

# تحلیل جریان دوفازی در ناحیه گردش مجدد محفظه احتراق یک موتور توربین گاز با تغییر در شاخص‌های هندسی مؤثر

محمد مزیدی شرف‌آبادی<sup>۱\*</sup>، محمد ایازی<sup>۲</sup>، محسن ساری<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- مربی مهندسی صنایع، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

پیام‌نگار: mazidim@ripi.ir

## چکیده

هدف از این پژوهش تحلیل دوفازی جریان در ناحیه گردش مجدد محفظه احتراق یک توربین گاز با تغییر در شاخص‌های هندسی مؤثر سوئیچر آن است. جریان‌های چرخشی طبیعی و اجباری که در اثر هندسه محفظه احتراق و شرایط میدان جریان ایجاد می‌شوند، تأثیر چشمگیری بر احتراق و اختلاط هوا و سوخت دارند. در این مطالعه، به منظور بررسی اثرهای تزریق جریان چرخشی در محفظه احتراق، از روش حجم محدود و شبکه بندی نامنظم در یک نرم‌افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی استفاده و بررسی شاخصی انجام شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد افزایش عدد چرخش، حجم ناحیه گردش مجدد را در ناحیه اولیه محفظه احتراق افزایش می‌دهد و باعث افزایش شدت آشفتنگی و بهبود اختلاط هوا و سوخت می‌شود.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۳

شماره صفحات: ۲۸ تا ۴۵

**کلیدواژه‌ها:** شبیه سازی جریان دوفازی، توربین گاز، محفظه احتراق، سوئیچر، ناحیه گردش مجدد

## ۱. مقدمه

پیچیدگی ویژه خویش است که ناشی از تأثیر شرایط انتخابی مانند شرایط عملکردی و هندسه محفظه بر پدیده‌هایی بسیار پیچیده و ناشناخته مانند آشفتنگی است. پدیده‌هایی که هر کدام نقش ویژه خود را در کیفیت، بازده و پایداری (ناپویایی و پویایی) احتراق ایفا می‌کنند.

آشفتنگی جریان در محفظه احتراق توربین‌های گازی، به ویژه در ناحیه اولیه، اهمیت زیادی در تقویت اختلاط سوخت و هوا که نتیجه آن احتراقی کارا و کامل می‌شود، دارد. جریان گردش مجدد<sup>۱</sup>

امروزه موتورهای توربینی نقش برجسته‌ای در تبدیل انرژی در صنایع گوناگون دارند. چون اساس کار این موتورها بدون استثناء تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به انرژی حرارتی از طریق احتراق و سپس تبدیل آن به انرژی مکانیکی است، بررسی احتراق در آن‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. این بحث گسترده که از دیرباز سهم زیادی از مطالعات را به خود اختصاص داده، دارای حساسیت و

\* تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، گروه پژوهش بهینه‌سازی انرژی

1. Recirculation Flow

سوئیرلر، اختلاط داخلی بهتری می‌تواند به دست آید، بنابراین دوده و سطح آلاینده‌گی  $NO_x$  کاهش می‌یابد. همچنین، این فرایند باعث تولید شعله‌ای با درخشندگی و دوده کمتر می‌شود که ممکن است سبب کاهش دماهای جداره محفظه احتراق شود.

براساس مطالعه گوپتا و لوییس [۴]، چرخش القایی بر رشد جت، اندازه شعله، شکل، پایداری و شدت احتراق تأثیر دارد. میزان چرخشی که القا می‌شود، می‌تواند به وسیله عدد بدون بعد شناخته شده‌ای به نام عدد چرخش<sup>۱۲</sup> توصیف شود. برای سامانه‌های چرخش جریان محوری، عدد چرخش به عنوان تابعی از زاویه پره<sup>۱۳</sup> ثابت می‌تواند بیان شود که به وسیله متینگلی<sup>۱۴</sup> و همکاران [۵] با استفاده از شاخص‌های هندسی توصیف شده است. عدد چرخش بزرگتر یا مساوی ۰/۶ یک چرخش قوی را ایجاد می‌کند [۱]. قطر و طول ناحیه گردش مجدد با افزایش عدد چرخش تا ۱/۵ زیاد می‌شود، از آن به بعد، افزایش قطر ناحیه گردش از نو ادامه می‌یابد، در حالی که طول آن کم می‌شود. چنانچه یک ناحیه گردش مجدد خیلی قوی و طولانی القا شود، ممکن است برخی گازهای ثانویه اندکی خنک شوند و به دنبال آن مشکلات پایداری و کاهش بازده احتراق رخ دهد.

تحلیل عملکرد یک موتور توربینی نیاز به شناخت درست از عملکرد اجزای آن از جمله کمپرسور، محفظه احتراق و توربین دارد. باتوجه به هزینه‌های سنگین مطالعات تجربی و محدودیت‌های روش‌های نظری، استفاده از شبیه‌سازی عددی تبدیل به بخش مهمی از فعالیت‌های مراکز تحقیق و توسعه سازندگان موتورهای توربینی شده است. این ابزار کمک مناسبی به تسریع در طراحی نهایی اجزای موتور با کمترین نیاز به آزمون‌های سنگین و هزینه‌بر تجربی می‌کند.

