مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۲۵ و ۲۴ آبان ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف FCCI-2018-1093

شبیهسازی سهبعدی جریان داخل یک انژکتورهممحور پیچشی مقیاس کوچک

محمدعلى اختردانش عليرة دانشجوى دكتراى دانشگاه شريف كارش پژوهشكده سامانههاى حملونقل فضايى پژوهشكده سامانه پژوهشگاه فضايى ايران پژوهشگا um.sharif.edu Mohammadali.akhtardanesh@ae.sharif.edu

حامد کریمی دانشجوی دکترای دانشگاه شریف پژوهشکده سامانههای حملونقل فضایی پژوهشگاه فضایی ایران Karimi_hamed@ae.sharif.edu

چکیدہ

در پژوهش حاضر، جریان داخلی یک انژکتور هممحور پیچشی مقیاس کوچک با استفاده از نرمافزار انسیس فلوئنت بهصورت سهبعدی شبیهسازی شد. این کار با هدف بررسی میزان تطابق ضریب تخلیه و زاویه پاشش گذرگاههای سوخت و اکسنده انژکتور با طراحی انجامشده برای یک رانشگر شیمیایی دو پیشرانه انجام شد. برای این کار از مدل سهبعدی انژکتور و فرضیاتی از قبیل جریان تراکم ناپذیر و ناپایا، معادلات آشفتگی RSM و روش چند فازیVOF استفاده شد. نتایج شبیهسازی با دادههای محدود تجربی موجود در منابع در این مقیاس از انژکتور مقایسه شد. مقایسه حل عددی با نتایج تجربی نشان داد که خطا در محاسبه زاویه پاشش کمتر از ۹٪ است. محاسبه ضریب تخلیه و زاویه پاشش با بهکارگیری روابط تجربی موجود نشان داد که نتایج حاصل، اختلاف قابل توجهی دارند. این مسئله تأییدی بر این نکته است که برای طراحی انژکتورهایی در مقیاس این پژوهش، روابط موجود نامعتبر بوده و باید فرآیند شبیهسازی و انجام آزمایش در دستور کار قرار گیرد. گذرگاه بیرونی انژکتور به دلیل وجود بدنه گذرگاه درونی، افت فشار بالاتر، زاویه پاشش و ضریب تخلیـه کمتـری نسبت به یک انژکتور پیچشی متداول با همان هندسه دارد. اما سرعت خروجی آن بیشتر از حالت یک انژکتور پیچشی متداول است.

کلمات کلیدی: رانشگر فضایی دو پیشـرانه، انژکتـور هـممحـور پیچشـی، شبیهسازی عددی، ضریب تخلیه، زاویه پاشش.

۱ مقدمه

در میان رانشگرهای فضایی، رانشگرهای شیمیایی مایع دارای جایگاه ویژهای هستند. این نوع پیشرانها در عملیات انتقال مداری و یا کنترل فضاپیما و ماهوارهها استفاده می شوند. رانشگرهای شیمیایی دو پیشرانه در دامنه یگستردهای از نیروی پیشران به کار گرفته می شود. ضربه ویژه بالا، امکان خاموش و روشن کردن آنها به دفعات، زمان پاسخ کم و کنترل پذیری مناسب باعث شده که این رانشگرها همواره به عنوان یکی از انتخابهای برتر در سامانه های کنترل موقعیت و وضعیت ماهواره ها مطرح باشند.

یکی از اجزاء کلیدی رانشگرهای دو پیشرانه، انژکتور است. طراحی انژکتور علیـرغم پیشـرفتهـای صـورت گرفتـه، همچنـان وابسـته بـه دادههـای آزمایشگاهی بوده و فرآیندی زمانبر و هزینهبر است. اطلاعـات موجـود در این زمینه اعم از روابط تجربی و شبیهسازیهای عددی وابستگی زیادی بـه ابعاد هندسی انژکتور، شرایط عملکردی و خواص سیال عامـل بسـتگی دارد لذا استفاده از آنها بدون در نظر گرفتن محدودیتهای موجـود بـه نتـایچ قابل قبولی منجر نمی شود.

