انجام شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد، جریان سیال به طور کامل توسط اغتشاش‌های مقیاس کوچک در ورودی میکسر کنگره‌دار یا لایه مرزی در امتداد دیواره تحت تاثیر قرار می‌گیرد و چرخش جریان در کنگره‌ها مشاهده شد. میزان سرعت جریان، در لحظه ابتدای اختلاط تحت تاثیر گردابه‌های تشکیل شده در این قسمت می‌باشد و در میانه کنگره، با توجه ورتیسیته تشکیل شده و شدت اندازه سرعت، انرژی جنبشی توربولانس در این ناحیه از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد [۵].

در سال ۲۰۱۷، شنگ و همکاران به بررسی عددی اختلاط جریان در نازل کنگره‌دار همراه با شمشیری<sup>۵</sup> پرداختند، آنها میزان چرخش جریان اختلاطی را بررسی کردند و مشخص شد که طراحی شمشیری (میخ مانند) می‌تواند عملکرد نازل کنگره‌دار را که برای کاهش امواج فروسرخ بکار گرفته می‌شوند، بهبود بخشد. در این تحقیق مشخص شد، که اختلاط تحت تاثیر انتقال جرم و گرما می‌باشد. در مدل کنگره شمشیری، اختلاط جریان‌ها نسبت به مدل کنگره‌دار معمولی، تاثیر بیشتری دارد و نازل کنگره‌دار دندان شمشیری نسبت به نازل کنگره‌دار معمولی، کارایی بالاتری در کاهش امواج فروسرخ دارد [۹].

سال ۲۰۱۸، لی و همکاران به بررسی و شبیه‌سازی اثرات پیش چرخش<sup>۶</sup> جریان ورودی روی عملکرد کنگره‌های میکسر دوبعدی پرداختند. از مدل توربولانسی k-ε و شبکه بی‌سازمان برای شبیه‌سازی میکسر استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که بازده انتقال حرارتی و میزان فشار کل کنگره‌های میکسر نسبت به حالت بدون چرخش افزایش می‌یابد و ورتیسیتته تولیدشده توسط ساختار کنگره در حالت پیش چرخش از بازدهی اختلاط بیشتری برخوردار می‌باشد [۱۰]. سال ۲۰۲۰، شنگ و همکاران به بررسی و شبیه‌سازی عددی مکانیزم جت اختلاطی در کنگره‌های میکسر و اثرات تغییرات کنگره پرداختند. آنها دو پیکربندی میکسر همراه با پوسته بیرونی و بدون آن را بررسی کردند و به بررسی و تحلیل جریان‌های عرضی و سرعت گردابه‌های جریان در مقاطع مختلف پرداختند [۱۱].

سال ۲۰۱۹، فانگ و همکارانش به بررسی جریان عبوری از کنگره‌های میکسر و تاثیر گردابه بر بهبود اختلاط جریان پرداختند. در این تحقیق، گردابه‌های مقیاس بزرگ در پایین‌دست یک میکسر کنگره‌دار به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد، به علت اختلاف فشار بین مناطق قله و قعر لبه میکسر، سه نوع مختلف گردابه در پایین دست جریان در میکسر کنگره‌دار تشکیل می‌شوند [۱۲]. در سال ۲۰۲۰، باران ایپر و همکاران، به تحقیقات بر روی پیکربندی، تعداد کنگره و عملکرد اختلاط یک نمونه میکسر به صورت عددی پرداختند. در این پژوهش، اثرات تعداد کنگره و عملکرد آنها در اختلاط بررسی شده است. مدل‌های توربولانس مختلف مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که بهترین آنها مدل‌های SST  $k - \omega$  و  $k - \epsilon$  می‌باشد. در این

در سال ۲۰۱۳، ساگلر و همکارش موندت، با شبیه‌سازی به بررسی اختلاط جریان گرم هسته و جریان سرد کنارگذر توسط کنگره‌های میکسر در سیستم با پیشران‌ش پیشرفته پرداختند. در این تحقیق، یک عدد پرانتل اغتشاشی، که معیار نفوذ جریان حرارتی است، تعریف شده است. شکل کانتور ۲، کانتور دمای هوای خروجی از میکسر و نازل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از شکل بالا به پایین، با افزایش عدد پرانتل اغتشاشی، نفوذ هوای سرد در هوای گرم بیشتر شده و در نتیجه خنک‌کنندگی سریعتر صورت می‌گیرد [۶].



شکل ۲. کانتور دمای خروجی نازل و میکسر [۶]

سال ۲۰۱۴، رو ژو و همکارانش به بررسی عددی عملکرد ایر تاب‌ها<sup>۳</sup> در نازل موتور توربوپن پرداختند. فناوری ایرتاب با ایجاد سوراخ‌هایی در بدنه بیرونی پوسته و نفوذ سریعتر هوای اتمسفر، منجر به ایجاد اغتشاش بیشتر جریان می‌شود. نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد، این فناوری به واسطه تغییر زاویه ورتیسیتته مربوط به هوای گرم و تغییر بردارهای سرعت، باعث اختلاط بیشتر جریان بعد از میکسر می‌شود و همچنین وجود ایرتاب، بر روی انرژی جنبشی توربولانس به علت تشکیل ورتیسیتته تاثیرگذار می‌باشد. راندمان حرارتی ناشی از اختلاط جریان‌ها، از ۰/۱۷۵۶ تا ۰/۳۴۲۵ افزایش می‌یابد، در حالی که در جریان با دمای بالاتر از ۶۵۰ کلوین، راندمان حرارتی از ۲۹/۲ به ۵/۲ درصد کاهش می‌یابد [۷]. سال ۲۰۱۵، شنگ با شبیه‌سازی جریان، تاثیر شکل کنگره‌های نازل و تغییر هندسه نازل و قرار دادن لبه تیز در قسمت بیشینه کنگره مورد بررسی قرار داد و با این روش، عملکرد یک نازل کوچک را در کاهش امواج فروسرخ (کاهش دما) بهبود بخشید و نشان داد، افزایش ورتیسیتته و سرعت عرضی<sup>۴</sup> بواسطه لبه تیز کنگره، منجر به افزایش اختلاط جریان‌ها می‌گردد [۸].

$$F_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ (u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + w\tau_{zx}) + q_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G_I = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \\ (u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + q_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H_I = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho w u \\ \rho w v \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ (u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz}) + q_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

ترم‌های  $\tau_{zz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{yx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ ، تانسور تنش برشی و ترم‌های  $q_x, q_y, q_z$  شار هدایت گرمایی هستند. که در روابط فوق  $u, v, w$  مولفه‌های بردار سرعت  $x, y, z$  مولفه‌های محورهای مختصات،  $\rho$  چگالی،  $p$  فشار و  $e$  انرژی کل می‌باشد. با توجه به تحقیقات پیشین صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی میکسر [۱۴، ۱۵]، مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  استاندارد به عنوان بهترین مدل اغتشاشی جهت انجام شبیه‌سازی آن معرفی شده است. بنابراین در این تحقیق از مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  استاندارد همراه با تابع دیوار استفاده شد. به نظر می‌رسد، علت انتخاب این مدل اغتشاشی، بخاطر وجود اختلاط دو جریان و وجود گردابه‌های اختلاطی می‌باشد، جزئیات بیشتر در رابطه با این مدل در مرجع [۱۶] ارائه شده است. لازم بذکر است، که برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار تجاری انسیس-سی اف ایکس<sup>۷</sup> استفاده شد و برای تولید شبکه سه-

تحقیق، میزان افت فشار در مقاطع مختلف بعد از مقطع خروجی، چند نوع میکسر بررسی شد و دریافتند، میکسر با افزایش تعداد کنگره و داشتن لبه تیز، منجر به افزایش افت فشار می‌گردد و میزان افت فشار براساس میزان اختلاط بوده و متاثر از سرعت جریان عرضی در کنگره‌های میکسر می‌باشد [۱۳].