جهرمی [۶] به بررسی ترکیب اثر سوئیرلر و جت‌های هوای ورودی در ناحیه اولیه محفظه احتراق توربین گاز پرداخته است. تحلیل دوبعدی جریان چرخشی نشان می‌دهد که مدل انتقال تنش رینولدز<sup>۱۴</sup> می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای مدل‌های دومعادله‌ای بر مبنای گرانشی استفاده شود. این مدل توانسته است رفتار جریان‌های چرخشی را به صورت کیفی به خوبی پیش‌بینی کند، در حالی که مدل‌های دیگر در این مورد کاملاً ناتوان

هنگامی که جریان هوای جت‌های اولیه به یکدیگر برخورد می‌کند، حاصل می‌شود که بخشی از هوا را در جهت بالادست جریان و بخشی را در جهت پایین دست جریان هدایت می‌کند. گاهی نفوذ جت بسیار ضعیف است که در این هنگام لازم است روش‌های دیگری به کار گرفته شود تا جریان گردش مجدد تقویت شود. یکرش، استفاده از سوئیرلر<sup>۱</sup> (سامانه چرخاننده جریان هوای ورودی به محفظه احتراق) است. هوا در راستای محوری به سوئیرلر وارد می‌شود و با عبور از پره‌های ثابتی که در یک زاویه مشخص از پیش تعیین شده قرار گرفته‌اند، مجبور به حرکت مارپیچی (حلزونی) می‌شود. این سامانه‌ها به طور معمول با استفاده از روابط تجربی که توسط لفوره<sup>۲</sup> و بالال<sup>۳</sup> ارائه شده است، طراحی می‌شود. مطالعات متعددی برای تعیین اثر سوئیرلرها انجام شده است. علاوه بر سوئیرلرهای جریان محوری عادی، سوئیرلرهای چرخش جریان همراه (موافق)<sup>۴</sup> و همچنین سوئیرلرهای چرخش جریان متقابل (مخالف)<sup>۵</sup> به وسیله تعدادی از مؤلفان، نظیر گیوکیانگ<sup>۶</sup> و گوتمارل<sup>۷</sup> [۲]، میکلو<sup>۸</sup> و همکاران [۳] و گوپتا<sup>۹</sup> و لوییس<sup>۱۰</sup> [۴] بررسی شده است. این دونوع سوئیرلر شامل دوسامانه چرخش جریان هم‌مرکزند که جریان هوا را به ترتیب در جهت‌های موافق و مخالف می‌چرخانند.

مطالعات شاخصی در بعضی از موارد انجام می‌شود تا تأثیر تقسیم جریان داخل سوئیرلر بر روی اندازه ناحیه گردش مجدد و توزیع دما در حالتی که نسبت هم‌ارزی در ناحیه احتراق ثابت نگه داشته می‌شود، بررسی شود. این سوئیرلرها بیشتر برای کاهش سطح آلاینده‌گی بررسی شده‌اند. گیوکیانگ و گوتمارل [۲] تأکید کردند که با افزایش ناحیه گردش مجدد، جریان هوا تقویت می‌شود و دمای احتراق کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش تشکیل  $NO$  حرارتی است.

بر اساس فعالیت میکلو و همکاران [۳]، به کارگیری سوخت‌پاش جت هوا<sup>۱۱</sup> پاشش سوخت بهتری را ایجاد می‌کند و با استفاده از

1. Swirler
2. Lefebvre
3. Ballal
4. Co-Swirlers
5. Counter-Swirlers
6. Guoqiang
7. Gutmarl
8. Micklow
9. Gupta
10. Lewis
11. Airblast Fuel Injector

12. Swirl Number
13. Mattingly
14. Reynolds Stress Model (RSM)

زاویه مخروط پاشش برای عدد چرخش ۰/۷ یا ۰/۹ در مقایسه با عدد چرخش ۰/۵ بزرگتر است، در حالی که برای عدد چرخش ۰/۵ منطقه توزیع سوخت بزرگتر و یکنواخت تر است.

بررسی‌های گذشته در زمینه محفظه احتراق و به‌طور ویژه سوئیپرلر طیف وسیعی از شبیه‌سازی‌های عددی مرتبط با توربین گاز را شامل می‌شود، اما تحلیل جریان سرد با تغییر شاخص‌های هندسی همانند تعداد و زاویه پره‌ها و همچنین تأثیر آن‌ها بر روی عدد چرخش و به تبع آن نرخ اختلاط سوخت و هوا که نتیجه آن احتراقی کارا و کامل می‌شود، از مواردی است که در بررسی‌های گذشته کمتر مورد توجه و تمرکز و تحقیق بوده‌است.

مطالعه پیش رو به تحلیل عددی جریان سرد هوا و سوخت در یک محفظه احتراق نمونه با تغییر در شاخص‌های هندسی مؤثر سوئیپرلر پرداخته‌است. در این مقاله تأثیر شاخص‌های هندسی سوئیپرلر بر روی شدت آشفته‌گی جریان در ناحیه اولیه (گردش مجدد) بررسی شده‌است که اهمیت بسیاری در تقویت اختلاط سوخت و هوا دارد و در نتیجه موجب پایداری بیشتر، کاهش دمای جداره محفظه و سرانجام، احتراق کامل و کارا می‌شود. از جمله مهمترین شاخص‌های هندسی مورد تحلیل در این مقاله، می‌توان به زاویه پره‌های سوئیپرلر که منجر به تغییر عدد چرخش می‌شود، اشاره کرد که نقش به‌سزایی در میزان آشفته‌گی میدان جریان در ناحیه گردش مجدد ایفا می‌کند.

## ۲. مدل‌سازی هندسی و تولید شبکه

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی جریان در محفظه احتراق ساده‌شده انجام می‌شود. سادگی این مدل سبب می‌شود که طراح با صرف زمان کمتری تأثیر تغییر شاخص‌های مورد نظر خود را بر رفتار جریان در محفظه مشاهده کند. برای مدل‌سازی هندسی محفظه احتراق از نرم‌افزار کتیا<sup>۵</sup> استفاده شده‌است. هندسه اجزای مختلف محفظه مدل‌سازی و سپس مونتاژ شده‌اند. در شکل (۱) نمایی از محفظه احتراق و سوئیپرلر طراحی شده برای آن، نشان داده شده‌است.