یکی از انواع انژکتورهایی کـه در رانشـگرهای دو پیشـرانه بـه کـار مـیرود، انژکتور پیچشی یا نوع هممحور آن است. انژکتورهای پیچشی به سبب خواص مطلوب اسپری از جهات مختلف بسیار موردتوجه طراحان محفظه-های احتراق هستند. به همین دلیل، پژوهشهای فراوانی بر روی فیزیک جریان در داخل آن ها و خواص مختلف اسپری خروجی از این نوع از انژکتورها انجام شده است. مجموعهای از بهترین نتایج تحلیلی و تجربی این پژوهشها در مراجع [۱] و [۲] ارائه شده است. همزمان، فعالیتهای مختلفی در حوزه عددی با هدف شناسایی این انژکتور انجام شده است. در سال ۲۰۰۰ ساکمن و همکاران [۳] با کمک روش عددی روی انژکتور فشاری پیچشی نسبتاً بزرگ مطالعه پارامتری انجام دادند. آن ها سه گروه بی بعد L_o/D_o ، L_s/D_s و D_s/D_o . را به منظور بررسی تأثیر هندسه بر روی ضخامت فیلم سیال در اریفیس خروجی، زاویه پاشش و ضریب تخلیه انتخاب کردند. نتایج کارهای آنان نشان داد در یک دبی جرمی ثابت تغییر هندسی عملکرد انژکتـور را بشـدت تحـت تـأثير قـرار مـیدهـد. لاوانتـه و همکاران [۴] در ۲۰۰۲ به کمک مدل VOF هندسه سهبعدی و دوبعدی انژکتور پیچشی را مطالعه کرد. آنها یک انژکتور با ابعاد بزرگ (در حدود سانتیمتر) را با سیال آب و گلیسیرین مطالعه کردند. نتایج عددی آن ها در تخمین زاویه اسپری تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. همچنین این پژوهش نشان داده است سطح حفره هوا رفتار ناپایا و تناوبی دارد. در ۲۰۰۴ مدسن[۵] هندسه سهبعدی یک انژکتور فشاری پیچشی را به کمک مدل VOF و روش شبیهسازی گردابههای بزرگ^۱ LES با یک شبکه ۶۰۰ هزار الماني مطالعه كردند. آنها توانستند شكل و ابعاد حفره هوا، توزيع سرعت محوری و توزیع سرعت زاویهای درون محفظه چرخش را با نتایج تجربی مقایسه کنند. در سال ۲۰۱۲ سامر[۶] حفره هوای یک انژکتور فشاری چرخشی را به کمک روش PDPA^۲ مطالعه کرد و نتایج حل عددی دوبعدی و سهبعدی را با آن مقایسه نمود. نتایج ایشان نشان داد در تخمین افت فشار و زاویه پاشش انژکتور، مدل سهبعدی کارآمدتر از مدل دوبعدی است. در ۲۰۱۶ آمدورم[۷] یک انژکتور فشاری پیچشی پروپان مـایع را بـه کمک مدل VOF و ۵۰ هزار المان حل عددی کرد. قطر راهگاه ورودی انژکتور آنها ۲ میلیمتر بود و سه راهگاه ورودی برای انژکتور استفاده شده بود. ایشان نیز توانست میدان جریان داخلی این انژکتور را مدلسازی کند و تشکیل حفره هوا را مشاهده کند.