در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته، در رابطه با شبیه‌سازی عددی میکسر موتور توربوپون با کنارگذر بالا، نتایج بسیار کمی در مقالات ارائه شده است. در این مقاله، با توجه به استفاده زیاد این موتور در مصارف هوایی برای هواپیماهای مسافربری و نظامی، میکسر یک موتور توربوپون اعتبارسنجی و شبیه‌سازی شد و سپس، تاثیر کنگره میکسر بر انتقال حرارت و خنک کاری در محفظه نازل و اختلاط جریان‌های سرد و گرم در میکسر یک موتور توربوپون با کنارگذر بالا، مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت.

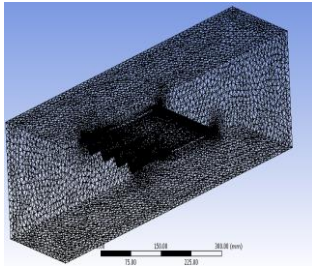
## ۲. معادلات حاکم

معادلاتی مورد استفاده جهت انجام شبیه‌سازی، شامل معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس در شکل بقایی می‌باشند. جریان سیال به صورت پایا، تراکم‌پذیر و لزج در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل دینامیک سیالات محاسباتی گسترش داده شده، نیازمند حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشد. شکل ماتریسی معادلات بقای جرم و مومنتوم و انرژی در سه بعد به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial F_I}{\partial X} + \frac{\partial F_V}{\partial X} + \frac{\partial G_I}{\partial Y} + \frac{\partial G_V}{\partial Y} + \frac{\partial H_I}{\partial Z} + \frac{\partial H_V}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

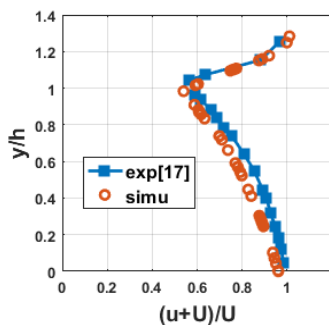
که  $X = \{\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e\}$  بردار جواب می‌باشد و ترم‌های  $F_V, G_V, H_V$  مربوط به مقادیر غیرلزج و ترم‌های  $F_I, G_I, H_I$  مربوط به اثرات لزجت می‌باشند. که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$F_I = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix} \quad (2)$$



شکل ۴. شبکه بی‌سازمان استفاده شده مربوط به کل دامنه محاسباتی حل

پس از بررسی استقلال شبکه، شبکه با  $4200000$  سلول برای شبیه‌سازی جریان در نظر گرفته شد. در شکل ۵ الف و ب نمودار اعتبارسنجی میزان سرعت محوری و سرعت جانبی میکسر کنگره‌دار را در راستای عمودی در لبه کنگره مرکزی نشان داده شده است. در این نمودار، مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی باربر [۱۷] مقایسه شده است. در این نمودار مقدار سرعت محوری در محل وسط کنگره مرکزی و در راستای عمود بر محور افقی بدست آمده است. محور عمودی، نشان دهنده محل اندازه‌گیری سرعت در راستای محور  $Y$ ، تقسیم بر نصف ارتفاع کنگره در راستای عمودی می‌باشد.  $h$ ، نصف ارتفاع کنگره می‌باشد. محور افقی نیز میزان سرعت محوری جریان می‌باشد که نسبت به سرعت جریان ورودی بی‌بعد شده است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و محاسبات انجام‌شده، بیشترین مقدار خطا  $5/6$  درصد می‌باشد و میانگین خطای نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سرتاسر نمودار کمتر از  $5$  درصد بدست آمد.

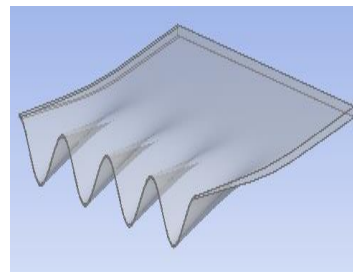


(الف)

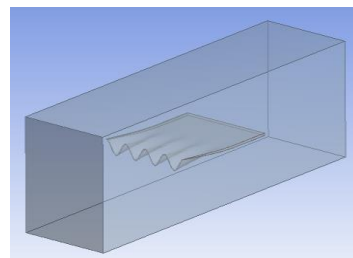
بعدی از نرم افزار (ICEM-CFD) و ANSYS-Meshing استفاده شده است.

### ۱.۳ اعتبارسنجی

قبل از انجام شبیه‌سازی جریان در میکسر موتور توربوپن مورد نظر ابتدا روش شبیه‌سازی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده گزارش آزمایشگاهی باربر [۱۷] مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. هندسه میکسر کنگره‌دار و دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت بررسی جریان، دامنه محاسباتی حل جریان به صورت یک کانال که ارتفاع آن  $762$  میلی‌متر که سه برابر جریان در جسم کنگره‌دار می‌باشد در نظر گرفته شد، همچنین ابعاد مستطیلی مقطع  $202/4 \times 215/9$  میلی‌متر می‌باشد. میزان ارتفاع کنگره،  $12/7$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سایر جزئیات شرایط آزمایشگاهی و مشخصات هندسه کنگره در گزارش باربر [۱۷] ارائه شده است.



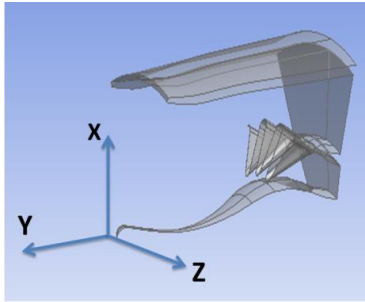
(الف)



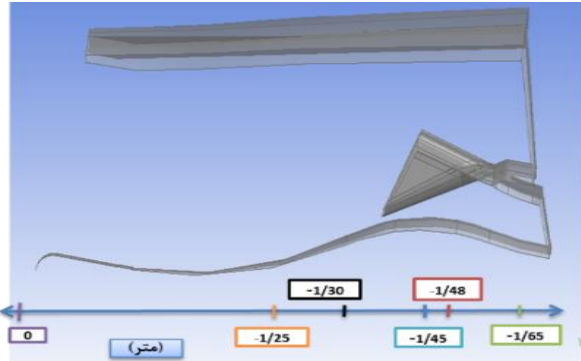
(ب)

شکل ۳. الف) هندسه میکسر ب) هندسه میکسر با دامنه محاسباتی

شرط مرزی در ورودی به صورت سرعت معلوم می‌باشد و در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است، همچنین دیواره‌های کانال به صورت شرط مرزی دیوار ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، نمایی از شبکه بی‌سازمان استفاده شده مربوط به کل دامنه محاسباتی حل نشان داده شده است