عمل کرده‌اند. در حالت سه‌بعدی وجود جت‌های تأمین هوای ناحیه اولیه بر پیچیدگی جریان می‌افزاید. در این حالت نیز مدل RSM پیش‌بینی مناسب‌تری از رفتار جریان به خصوص میدان سرعت محوری و انرژی جنبشی آشفته‌گی در نزدیکی محل برخورد جت‌های ناحیه اول ارائه می‌کند.

تأثیرهای گردابه‌ای در بهینه‌سازی مخلوط‌شدن سوخت و هوا و نقش سوئیپرلر هوا در این اختلاط به‌وسیله چن<sup>۱</sup> و همکاران [۷] بررسی شده‌است. با استفاده از شبیه‌سازی جریان محفظه احتراق توربین گاز در مقیاس آزمایشگاهی می‌توان این اختلاط را به‌وسیله انتخاب دقیق سوئیپرلر بهینه کرد.

هائو<sup>۲</sup> و همکاران [۹] چرخش جریان را با استفاده از سوئیپرلرهای هوا در مطالعه‌ای تجربی- عددی بررسی کردند و تأثیر آن را بر روی انتقال حرارت در داخل محفظه احتراق حلقوی بررسی نمودند؛ این آزمایش با جریان سرد انجام و با استفاده از دوربین مادون قرمز توزیع دما مشاهده و با نتایج عددی مقایسه شد.

بووانا<sup>۳</sup> و همکاران [۱۰] افزایش گردابه‌های اطراف پره‌های سوئیپرلر را با تغییر مساحت و زاویه آن‌ها بررسی کردند. چندین مطالعه خاصی برای یافتن بهترین نتیجه شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های مختلف آشفته‌گی نظیر SST و k-ε انجام شد؛ نتایج نشان داد که با تغییر زاویه پره‌ها و عدد چرخش، طول ناحیه گردش مجدد و گردابه‌ها افزایش و ویژگی اختلاط بهبود می‌یابد.

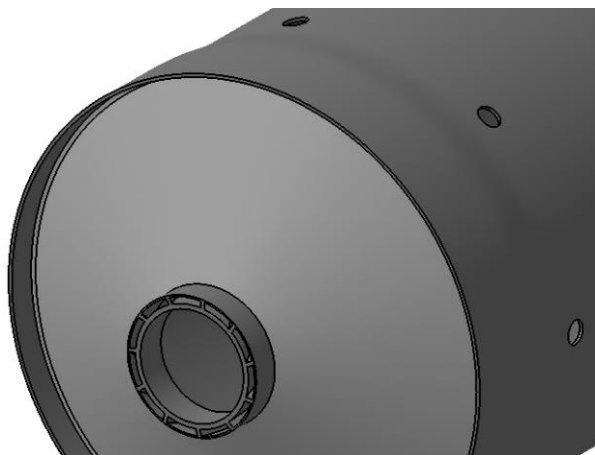
واشاهی و همکاران [۱۱] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی اثر طول پره شعاعی و عرض گذرگاه را بر روی میدان جریان چرخشی سه‌نوع سوئیپرلر سه‌گانه بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش بیش از حد طول پره شعاعی می‌تواند اثرهای قابل توجهی بر روی میدان جریان داشته‌باشد و الگوی جریان را تغییر دهد، همچنین تغییر عرض گذرگاه می‌تواند با تغییر در زاویه چرخش هوای خروجی از سوئیپرلر، میدان جریان متفاوتی را ایجاد کند.

فان<sup>۴</sup> و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای تجربی پاشش سوخت در یک محفظه احتراق با سوئیپرلر دوگانه را بررسی و تأثیر شدت چرخش بر روی ساختار پاشش را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که شدت چرخش تأثیر زیادی روی میدان جریان و ساختار پاشش دارد.

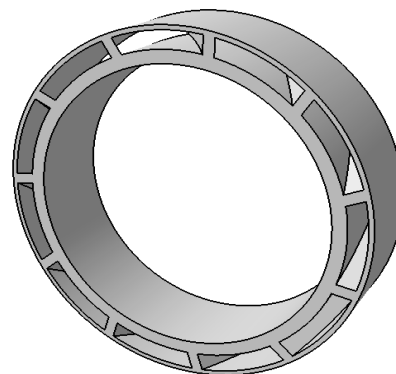
1. Chen
2. Hao
3. Bhuvana
4. Fan

5. CATIA V5-R21

برای تولید شبکه از ماژول مش‌زنی نرم‌افزار انسیس<sup>۱</sup> استفاده شده‌است؛ شبکه تولیدی ترکیبی از المان‌های prism در لایه مرزی و tetra در درون حجم محفظه است. در شکل (۲) شبکه تولیدی در نماهای مختلف نمایش داده شده‌است.



(الف)



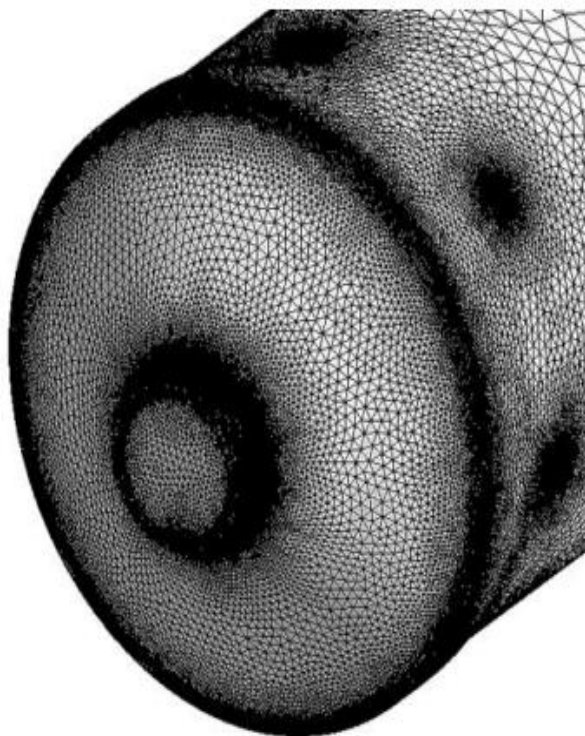
(ب)

شکل ۱. الف) نمایی از محفظه احتراق، (ب) سوئیچرلر طراحی شده برای محفظه احتراق.