در داخل کشور پژوهشهای متعددی روی انژکتورهای فشاری پیچشی انجام شده است. ازجمله در سال ۲۰۰۴صالحی و همکاران [۸] اقدام به بررسی تجربی و حل عددی جریان داخل انژکتور فشاری پیچشی کردند. ایشان از مدل چند فازیVOF و مدل آشفتگی RSM یک انژکتور را بررسی کرد و زاویه اسپری و ضخامت فیلم مایع را مقایسه کرد. خطای

علیرضا رمضانی کارشناس ارشد پژوهشکده سامانههای حملونقل فضایی پژوهشگاه فضایی ایران Ramezani_a@alum.sharif.edu

¹ Large Eddy Simulation

² Phase Doppler Particle Analyzer

حدود ۵٪ بین کار تجربی و عددی ایشان مشاهده شد. در سال ۲۰۰۶ مراد و اسلامی [۹] بر روی تشکیل فیلم مایع درون یک انژکتور هممرکز مایع-مایع مطالعه عددی و تجربی انجام دادند. آنها برای این منظور از سیال آب استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی آنها در محاسبه ضخامت فیلم سیال ۱۵ ٪ خطا نشان داد. در سال ۲۰۱۴ جان محمدی و کبریایی [۱۰] یک انژکتور فشاری پیچشی را بهصورت سهبعدی، به کمک مدل VOF و مدل آشفتگی RSM ضخامت فیلم مایع، طول شکست و زاویه اسپری را به روش عددی مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد در تخمین طول شکست ۱۵٪ خطا در مقایسه با نتایج تجربی وجود دارد. اما زاویه پاشـش و

ضخامت فیلم سیال در اریفیس خروجی کمتر از ۳٪ خطا داشت. در فرآیند طراحی انژکتور برای یک رانشگر دو پیشرانه برای پروژهای که در حال حاضر در پژوهشکده سامانههای حملونقل فضایی در جریان است، ابعادی برای انژکتور بهدست آمده که آن را در زمره انژکتورهای با مقیاس کوچک قرار میدهد. اغلب منابع منتشرشده در مقیاسی بزرگتر از انژکتور حاضر هستند. ازجمله منابع محدودی که در حوزه انژکتورهای پیچشی مقیاس کوچک منتشرشده، میتوان به مرجع [۱۱] اشاره کرد که بهصورت تجربي انجام شده است.

گوینداراج [۱۱] در سال ۲۰۱۴، چهار هندسه مختلف را با آب آزمایش كرده است. نتايج نشان داد طول شكست و قطر ميانگين ساوتر فطرات با افزایش فشار کاهش می یابد. همچنین مشخص شد، زاویه پاشش با افزایش فشار بیشتر میشود. اما هندسه انژکتور یا به عبارت بهتر ثابت انژکتور، K بر روی زاویه پاشش تأثیر دارد به گونهای که با افزایش ثابت انژکتور زاویـه پاشش کاهش می یابد. در فشارهای نسبتاً بالا اثر افزایش فشار بر روی زاویه پاشش كمتر مىشود.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی عـددی بعضـی از کمیـتهـا ماننـد ضـریب تخلیه و زاویه اسپری و مقایسه میزان تطابق روابط تجربی موجود در منابع برای این نوع از انژکتورها است. در نتیجه این پژوهش، به دنبال حل این مسئله است که آیا می توان از روابط موجود تجربی برای تعیین مشخصات انژکتورهای پیچشی مقیاس کوچک استفاده کرد و روش حل عددی مرسوم برای انژکتورهای پیچشی قابلیت به کارگیری برای انژکتورهای مقیاس کوچک را دارد. درنهایت به دنبال تعیین کمی پارامترهای مذکور برای یک انژکتور طراحی شده در مقیاس کوچک است تا از نتایج آن در فرآیند طراحی استفاده شود. گام بعدی این پژوهش، ساخت و آزمایش این انژکتور مقایسه نتایج حاصل با نتایج ارائه شده در این پژوهش است.