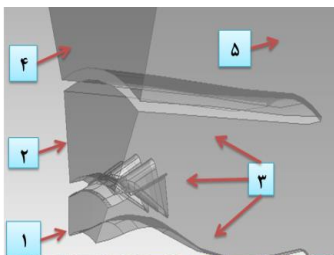


الف) پوسته و میکسر و جسم مرکزی

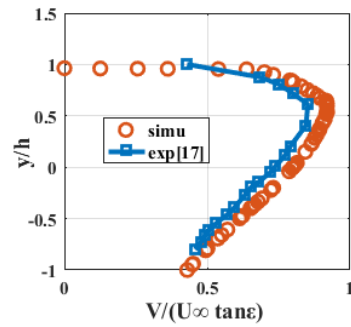


ب) نمایی از موقعیت قطاع‌های مورد بحث برای میکسر  
شکل ۷. قطاع برش خورده از هندسه اصلی

در شکل ۸ هندسه اصلی و کلیه مرزهای اطراف آن شماره-گذاری شده است. شماره اول، محل جریان خروجی از توربین و در حقیقت مرز عبور جریان گرم از هسته مرکزی می‌باشد. شماره دوم، محل ورود جریان هوای خروجی از فن و در حقیقت مرز کنارگذر را نشان می‌دهد. شماره سوم، مربوط به سطح میکسر، هسته مرکزی و پوسته موتور می‌باشد که به صورت دیوار در نظر گرفته شده است. شماره چهارم مربوط به مرز هوای محیط می‌باشد. شماره پنجم مربوط به دیواره‌های جانبی در دو طرف قطاع می‌باشد که به صورت پرئودیک در نظر گرفته شده است و در نهایت شماره ششم مربوط به مرز خارجی دامنه محاسباتی می‌باشد که فشار آن برابر فشار اتمسفر است و دامنه محاسباتی به شکل قطاعی از کره به شعاع ۲۸ متر در نظر گرفته شد.



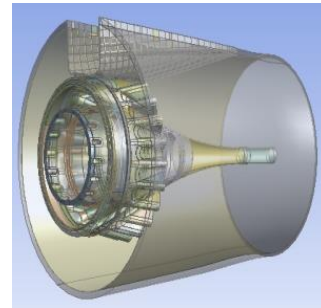
الف) قطاع برش خورده از هندسه



ب)

شکل ۵. اعتبارسنجی الف) سرعت محوری ب) سرعت جانبی

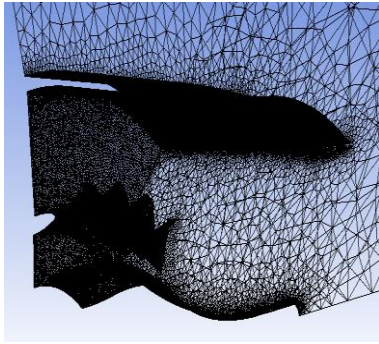
۴- هندسه، شرایط مرزی و شبکه مورد استفاده برای شبیه-سازی میکسر موردنظر  
میکسر موردنظر دارای ۲۲ کنگره می‌باشد و ناحیه موردنظر جهت تحلیل جریان شامل سه بخش، جسم مرکزی<sup>۱</sup>، کنگره‌ها و پوسته بیرونی<sup>۹</sup> است که نمایی از هندسه میکسر و ناحیه محاسباتی موردنظر، جهت شبیه‌سازی در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.



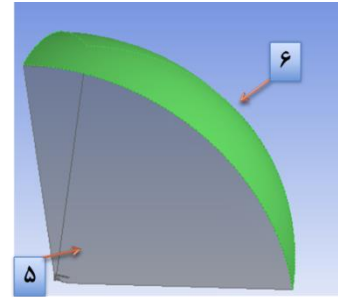
شکل ۶. هندسه میکسر جهت شبیه‌سازی

جهت انجام شبیه‌سازی، هندسه میکسر به صورت متقارن محور در نظر گرفته شده است و برای جلوگیری از حجم بسیار زیاد محاسبات و کاهش محاسبات، قطاعی از میکسر شامل سه کنگره، جهت شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شد و با توجه به شرایط مرزی دیواره‌های جانبی در دو طرف قطاع به صورت پرئودیک می‌باشد. همان‌گونه در شکل ۷ الف) مشاهده می‌شود، لبه جلویی میکسر به صورت یک سطح شیب‌دار می‌باشد و در حقیقت میکسر دارای زاویه اسکارف<sup>۱۰</sup> می‌باشد. در شکل ۷ ب)، محل مقاطعی که رفتار جریان مورد بررسی قرار گرفته است، نمایش داده شده است. مبدأ مختصات در لبه انتهایی جسم مرکزی قرار دارد.





الف) نمای مایل



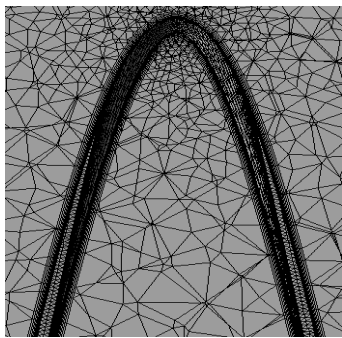
ب) صفحه پریودیک و دامنه کروی

شکل ۸- شرط مرزی دامنه و هندسه برش خورده

شرایط جریان ورودی از قسمت کنارگذر و هسته مرکزی که توسط میکسر با یکدیگر مخلوط می‌شوند، در جدول ۱ نمایش داده شده است.

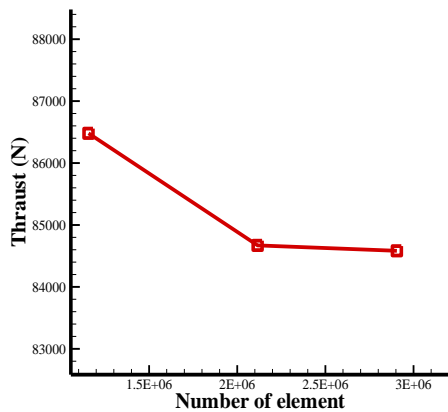
جدول ۱- داده‌های ورودی میکسر CFM56-5C

خروجی فن	خروجی توربین	واحد	
( ناحیه کنارگذر)	( هسته مرکزی)		
۳۱۹/۹	۸۱۴/۷۸	K	دمای استاتیک
۴۰۳	۶۹/۳۰۹	Kg/s	نرخ دبی جرمی ورودی



ب) کنگره و لایه مرزی

شکل ۹. شبکه بندی هندسه اصلی تراکم شبکه حول اجسام داخلی

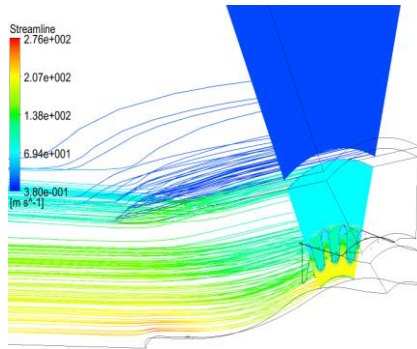


شکل ۱۰. نیروی پیشران برحسب تعداد سلول در شبکه

جدول ۲. نیروی پیشران برحسب شبکه

شماره شبکه	تعداد کل سلول دامنه	نیروی پیشران (نیوتن)
شماره ۱	۱۱۴۵۱۵۶	۸۶۴۸۰
شماره ۲	۲۱۱۵۵۶۶	۸۴۶۷۰
شماره ۳	۲۹۰۵۷۸۰	۸۴۵۸۳