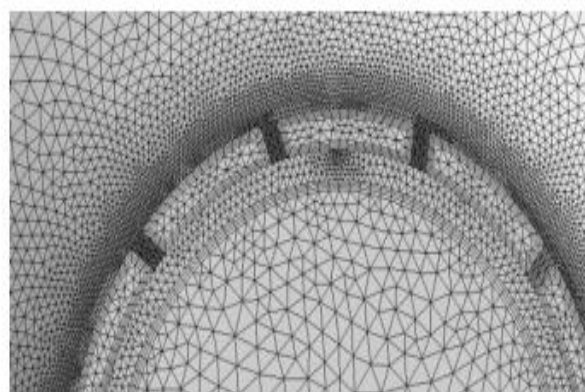
ابعاد هندسی سوئیچرلر طراحی شده در جدول (۱) آورده شده‌است.

جدول ۱. ابعاد هندسی سوئیچرلر طراحی شده

مقدار	مشخصه
۱۰	عمق سوئیچرلر (میلی‌متر)
۳۲/۴	قطر دایره‌ها (از داخل به خارج) (میلی‌متر)
۳۵/۴	
۳۹/۴	
۴۰/۴۷	زاویه پره (درجه)
۳۳	تعداد پره
۱۱	



(الف)



(ب)

شکل ۲. نمایی از شبکه‌بندی: الف) محفظه احتراق، (ب) سوئیچرلر.

1. ANSYS Meshing

## ۳. معادلات حاکم و شرایط مرزی

در حال حاضر دودیدگاه برای محاسبه عددی جریان های چندفازی وجود دارد: دیدگاه اوایلر- اوایلر و دیدگاه اوایلر- لاگرانژ. در نگرش اوایلر- اوایلر، فازهای مختلف به عنوان یک محیط درهم تنیده پیوسته به صورت ریاضی بررسی می شوند. معادلات حاصل از قانون های بقا برای هرفاز به منظور به دست آوردن مجموعه ای از معادلات استخراج می شوند. مدل لاگرانژی فاز گسسته که در این مطالعه از آن استفاده شده است، دیدگاه اوایلر- لاگرانژ را دنبال می کند. در این مدل فاز سیال گازی با حل معادلات ناور استوکس متوسط گیری شده زمانی به عنوان یک محیط پیوسته، تلقی می شود، در حالی که فاز پراکنده با ردیابی تعداد زیادی از ذرات در میدان جریان محاسبه شده حل می شود. فاز پراکنده مایع می تواند با فاز گازی تبادل اندازه حرکت، جرم و انرژی نماید.

باتوجه به ماهیت چرخشی هوای ورودی به محفظه جریان آشفته در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر فاز گاز شامل معادله بقای جرم و اندازه حرکت برای جریان آشفته است [۱۳]:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{p} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{p} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{p} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{p} \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] \quad (2)$$

که در آن  $\bar{u}$  سرعت،  $\bar{p}$  فشار،  $\bar{\rho}$  چگالی و  $\bar{B}$  نیروی حجمی است که همگی متوسط گیری زمانی شده اند. همچنین،  $u'$  نوسان زمانی سرعت و  $\mu$  گرانیوی مطلق است.

در این مطالعه از مدل آشفته RSM استفاده شده است. این مدل توصیف دقیق تری از آشفتهگی را ارائه می دهد و بر روی طیف بسیار وسیع و متنوعی از جریان ها، همچون جریان های دارای خطوط جریان منحنی و یا جریان های چرخشی و دورانی و همچنین جریان های جابجایی آزاد معتبر است.

در مدل فاز گسسته، مسیر حرکت ذرات مایع از طریق ردیابی ذرات در الگوی جریان محاسبه شده، صورت می گیرد. مسیر ذرات مایع با توجه به نیروی گرانش و نیروی اعمال شده از طریق جریان بر ذرات شناسایی می شود. معادله حرکت ذرات در این حالت به صورت معادله (۳) است [۱۳]:

$$\frac{du_{pj}}{dt} = F_D(u_i - u_{pj}) + \Delta g_i + F_{ext,i} \quad (3)$$

که در آن  $u_p$  سرعت ذرات،  $F_D$  نیروی پسای اعمال شده بر واحد جرم ذره،  $F_{ext}$  مجموع نیروی شتاب دهنده به ذرات بر واحد جرم است.

در این مطالعه از شرط مرزی بده جرمی برای مرزهای ورودی شامل سوئیرلر و سوراخ های جانبی استفاده شده است. فشار ایستایی در مرز خروجی به طور محلی مشخص شده است. بقیه سطوح به عنوان دیواره با شرط نداشتن لغزش در نظر گرفته شده اند.