در بخش بعدی، هندسه عمومی انژکتور پیچشی و فیزیک جریان داخل آن و نقش آنها در خواص اسپری خروجی از انژکتور بررسی می شود. در ادامه، روش حل عددی مسئله حاضر تشریح می شود. در بخش نتایج، بعد از بیان نحوه استقلال حل از شبکه محاسباتی، میزان تطابق نتایج حاصل از شبیه-سازی با دادههای تجربی موجود در مرجع [۱۱] برای یک انژکتور مقیاس کوچک ارائه میشود. سپس نتایج حاصل از شبیهسازی انژکتور هممحور پیچشی طراحی شده ارائه و نتایج حاصل بررسی می شود. در پایان هم با به-کارگیری روابط تجربی موجود، پارامترهای ضریب تخلیه و زاویه اسپری برای گذرگاههای درونی و بیرونی انژکتور مذکور محاسبه و باهم مقایسه می گردد. درنهایت جمعبندی از پژوهش حاضر ارائه می شود.

۲ فیزیک جریان داخلی انژکتور پیچشی با ورودی مماسی

در انژکتورهای پیچشی با ورودی مماسی، جریان با فشار بالا از طریق راهگاه ورودی افقی مماس بر دیواره انژکتور مطابق با شکل ۱وارد محفظه چرخش انژکتور مے شود. به علت سرعت چرخشے زیاد جریان درون انژکتور یک حفره هوا^۲ تشکیل می شود. صفحه مایع بعد از یک فاصله کوتاه که به آن طول شکست ٔ گفته می شود، ناپایدار شده و فرومی پاشد و یک افشانه از قطرات تولید می شود. در بخش مرکز انژکتور یک ناحیه با نام حفره هوا وجود دارد. حفره هوا در اریفیس خروجی توسعه مییابد و سبب کاهش ضخامت فیلم سیال میشود. ضخامت فیلم سیال بر روی زاویه یاشش۴، قطر قطرات و سایر پارامترهای عملکردی انژکتور تأثیر میگذارد.



در شکل ۲ هندسه انژکتور هممحور فشاری پیچشے مشاهده میشود. انژکتـور دو ورودی بـرای سـوخت و دو ورودی بـرای اکسـنده دارد. قطـر محفظه چرخش، قطر اریفیس خروجی و قطر ورودی هر انژکتور اثرات فراوانی بر روی عملکرد انژکتور خواهند داشت.



شکل ۲ شماتیک انژکتور پیچشی دوپایه [۲]

در مطالعه عملکرد انژکتور از سه پارامتر ثابت انژکتور^۵با نماد K، زاویه پاشش با نماد lpha و ضریب تخلیه $^{2}_{
m D}$ استفاده می شود. ثابت انژکتور پارامتر هندسی است که برابر است با نسبت سطح مقطع ورودیها به قطر محفظه چرخش در قطر اریفیس خروجی (معادله (۱)). ضریب تخلیه نیز میزان دبی جرمی واقعی عبوری از انژکتور به میزان دبی جرمی تئوری تعریف می شود (معادله (۲)). همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، می توان به کمک نسبت مؤلفه چرخشی سرعت به مؤلفه محوری سرعت با معادله (۳) تعریف کرد. معادله (۳) نشان میدهد هرچه مؤلفه سرعت زاویهای افزایش پیدا کند، زاویه پاشش افزایش پیدا می کند. هرچه مؤلفه سرعت محوری افزایش پیدا کند، زاویه پاشش کم میشود.

²Air core ³Breakup length Spray angle ⁵Atomizer Constant ⁶Discharge Coefficient

¹Suater Mean Diameter (SMD) هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ۲۴و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

$$K = \frac{A_p}{D_o D_s} = \frac{\pi D_p^2}{4 D_o D_s} \tag{1}$$

$$C_D = \frac{1}{A_0 \sqrt{2\rho \Delta P}} \tag{(1)}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{w}{V}\right) \tag{(7)}$$



شکل ۳ زاویه پاشش در انژکتور فشاری چرخشی [۱]

هندسه انژکتور پیچشی به نحوی است که درون محفظه چرخش، ممنتوم سیال ورودی تبدیل به ممنتوم چرخشی می شود. توزیع سرعت چرخشی درون محفظه چرخش به صورت $\frac{c}{r} = w$ است که در آن c یک ثابت است که به شرایط ورودی بستگی دارد. در ادامه در مورد این مسئله توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