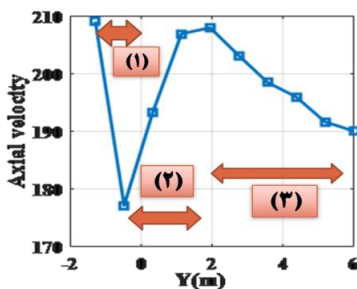
با توجه به هندسه جسم، شبکه بی‌سازمان جهت انجام شبیه‌سازی در دامنه حل محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۹ نشان داده شده است، همچنین تراکم شبکه در لایه مرزی و در مجاورت سطح میکسر افزایش یافته است. به منظور بررسی استقلال حل عددی از شبکه از سه شبکه ریز، متوسط و درشت استفاده شد و تغییرات میزان نیروی پیشران بر حسب تغییرات اندازه شبکه مورد بررسی قرار گرفت. مقدار به دست آمده به عنوان نیروی پیشران برحسب تعداد سلول در شبکه‌های استفاده شده در شکل ۱۰ و جدول ۲ نشان داده شده است. لازم بذکر است که با توجه به تغییر اندازه شبکه، میزان چگالی جریان و سرعت جریان خروجی تغییر کرده و در نتیجه میزان نیروی پیشران نیز به تناسب اندازه شبکه می‌تواند تغییر کند. همچنین جهت بررسی استقلال از شبکه، دمای اختلاط بعد از کنگره‌ها مورد بررسی قرار گرفت، که از نظر مکانی، به صورت عمود بر راستای جریان محوری و در فاصله  $y = -1/37$  متر در نظر گرفته شد، که مشخصات آن در جدول ۳ نمایش داده شده است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده و عدم تغییر محصول در شبکه متوسط و ریز، تعداد  $2/1$  میلیون سلول برای شبکه بندی در نظر گرفته شد.



ب) نمای سه بعدی

شکل ۱۱- کانتورهای خطوط سرعت جریان از مقطع  $Y=-1/48$  قبل از ترکیب شدن دو جریان سرد و گرم در لبه‌های میکسر تا خروج از نازل

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات سرعت محوری در راستای محور افقی را نشان می‌دهد. این مقادیر از محل ورودی هوای گرم تا فاصله ۶ متری بعد از خروج از نازل است. مقادیر سرعت محوری در راستای قسمت مرکزی کنگره میانی محاسبه شده است. در ناحیه اول، میزان سرعت محوری در راستای افقی، در اثر اختلاط جریان‌های سرد و گرم، در کنگره‌ها کاهش یافته و در ناحیه دوم، در فاصله کوتاهی بعد از اختلاط دو جریان تا هنگام خروج جریان از نازل، تحت تاثیر جسم مرکزی و پوسته افزایش می‌یابد و سپس در ناحیه سوم، به علت خروج جریان از نازل و ورود جریان به هوای محیط دوباره میزان سرعت کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- سرعت محوری متناسب با خطوط جریان از مقطع لبه میکسر تا خروج جریان از نازل در موقعیت مرکز کنگره میانی

در ادامه به بررسی کانتور سرعت محوری درون کنگره‌های میکسر در سه ناحیه قبل از اختلاط جریان‌ها درون کنگره‌ها، در حین اختلاط جریان‌ها در کنگره‌ها و در فاصله معینی بعد از اختلاط در کنگره‌ها پرداخته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شکل ۱۳ الف) سرعت محوری جریان درون کنگره‌ها تحت تاثیر هندسه کنگره تغییر کرده و درون کنگره‌ها میزان

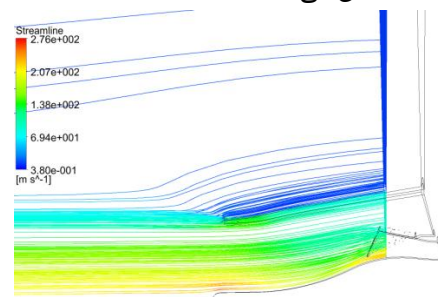
جدول ۳. استقلال از شبکه دمایی میکسر مورد نظر

شماره شبکه	تعداد کل سلول دامنه	دما (کلوین)
شماره ۱	۱۱۴۵۱۵۶	۴۴۱/۳۲
شماره ۲	۲۱۱۵۵۶۶	۴۳۶/۳۲
شماره ۳	۲۹۰۵۷۸۰	۴۳۵/۸۰

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱ نتایج اختلاط جریان‌های سرد و گرم

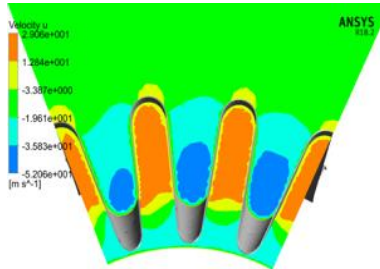
در این بخش، به بررسی تغییرات سرعت محوری جریان از ابتدای میکسر و در هنگام عبور از کنگره‌های آن تا خروجی نازل پرداخته شده است. کانتورهای سرعت محوری جریان، قبل از اختلاط دو جریان سرد و گرم توسط میکسر تا فاصله ۶ متری در راستای محور افقی بعد از خروج جریان از میکسر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در شکل ۱۱ الف)، محور  $Y$  به عنوان محور افقی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با نزدیکی دو جریان به لبه میکسر، دو جریان سرد و گرم ترکیب می‌شوند و میزان سرعت جریان هوای گرم در ابتدا کاهش می‌یابد و سپس جریان هوای سرد و گرم در طول پوسته به مقدار میانی می‌رسد و در هنگام خروج جریان از نازل، بیشترین میزان تغییرات سرعت محوری نزدیک به جسم مرکزی بوده و با فاصله کمی از جسم مرکزی در راستای قائم بر سطح، میزان سرعت محوری تقریباً یکنواخت می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۱ ب) مشاهده می‌گردد، میزان سرعت محوری در لبه قله میکسر، در اثر اختلاط جریان‌های سرد و گرم، کاهش یافته و در فاصله کوتاهی بعد از اختلاط دو جریان تا هنگام خروج جریان از نازل افزایش می‌یابد و سپس به علت خروج جریان از نازل و ورود جریان به هوای محیط دوباره میزان سرعت کاهش می‌یابد.



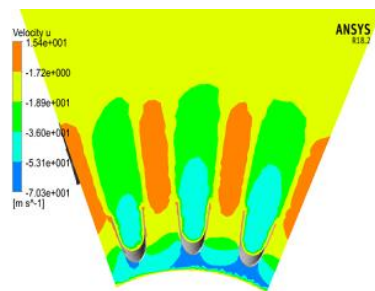
الف) نمای دوبعدی



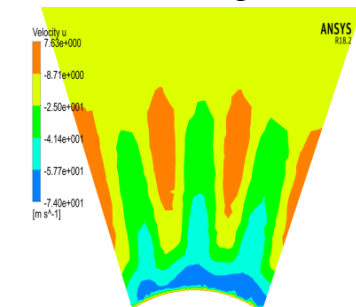
سرعت عرضی در عمق کنگره‌ها به ترتیب رو به بالا و پایین می‌باشد. شکل ۱۴ ج)، اختلاط جریان بعد از کنگره‌ها را نمایش می‌دهد، که سرعت‌های عرضی بدلیل اختلاط جریان‌ها، به مرور کاهش می‌یابد.