## ۴. نتایج

الگوی جریان هوا در ناحیه اولیه، نقش مهمی در پایداری شعله بازی می کند. ایجاد جریان هوای چرخشی، به ایجاد ترکیب با کیفیت سوخت و هوای ورودی کمک می کند. سوئیرلر، ناحیه برشی قوی با آشفتهگی زیاد ایجاد می کند و به ترکیب شدن هوا و سوخت سرعت می بخشد. برای سوئیرلر جریان محوری عدد بی بعد چرخش،  $S_N$ ، که برای مشخص کردن میزان چرخش جریان معرفی می گردد که به شکل زیر تعریف می شود [۵]:

$$S_N = \frac{2}{3} \tan \theta_v \left[ \frac{1 - \left( \frac{r_{hub}}{r_t} \right)^3}{1 - \left( \frac{r_{hub}}{r_t} \right)^2} \right] \quad (4)$$

که در آن  $\theta_v$  زاویه پره،  $r_{hub}$  و  $r_t$  به ترتیب شعاع پایه پره و شعاع سوئیرلر (نوک پره) هستند.

به منظور مطالعه شاخصی، نتایج برای اعداد چرخش ۰/۶۱، ۰/۷۸ و ۱/۱ به دست آمده است. تغییر عدد چرخش با تغییر در زاویه پره هر سوئیرلر ایجاد شده است. با ثابت نگه داشتن عدد چرخش و همچنین قطر داخلی و خارجی سوئیرلر، با استفاده از رابطه (۱) اندازه زاویه پره محاسبه می شود. زاویای محاسبه شده برای پره سوئیرلر در جدول (۲) آورده شده است. مدل پایه بر اساس مشخصات هندسی سوئیرلر موجود بر روی محفظه احتراق مورد مطالعه و مدل های ۲ و ۳ با تغییر در زاویه پره نسبت به مدل پایه ایجاد شده اند. با افزایش زاویه پره، با توجه به ثابت بودن قطر سوئیرلر، تعداد پرها کاهش می یابد. با ثابت نگه داشتن نرخ جریان جرمی عبوری از سوئیرلر در مدل های ۲ و ۳ تنها اثر افزایش زاویه پره و به تبع آن عدد چرخش

بر روی محور مرکزی محفظه احتراق که با فاصله ۵ و ۱۰ سانتی متری از لبه جلویی آن قرار گرفته‌اند، برای مدل ۱ (پایه) محاسبه شده‌اند. نمودار تغییرات سرعت با افزایش تعداد مش‌های شبکه در شکل (۳) آورده شده‌است.

با توجه به روند تغییرات نشان داده شده در شکل (۳)، شبکه دوم با حدود پانصد هزار حجم کنترل برای شبیه‌سازی و استخراج نتایج استفاده شده است.

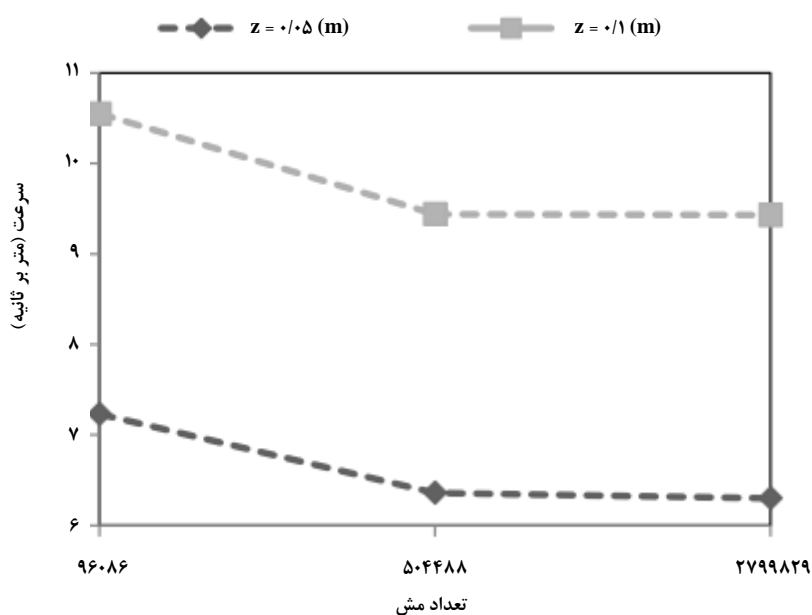
بررسی شده‌است. فشار ورودی هوا به محفظه احتراق ۹۲۳/۸۹۷ کیلو پاسکال و افت فشار سوئیپرلر برای تمامی مدل‌ها ۵/۱ درصد در نظر گرفته شده‌است.

#### ۱-۴ استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه، سه شبکه با تعداد حجم کنترل‌های مختلف ایجاد و شبیه‌سازی بر روی آن‌ها انجام شده‌است. اندازه‌های کمیت‌های اصلی جریان از قبیل سرعت و فشار، برای دونقطه

جدول ۲. سه مدل سوئیپرلر مختلف طراحی شده.

مدل ۳	مدل ۲	مدل ۱ (پایه)	شاخص‌ها
۵/۱	۵/۱	۵/۱	افت فشار (%)
۸	۱۰	۱۱	تعداد پرها
۵۰	۴۰	۳۳	زاویه پرها (درجه)
۱/۱	۰/۷۸	۰/۶۱	عدد چرخش
۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۷۷	نرخ جریان ورودی (کیلوگرم بر ثانیه)



شکل ۳. تغییرات سرعت برای سه شبکه بندی مختلف در نقاط مرکزی صفحه‌های  $z = 0.05, 0.1(m)$ .