الف) قبل از اختلاط،  $Y = -1/48$



ب) ابتدای اختلاط،  $Y = -1/38$

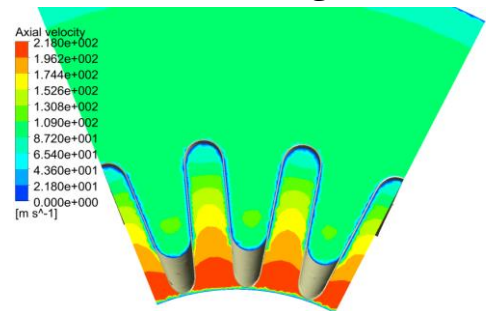


ج) بعد از اختلاط،  $Y = -1/25$

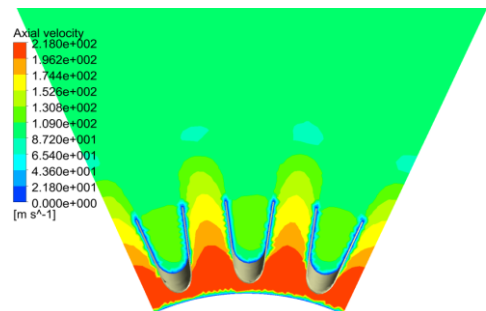
شکل ۱۴- کانتورهای سرعت عرضی در مقاطع مختلف میکسر

شکل ۱۵، بیانگر بردارهای سرعت در مقطع عمود بر جریان در مختصه  $Y = -1/42$  و  $Y = -1/32$  پیرامون کنگره‌ها را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این مقاطع، نشان دادن حرکت بردارهای سرعت قبل از اختلاط و شروع اختلاط از بالای کنگره می‌باشد. با توجه به وجود زاویه اسکالرف برای میکسر و در حقیقت، قدرت چرخشی جریان بخاطر پایین بودن شدت سرعت جریان، در بالای قله کنگره کمتر می‌باشد، در بالای کنگره، چرخش جریان و در حقیقت جریان گردابه‌ای مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود شدت شکل‌گیری ورتیسیته در دهانه

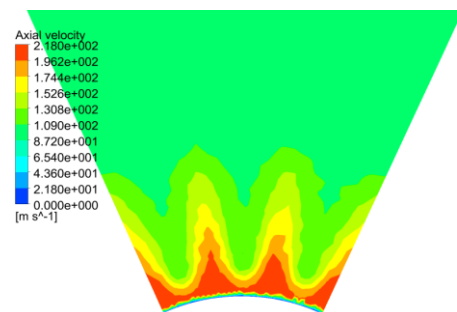
سرعت محوری جریان کمتر می‌شود. در ابتدای اختلاط جریان-ها، شکل ۱۳ ب) بالای کنگره، اختلاط آغاز شده و سرعت محوری جریان در ناحیه بالای کنگره، کاهش می‌یابد. در حالی که هنوز در بخش پایین کنگره، تغییری در سرعت محوری جریان حاصل نشده است. در شکل ۱۳ ج) دامنه اختلاط جریان افزایش یافته و در سرعت محوری جریان کاهش بیشتری بوجود آمده‌است و اختلاط کامل جریان‌ها با حرکت جریان‌ها در محفظه نازل صورت می‌گیرد.



الف) قبل اختلاط  $Y = -1/48$



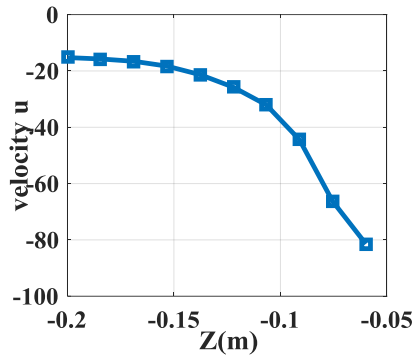
ب) ابتدای اختلاط  $Y = -1/38$



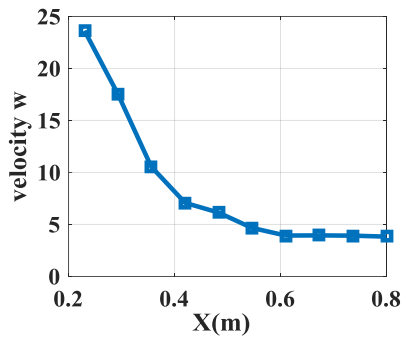
ج) با فاصله بعد از اختلاط  $Y = -1/25$

شکل ۱۳- نمایش کانتور سرعت محوری در کنگره‌های میکسر

در شکل ۱۴، کانتورهای سرعت عرضی در راستای X در مقاطع عمود بر جهت جریان و قبل از اختلاط جریان‌ها و حین اختلاط جریان‌ها و بعد از اختلاط نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ الف، ب) و ج) مشاهده می‌گردد، بیشترین میزان



(الف)

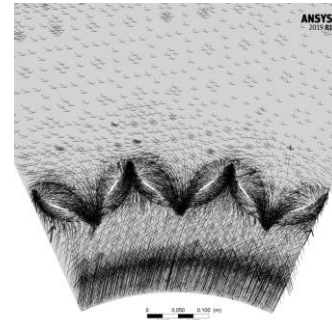


(ب)

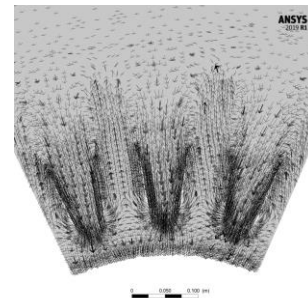
شکل ۱۶. مولفه‌های سرعت (الف) سرعت شعاعی (ب) سرعت عرضی

در شکل ۱۷، بردارهای سرعت مربوط به گردش جریان در مقطعی از میکسر، عمود بر جهت جریان قابل مشاهده می‌باشد. این مقطع به منظور نمایش بهتر بردارهای سرعت در کنگره-های میکسر قبل از اختلاط جریان‌ها نشان داده شده‌است. با توجه به جهت حرکت بردارها می‌توان مشاهده نمود که جریان هوای سرد و گرم با توجه به شکل کنگره‌ها، تمایل به حرکت به کدام سمت را دارند. دو جریان گرم و سرد، حرکت گردشی در لبه کنگره‌ها به منظور اختلاط شروع کرده و تا فاصله معین ادامه پیدا خواهد کرد. مقاطع مشاهده شده به صورت عمود بر جهت جریان در نظر گرفته شده است. در ابتدا، جریان در مسیر کنگره‌ها حرکت می‌کند، این جریان‌های سرد و گرم تحت تاثیر هندسه کنگره میکسر قرار گرفته و ماهیت هندسه و انحنای آن باعث ایجاد جریان ثانویه و حرکت جریان در جهت-های غیر محوری خواهد شد. همان‌گونه که در شکل زیر در مقطعی قبل از اختلاط جریان‌ها ملاحظه می‌شود که جریان هوای سرد در قسمت قله کنگره به صورت عرضی به قعر کنگره هدایت می‌شود و جریان هوای گرم نیز از قسمت قعر کنگره به سمت قله کنگره هدایت می‌شود. بیشترین قسمت تجمع جریان‌ها در دو قسمت قعر و قله کنگره‌ها می‌باشد. البته

کنگره در شکل ۱۵ (الف) و در فاصله از کنگره در شکل ۱۵ (ب) نمایش داده شده است.



الف) مقطع  $Y = -1/42$



ب) مقطع  $Y = -1/32$

شکل ۱۵. بردارهای سرعت در مقطع عمود بر جریان را در مختصه  $Y = -1/32$  و  $Y = -1/42$

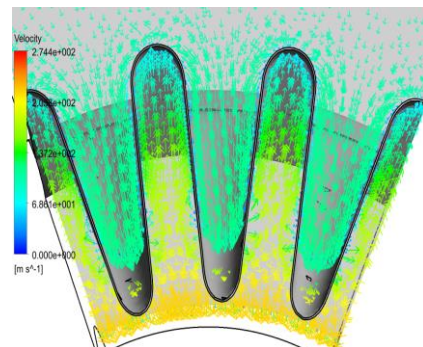
میزان چرخش<sup>۸</sup> جریان ملاک اختلاط جریان‌ها می‌باشد و مبنای سنجش قدرت، سرعت زاویه‌ای  $\omega$  می‌باشد. در شبیه سازی سه بعدی سرعت زاویه‌ای در سه راستا دارای مقدار می-باشد. سرعت زاویه در هر سه راستا  $\omega_x$ ،  $\omega_y$  و  $\omega_z$  می‌باشند.  $\omega_y$  دارای بیشترین مقدار می‌باشد بنابراین سرعت زاویه‌ای و قدرت چرخشی در راستای حرکت جریان بیشتر می‌باشد. سرعت چرخشی در راستای جریان به صورت رابطه بیان می-شود:

$$\omega_y = \left( -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (۸)$$

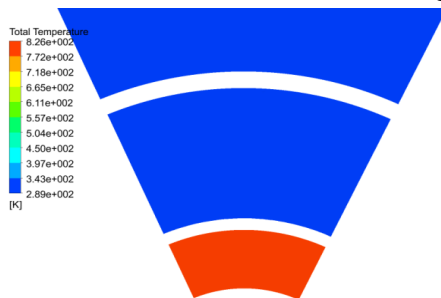
هر دو ترم سرعت چرخشی به صورت گرادیان می‌باشند که طبق نمودار شکل ۱۶،  $\omega_y$  هردو ترم آن که به صورت شیب نمودار بوده، هم علامت بوده و برعکس  $\omega_x$ ،  $\omega_z$  علامت ترمهای آنها مخالف بوده در نتیجه  $\omega_y$  دارای بیشترین مقدار می‌باشد و در راستای حرکت گردابه‌ها قدرت بیشتری دارند.

مختلف از طول میکسر که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، می‌توان بیان نمود که ابتدا قبل از اختلاط، دمای جریان‌های گرم و سرد، هر یک به صورت یکنواخت می‌باشد و میزان دمای گرم ماکسیمم به تدریج با اختلاط جریان‌ها به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. باتوجه به شکل‌ها، دما در نزدیکی محور به تدریج کاهش یافته است. به‌علت وجود جسم مرکزی، که در ابتدا دارای شعاع زیاد و در نتیجه سطح مقطع بین میکسر کنگره‌دار و جسم مرکزی کم می‌باشد، نیز اثر قابل قبولی در متمرکز شدن جریان و افزایش سرعت اختلاط گرمایی داشته است، بدین صورت که سطح مقطع کم منجر به افزایش سرعت در ابتدای ناحیه اختلاطی می‌شود که این امر منجر به افزایش اختلاط می‌شود.

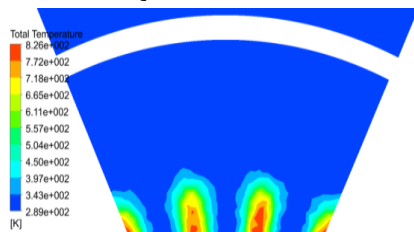
مشاهده می‌شود، میزان سرعت جریان در قله کنگره‌ها نسبت به عمق کنگره‌ها کمتر می‌باشد.



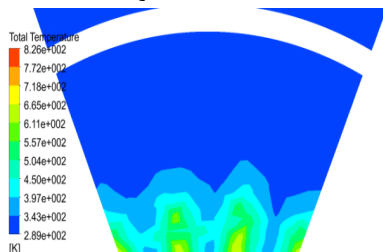
شکل ۱۷. خطوط بردارهای سرعت در کنگره‌های میکسر قبل از اختلاط جریان سرد و گرم مقطع  $Y = -1/48$



الف)  $Y = -1/38$  متر



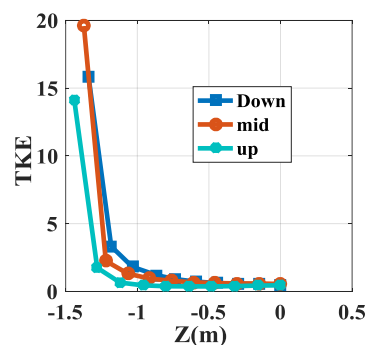
ب)  $Y = -1/25$  متر



ج)  $Y = -1/15$  متر

شکل ۱۹. کانتورهای دمای کل در مقاطع مختلف از طول میکسر

طبق مقاله برینکرهاف [۵]، یکی از مواردی که با توجه به آن اختلاط جریان‌ها در میکسر بررسی می‌شود، انرژی جنبشی توربولانس<sup>۱۱</sup> می‌باشد. در این بخش، در شکل ۱۸، در سه ناحیه پایین، میانه و بالای کنگره تا انتهای نازل انرژی جنبشی توربولانس بررسی و مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، میانه کنگره بیشترین انرژی جنبشی را دارد که مربوط به میزان سرعت عرضی جریان و قدرت بیشتر ورتیسیتته در این ناحیه می‌باشد و نتایج مشابه، نتایج مقاله برینکرهاف [۵] می‌باشد.

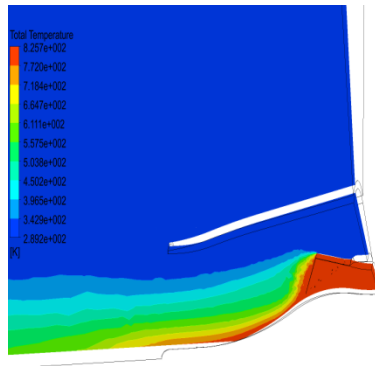


شکل ۱۸. انرژی جنبشی توربولانس

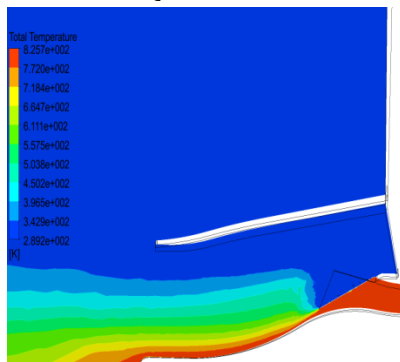
### ۵-۲- نتایج اختلاط گرمایی جریان‌های سرد و گرم

در زمینه اختلاط گرمایی، هدف ما کاهش دمای هوای گرم می‌باشد و به این دلیل است که جریان سرد کنارگذر با آن مخلوط می‌شود. با توجه به کانتورهای دمای کل در مقاطع

به انحنا دار بودن لبه کنگره، جریان‌های گرم و سرد در بالای کنگره زودتر به همدیگر رسیده و با توجه به هندسه شکل ۲۱ (ب) که دبی هوای گرم عبوری از قعر کنگره کمتر می‌باشد و برعکس دبی هوای عبوری از قله کنگره بیشتر بوده پس خنک کاری از بالای کنگره بیشتر و کاهش دما از بالای کنگره بیشتر می‌شود.