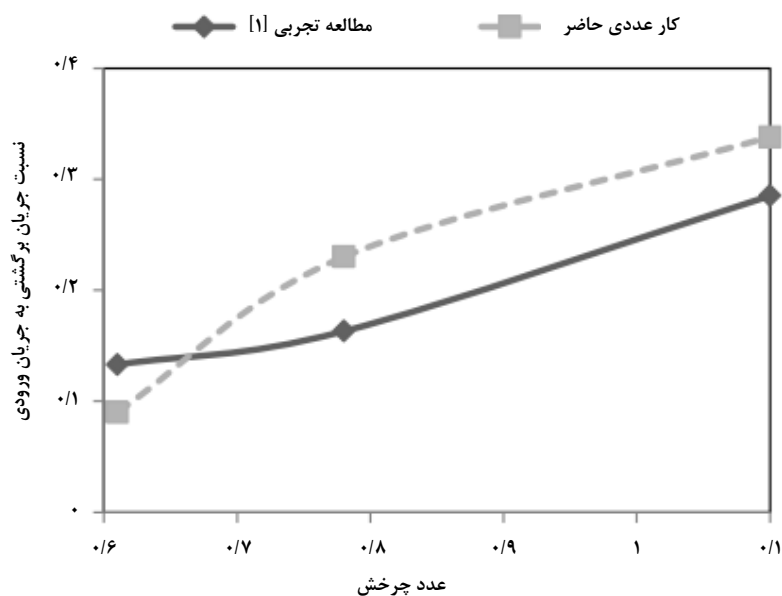
## ۲-۴ ارزیابی مدل

در این مقاله نتایج عددی جریان برگشتی در ناحیه گردش مجدد با مطالعات تجربی ارائه شده به وسیله لفور و بالال [۱] مقایسه شده است. نتایج تجربی ارائه شده با اندازه گیری سرعت روی محور سوئیچرها با طراحی های متفاوت به دست آمده است و حداکثر جریان جرمی برگشتی را به ازای اعداد چرخش مختلف نشان می دهد. برای ارزیابی مدل ارائه شده در این تحقیق، نتایج حاصل از سه عدد چرخش ۰/۶۱، ۰/۷۸ و ۱/۱ به دست آمده از این مطالعه به صورت کمی با

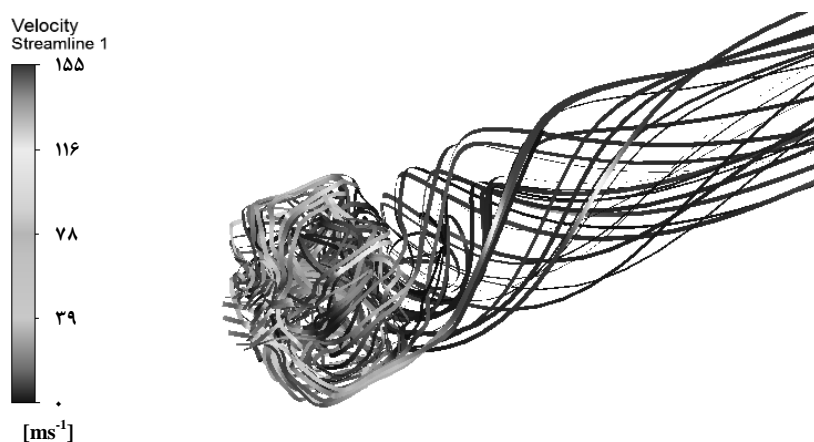
نتایج مطالعات قبلی مقایسه شده است. همان گونه که در شکل (۴) دیده می شود، روند تغییرات نسبت جریان برگشتی به جریان ورودی به محفظه از طریق سوئیچر برای اعداد چرخش مختلف، مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

## ۳-۴ مطالعه شاخصی

خطوط جریان به دست آمده از حل عددی برای مدل ۱ (پایه) در شکل (۵) آورده شده است.



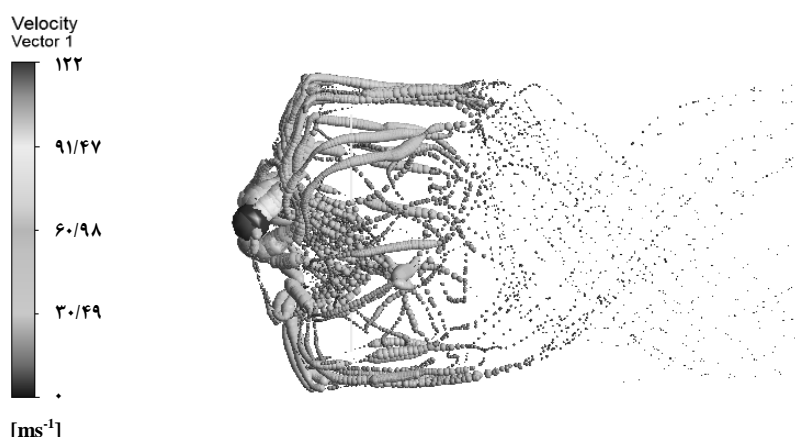
شکل ۴. مقایسه نسبت جریان برگشتی به جریان ورودی حاصل از کار عددی حاضر و مطالعه تجربی [۱] در اعداد چرخش مختلف.



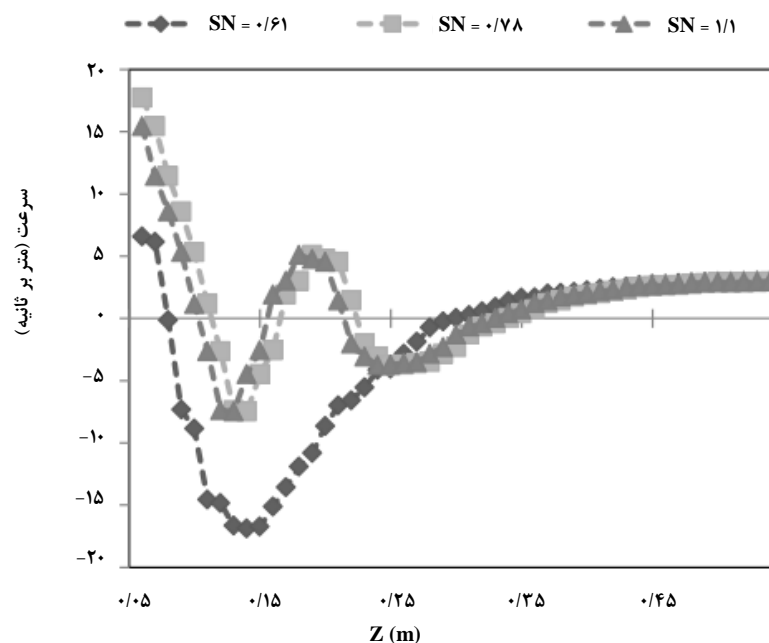
شکل ۵. خطوط جریان هوای ورودی به محفظه احتراق.