الف) قله کنگره

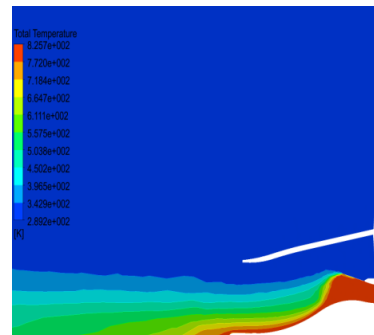


ب) قعر کنگره

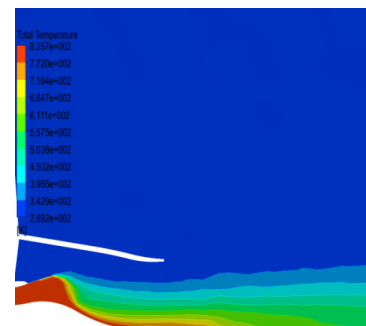
شکل ۲۱. اختلاف حرارتی صورت گرفته در الف) قله و ب) قعر کنگره

در ادامه به بررسی اختلاف دمایی از لبه کنگره تا انتهای دامنه حل محاسباتی پرداخته خواهد شد. برای دقت در بررسی اختلاف و همچنین مشخص شدن جایی که اختلاف به‌تصورت گرفته، سه ناحیه پایین کنگره، میان کنگره و بالای کنگره از کنگره‌ی مرکزی در شکل ۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است. افت شدید دما، در ابتدای هر سه ناحیه نشانگر تاثیر شدید میکسر بر اختلاف جریان‌ها و خنک کاری دارد و در بالای میکسر، اختلاف جریان‌ها سریعتر رخ داده و بیشترین افت دما مشاهده می‌شود. محل مقطع مورد بررسی از ابتدای اختلاف جریان‌ها در  $Y = -1/41$  متر تا محدوده  $Y = 8$  متر می‌باشد.

با افزایش طول ناحیه اختلاف، انتقال حرارت به آرامی بین جریان سرد و گرم صورت می‌گیرد. دو دلیل در این زمینه وجود دارد: اول اینکه افزایش طول مجرای نازل (طول اختلاف) می‌تواند فواصل اختلاف طولانی‌تری را برای هر دوسیال ایجاد کند و دوم، اینکه افزایش مجرای نازل، فضای بیشتری را برای ایجاد گردابه‌های جریان برای توسعه جریان فراهم می‌کند که باعث افزایش اختلاف بین جریان هسته و کنارگذر می‌شود. در ابتدای اختلاف، مجرای اختلاف آنقدر کوچک می‌باشد که گردابه‌های در حال رشد نمی‌توانند به خوبی اختلاف انجام دهند. با توجه به هندسه متقارن محور، توزیع دما روی صفحات پریودیک باید یکسان باشد که این مورد در کانتورهای دمای کل، شکل ۲۰ قابل ملاحظه می‌باشد. با برهم نهی اختلاف بین دو جریان، در ابتدا بازدهی بالا اتفاق می‌افتد و در ادامه با از بین رفتن اثرات کنگره و گردابه و کمتر شدن این اثرات، اختلاف جریان‌ها به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل زیر قابل مشاهده است، توزیع دما بر روی صفحات پریودیک مشابه یکدیگر می‌باشد.



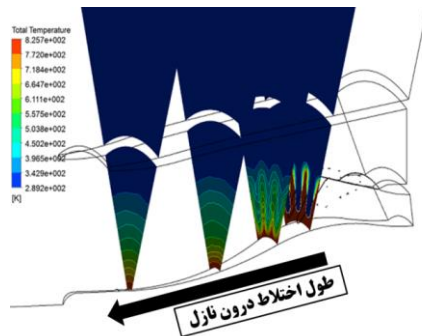
الف)



ب)

شکل ۲۰. توزیع دما روی صفحات پریودیک

کانتورهای شکل ۲۱ نمایانگر اختلاف حرارتی صورت گرفته در قله و قعر کنگره می‌باشد و تاثیر بسیار زیادی در خنک کاری دارد. همانطور که در شکل ۲۱ الف) مشاهده می‌شود، یا توجه



شکل ۲۳. اثرات خنک‌کنندگی در مقطع سه بعدی

### نتیجه‌گیری

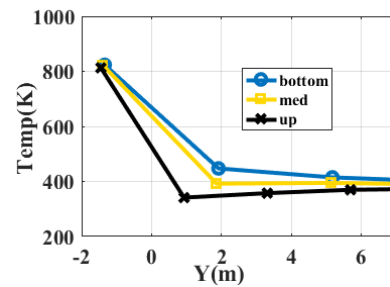
در این تحقیق، میکسر کنگره‌دار یک موتور توربوفن با کنارگذر بالا مورد بررسی و شبه‌سازی قرار گرفت. در این تحقیق، از معادلات ناوراستوکس سه‌بعدی، پایا و مدل اغتشاشی  $k - \epsilon$  استاندارد همراه با تابع دیواره جهت شبه‌سازی جریان استفاده شد. با توجه به شبه‌سازی صورت گرفته، نتایج زیر از این تحقیق به دست آمد:

(۱) سرعت محوری در میکسر تحت تاثیر کنگره‌ها، به سه بخش تقسیم می‌شود: الف) کاهش سرعت هوای گرم در کنگره‌ها از ۲۱۰ متر بر ثانیه به سرعتی کمتر از ۱۸۰ متر بر ثانیه ب) افزایش سرعت درون نازل تحت اثرگذاری جسم مرکزی و پوسته ج) کاهش سرعت در خارج نازل و در هوای اتمسفر.

(۲) اساس عملکرد میکسر، اختلاط جریان‌ها به علت چرخش جریان می‌باشد و این گردابه‌های اختلاطی با توجه به شیب‌دار بودن میکسر به صورت تدریجی تشکیل و اختلاط افزایش می‌یابد.

(۳) جریان عرضی در عمق کنگره، بیشترین تاثیر را در تشکیل گردابه‌ها دارد. در نتیجه، اثر بسزایی در اختلاط جریان‌ها خواهند داشت. در ابتدا، سرعت جریان‌ها، سرعت محوری می‌باشد و با توجه به حرکت جریان تحت تاثیر هندسه، جهت جریان تغییر مسیر داده و این امر منجر به شروع جریان‌های عرضی و شعاعی می‌شود. زمانی که جریان وارد کنگره‌ها می‌شود تا زمانی که خارج شود، سرعت‌های عرضی و شعاعی افزایش می‌یابد، تا جایی که جریان‌ها با حداکثر سرعت عرضی در لبه کنگره به هم رسیده و گردابه‌ها تشکیل می‌شوند و اختلاط به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

(۴) میکسر موتور توربوفن، بهترین کارایی خنک‌کنندگی را دارد، بدین صورت که اختلاط هوای سردی که با هوای داغ



شکل ۲۴. اثرگذاری دمایی کنگره

بازدهی مربوط به سه قسمت پایین، میانه، بالای کنگره از ورود جریان به ابتدای میکسر تا انتهای دامنه به صورت جدول ۴ می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها از یک مقطع می‌باشد و با توجه به جدول ۴، بیشترین خنک‌کاری مربوط به بالای کنگره یا قله کنگره می‌باشد که علت آن فرصت بیشتر برای اختلاط نسبت به میانه و پایین کنگره و همچنین حجم بیشتر جریان‌های بهم رسیده در بالای کنگره، می‌باشد.