محوری سرعت روی خط مرکزی محفظه احتراق در شکل (۷) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود با افزایش عدد چرخش نقاط کمینه یا بیشینه محلی مؤلفه محوری سرعت در طول خط مرکزی محفظه افزایش می یابد. جهت جریان بر روی محور محفظه برای عدد چرخش ۰/۶۱ دو مرتبه و برای اعداد چرخش ۰/۷۸ و ۱/۱ چهار مرتبه تغییر جهت می دهد که نشان دهنده افزایش نقاط سکون و جریان برگشتی با بزرگ شدن عدد چرخش است. افزایش جریان های گردابی با زیاد شدن عدد چرخش و به دنبال آن بزرگتر شدن ناحیه گردش مجدد است.

برای بررسی تأثیر ناحیه گردش مجدد و اطمینان از شکل گیری درست آن، میدان سرعت فاز دوم یعنی ذرات سوخت مایع پس از پاشش در شکل (۶) برای مدل ۱ (پایه) ترسیم شده است. در این شکل برای اطمینان از اختلاط هوا و سوخت با استفاده از سوئیرلر طراحی شده و میدان جریان القاشده به وسیله آن، مسیر حرکت ذرات سوخت مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می شود در بخش جلو محفظه یک ناحیه بازگشتی قوی تشکیل شده که مقدار زیادی از سوخت را در خود درگیر کرده است. تأثیر تغییر عدد چرخش بر روی رفتار جریان با مقایسه مؤلفه



شکل ۶. سرعت ذرات سوخت مایع رهاشده از محل سوخت پاش.



شکل ۷. تغییرات مؤلفه محوری سرعت روی خط مرکزی محفظه.



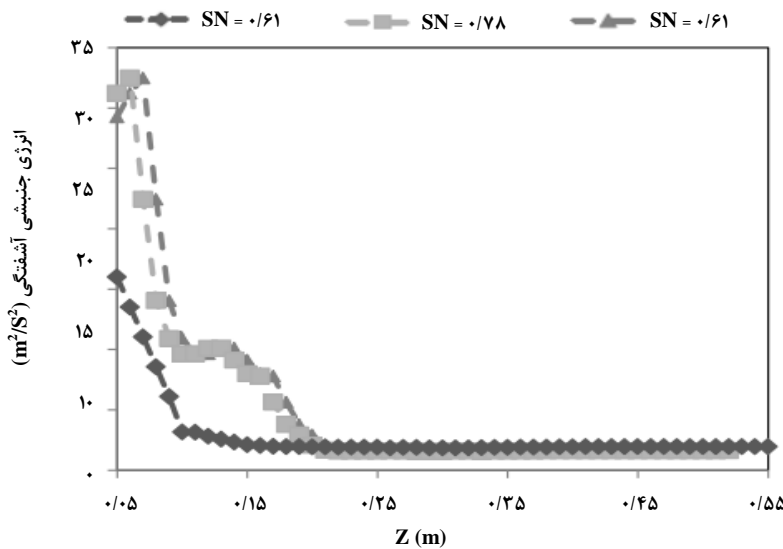
اولیه افزایش می‌یابد. مطابق این نمودار با افزایش عدد چرخش، انرژی جنبشی آشفتگی دیرتر در امتداد طول محفظه مستهلک می‌شود.

در نمودار شکل (۹) مؤلفه محوری سرعت برای هر سه عدد چرخش بر روی صفحه‌ای به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از لبه جلویی محفظه احتراق با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود هر سه عدد چرخش، الگوی سرعت یکسانی دارند و دو گردابه یکی در بالا و دیگری در پایین محور محفظه ایجاد می‌کنند. همچنین دونقطه سکون بر روی این صفحه دیده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر جهت بردار سرعت محوری در این نقاط است.

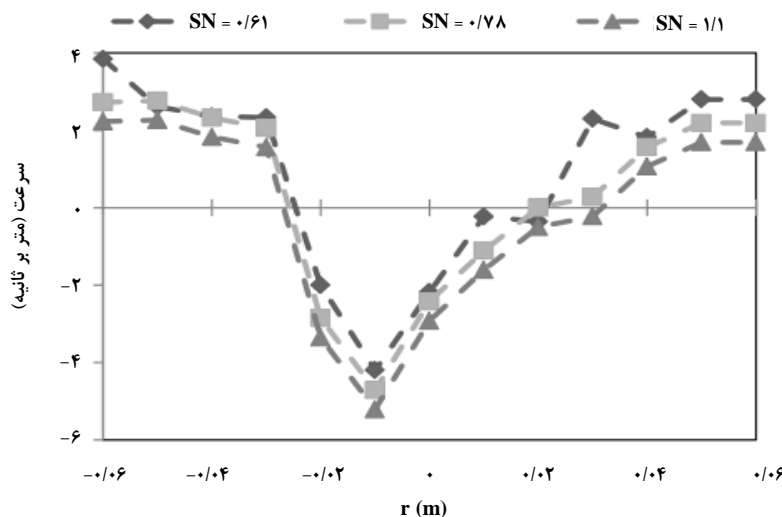
شکل (۸) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی به‌ازای اعداد چرخش متفاوت را نشان می‌دهد. مقدار انرژی جنبشی آشفتگی،  $k$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$k = \frac{1}{2} [(\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2] \quad (5)$$

که در آن  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  مؤلفه‌های نوسانی سرعت هستند. با افزایش عدد چرخش، جریان محوری ورودی به سوئیچر بیشتر و کامل‌تر می‌چرخد و با اغتشاش بیشتر جریان، مؤلفه‌های نوسانی سرعت، بزرگتر می‌شود و در نتیجه انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه



شکل ۸. تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی روی خط مرکزی محفظه.



شکل ۹. تغییرات مؤلفه محوری سرعت روی صفحه  $z = 0.1 (m)$

## ۵. نتیجه گیری کلی

در این پژوهش جریان دو فاز هوا و سوخت مایع در محفظه احتراق یک نمونه توربین گاز، به صورت عددی حل شد؛ اهمیت این حل در تسهیل مطالعه شاخصی، روی متغیرهای هندسی محفظه احتراق این نوع موتورها است. بدین منظور مدل ساده شده‌ای از محفظه احتراق توربین گاز نمونه ایجاد شد. شبکه بندی محفظه در یک نرم افزار تجاری، ایجاد و مدل مناسب آشفته‌گی انتخاب شد. به منظور ارزیابی مدل ارائه شده در این تحقیق، نتایج حل عددی جریان چرخشی در محفظه، با مدل سوئیرلر پایه با نتایج تجربی ارائه شده در مراجع مقایسه شد که تطابق نسبتاً خوبی نشان داد. شبیه سازی عددی دوفازی، حجم ناحیه گردش مجدد، میزان جریان برگشتی و مسیر حرکت ذرات سوخت مایع در محفظه را به خوبی پیش بینی نمود. در این مقاله، مطالعه شاخصی روی سوئیرلر محفظه احتراق با تغییر در مقدار عدد چرخش انجام شد. هر سه نوع سوئیرلر مدل شده با ایجاد میدان برشی القایی قوی، باعث بهبود اختلاط هوا و سوخت در محفظه مورد مطالعه شدند. سوئیرلرهای هوا به کمک سوراخ های رقیق سازی هوا در ناحیه اولیه با ایجاد یک ناحیه گردش مجدد قوی مانند یک جسم توپر غیر باریک<sup>۱</sup> عمل کردند و باعث ایجاد منطقه ای با سرعت پایین شدند. ایجاد این منطقه می تواند باعث پایداری هرچه بیشتر شعله شود. نتایج تغییر عدد چرخش روی جریان نشان داد که با افزودن عدد چرخش، سرعت محوری در امتداد محفظه افزایش می یابد و انرژی جنبشی آشفته‌گی، دیرتر از بین می رود؛ در نتیجه تغییر عدد چرخش باعث افزایش شدت آشفته‌گی و در نهایت اختلاط بهتر هوا و سوخت شد.

## مراجع

- [4] Gupta, A. K., Lewis, M. J., "Effect of Swirl on Combustion Characteristics in Premixed Flames", Transactions of the ASME, Vol. 120, pp. 488-494, (1998).
- [5] Mattingly, J. D., Heiser, W. H., Pratt, D. T., "Aircraft Engine Design", Second Edition, AIAA Education Series, (2002).
- [۶] جهرمی، م.، "ترکیب اثر چرخاننده و جت های هوای ورودی در ناحیه اولیه محفظه احتراق توربین گاز"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۱).
- [7] Chen, B., Ho, K., Qin, F. G. F., Jiang, R., Akbar, Y. A., Chan, A., "Validation and Visualization of Decaying Vortex Flow in an Annulus", Energy Procedia, Vol. 75, pp. 3098-3104, (2015).
- [8] Weiye, H., Yuzhen, L., Chi, Z., Chih-Jen, S., "Effect of Boundary Conditions on Downstream Vorticity from Counter-Rotating Swirlers", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 28, pp. 34-43, (2015).
- [9] Hao, Q., Yuzhen, L., Jibao, L., "Precessing Motion in Stratified Radial Swirl Flow", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 29, pp. 386-394, (2016).
- [10] Bhuvana, R. G., Srinivasan, S. A., Murugan, D. T., "CFD Analysis on Swirl Angle Effect in Gas Turbine Combustion Chamber", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 402, 2<sup>nd</sup> International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2018), Kattankulathur, India, (2018).
- [11] Vashahi, F., Rezaei, S., Alidoost Dafsari, R., Lee, J., "Sensitivity Analysis of the Vane Length and Passage Width for a Radial Type Swirler Employed in a Triple Swirler Configuration", Theoretical & Applied Mechanics Letters, Vol. 9, pp. 363-375, (2019).
- [12] Fan, X., Liu, C., Xu, G., Zhang, C., Wang, J., Lin, Y., "Experimental Investigations of the Spray Structure and Interactions between Sectors of a Double-Swirl Low-Emission Combustor", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 33, No. 2, pp. 589-597, (2020).
- [13] Kleinstreuer, Cl., "Two-Phase Flow: Theory and Applications", Frist Edition, CRC Press, (2003).
- [۱۴] شجاعی فرد، م. ح.، طحانی، م.، "مقدمه ای بر جریان های آشفته و مدل سازی های آن"، ویرایش اول، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۱).
- [1] Lefebvre, A. H., Ballal, D. R., "Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions", Third Edition, New York: CRC Press, (2010).
- [2] Guoqiang, L., Gutmarl, E. J., "Effects of Swirler Configuration on Flow Structures and Combustion Characteristics", ASME Paper No. GT2004-53674, (2004).
- [3] Micklow, G. J., Roychoudhury, S., Nguyen, H. L., Cline, M. C., "Emission Reduction by Varying the Swirler Airflow Splits in Advanced Turbine Combustors", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 115, pp. 563-569, (1993).

1. Bluff Body