جدول ۴. بازدهی مربوط به کنگره

مکان	اثرگذاری
بالای کنگره	۵۷ درصد
میانه کنگره	۴۹ درصد
پایین کنگره	۴۵ درصد

طول اختلاط را می‌توان بازه مکانی اختلاط جریان‌ها، از عبور از کنگره‌ها تا خروجی نازل نامید. در کانتور شکل ۲۳، اثرات خنک‌کنندگی را در مقطع سه بعدی شبه‌سازی شده از سه قسمت جسم مرکزی، صفحه کنگره‌دار (میکسر) و پوسته بیرونی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، جریان هوای گرم با حجمی از هوای سرد با عبور از کنگره‌ها اختلاط پیدا می‌کند. در ابتدای اختلاط جریان، بخاطر قدرت بیشتر گردابه‌های حرارتی و چرخش شدیدی که در کنگره‌ها ایجاد شده بیشترین خنک‌کنندگی ایجاد می‌شود در ادامه هرچند که قدرت چرخش جریان و گردابه‌ها کمتر می‌شود، ولی هنوز تاثیرگذاری خود را بر روی جریان خواهند داشت. همچنین بخاطر وجود پوسته بیرونی و جسم مرکزی این خنک‌کنندگی هرچند با اثرگذاری کم ولی تا انتهای نازل ادامه خواهد داشت.



- [2].Barber, T., "Turbofan forced mixer lobe flow modeling. 2: Three-dimensional inviscid mixer analysis (FLOMIX)", NASA, ISBN: 1730957811, 1988.
- [3].Shan, Y., Zhang, J., and Huang, G., "Experimental and numerical studies on lobed ejector exhaust system for micro turbojet engine", Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 1, pp. 141-148, 2014.
- [4].Xie, Y. and Y.h. Liu, "Numerical investigation of mixing length on performance of lobed forced mixer nozzles", Heat Transfer—Asian Research, Vol, 40, No. 3, pp. 205-216, 2011.
- [5].Brinkerhoff, J.R., H. Oria, and M.I. Yaras, "Experimental and computational study of mixing mechanisms in an axisymmetric lobed mixer", Journal of propulsion and power, Vol. 29, No. 5, pp. 1017-103, 2013.
- [6].Saegeler, S.F. and C. Mundt. *Advanced numerical simulation of mixing hot core and cold bypass flow in modern propulsion systems with internal lobed forced mixer.* in *21st AIAA Computational Fluid Dynamics Conference.* 2013.
- [7].Gu, R., Xu, J., Fan, Z., Wang, Y., Guo, S., "Numerical Investigation of Performance of the Air Tab in the Turbofan Nozzle", Journal of propulsion and power, Vol. 30, No.5, pp. 1272-1280, 2014.
- [8].Sheng, Z., Huang, P., and Zhao, T., "Configurations of lobed nozzles for high mixing effectiveness", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 91, pp. 671-683, 2015.
- [9].Sheng, Z., "Jet mixing of lobed nozzles with spoilers located at lobe peaks", Applied Thermal Engineering, Vol.119: pp. 165-175, 2017.
- [10].Lei, H., Fan, W., Zhang, R., Wu, J., Zhang, Y., Xu, H., "Effect of inlet pre-whirl on two-dimensional lobed mixer performance", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, Vol. 113, 2018.
- [11].Sheng, Z., Liu, J., Yao, Y., Xu, Y., "Mechanisms of lobed jet mixing: About circularly alternating-lobe mixers", Aerospace Science and Technology, Vol. 98, No. 105660, 2020.
- [12].Fang, X., Shen, C., Sun, M., Sandberg, R., Wang, P., "Flow structures of a lobed mixer and effects of streamwise vortices on mixing

صورت می‌گیرد. دمای هسته مرکزی از ۸۰۰ کلوین، به دمای تقریباً ۳۴۰ کلوین کاهش می‌دهد.

(۵) بیشترین اثرگذاری خنک‌کاری مربوط به اختلاط در کنگره‌های میکسر می‌باشد و در ادامه در هر سه مکان کنگره دما به ۳۴۰ کلوین میل می‌کند.

(۶) هندسه لکنگره، بیشترین تاثیر را بر اختلاط حرارتی و سرعت می‌گذارد، بدین صورت که این هندسه شیب‌دار عمودی براساس روند تدریجی اختلاط، بیشترین تاثیر و بازدهی را در پی دارد و اختلاط از بالای کنگره‌ها شروع شده و به طور منظم باعث نفوذ جریان‌های گرم و سرد می‌شود.

(۷) بازدهی مربوط به سه قسمت پایین، میانه، بالای کنگره از ابتدای اختلاط جریان تا دامنه محاسبه گردید که بیشترین اثرگذاری خنک‌کاری ۵۷ درصد که مربوط به بالای کنگره یا قله کنگره می‌باشد.

(۸)  $L_{mix}$  (طول اختلاط) از ابتدای اختلاط جریان بعد کنگره‌ها تا انتهای پوسته نازل می‌باشد، با توجه به نتایج با افزایش طول اختلاط نفوذ هوای سرد در هوای داغ به طور منظم بیشتر می‌شود و دمای کل کاهش می‌یابد.

(۹) با توجه به ناحیه طول اختلاط حرارتی و نمودار سرعت محوری، جسم مرکزی و نازل (پوسته) باعث افزایش سرعت جریان و افزایش اختلاط جریان‌های گرم و سرد می‌شود، که نهایتاً جریان با دمای کمتری از نازل خارج می‌شود.

#### پی‌نوشت

- ۱ Lobe
- ۲ Vorticity
- ۳ Air tab
- ۴ Transverse
- ۵ Spoiler
- ۶ Pre-whirl
- ۷ ANSYS-CFX
- ۸ Center Body
- ۹ Duct
- ۱۰ Scarf
- ۱۱ Turbulence kinetic energy

#### مراجع

- [1].Skebe, S., Paterson, R., and Barber. T., "Experimental investigation of three-dimensional forced mixer lobe flow fields", *1st National Fluid Dynamics Conference*, 1988.



- enhancement*”, *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 6, pp. 066102, 2019.
- [13].İper, B., Ergin, C., Cenic, B., Suer, T., Uslu, S., “*Investigation of the Effects of Lobe Number and Configuration on Mixing Performance in Lobed Mixer*”, *AIAA Propulsion and Energy Forum*, AIAA No. 2020-3778, 2020.
- [14].Krasnodebski, J. K., “*Numerical simulations of lobed mixer flow fields*”, Massachusetts Institute of Technology, Ms.c Thesis, 1995.
- [15].Wang, S., Li, L., and Zhang, J., “*Grid generation and numerical analysis of multi-stream flow in the complex channel with a forced mixer lobe*”, *Journal of Thermal Science*, Vol. 13, No. 2, pp. 167, 2014.
- [16].Recktenwald, G., “*The k-e Turbulence Model*”, *ME*, Vol. 448, p. 548, ID. 53006658, 2009.
- [17].Barber, T., R. Paterson, and S. Skebe, “*Turbofan forced mixer lobe flow modeling. 1: Experimental and analytical assessment*”, *NASA Contractor Report 4147*, 1988.