این رابطه نشان میدهد که سرعت چرخشی با کاهش شعاع افزایش مییابد. درنتیجه طبق رابطه سرعت و فشار در قانون برنولی^{۱۰} با کاهش شعاع فشار نیز کاهش مییابد تا به فشار محیط برسد. این پدیده سبب میشود که هوای محیط از طریق یک مسیر باریک استوانهای حول محور انژکتور، وارد آن شود. اصطلاحاً به این فضای خالی داخل انژکتور حفره هوا گفته میشود. مرز این حفره هوا دقیقاً در جایی است که فشار محلی برابر فشار محیط (فشار نسبی صفر) است.

چون فشار نسبی در سطح حفره هوا صفر است، هد دینامیکی در سرتاسر سطح حفره هوا ثابت است. با توجه به قانون پایستگی جرم، با کاهش قطر خروجی اریفیس نسبت به محفظه چرخش سرعت محوری افزایش مییابد. این بدان معناست که سرعت چرخشی در اریفیس خروجی نسبت به محفظه چرخش کاهش خواهد یافت. قطر حفره هوا در بخش اریفیس خروجی افزایش مییابد. آنچه بالاتر توضیح داده شد میدان جریان سیال ایدهآل درون یک انژکتور چرخشی است. اما میان جریان واقعی داخل انژکتور و جریان ایدهآل تفاوتهایی وجود دارد که مهم ترین آنها عبارت است از:

- اثراتی همچون لزجت در نزدیکی مرزهای دیواره انژکتور که طراحان را مجبور می کند در ابعاد یک انژکتور واقعی نسبت به انژکتور ایدهآل تغییراتی بدهند. (در اغلب موارد قطر اریفیس خروجی در حالت واقعی نسبت به حالت ایدهآل کمتر می شود.)
- اثرات آشفتگی سبب تغییر رژیم جریان نسبت به جریان ایدهآل میشود.
- جریانهای ثانویه درون انژکتور چرخشی شامل ساختارهای گردابهای تیلور^۲ شبیه به مسئله دو استوانه هم مرکز چرخان، سبب حرکت موج شکل سطح حفره هوا می شود.

در خروجی اریفیس انژکتور چرخشی، مایع چرخان یک فیلم نازک تشکیل میدهد که در اثر برهمکنش با جریان هوای خارج انژکتور فرومی پاشد و تبدیل به قطره می شود. فشار بالای انژکتور انرژی لازم برای شکست فیلم

مایع و تبدیل آن به یک چتر پاشش تأمین میکند. بـرای داشــتن کیفیـت پاشش بهتر لازم است فشار بیشتری تأمین شود [۱۲].

۳ حل عددی جریان

برای حل عددی جریان، معادلات بقای گذرای جریان تراکم ناپذیر در سه بعد، در نظر گرفته شده است (۴و۵). با میانگین گیری از معادلات ناویراستوکس^{^۲ عبارت $ho \overline{u'_{l}u'_{l}}$ که تنش رینولدز نام دارد، در معادله بقای} ممنتوم ظاهر میشود. برای بسته شدن معادلات تنش رینولدز باید به ${
m RSM}^{
m a}$ نحوی مدل شود. بدین منظور از مدل آشفتگی تنش رینولدز استفاده شده است [۱۳]. مدل تنش رينولدز را مي توان جزئي ترين مدل میان مدل های میانگین گیری شده رینولدز معادلات ناویراستوکس دانست که شش معادله انتقالی برای محاسبه تنشهای رینولدز حل میکند. این مدل برخلاف مدلهای دو معادلهای (همانند k-٤ و k-ω) فرض همسانگرد بودن لزجت آشفتگی در تمامی جهات را ندارد و هر یک از شش مؤلفه تنش رینولدز را جداگانه حل می کند. مدل تنش رینولدز توانایی در نظر گرفتن اثرات انحنای خطوط جریان، پیچش و چرخش جریان، تغییرات سريع كرنش و ... را به شيوهاى دقيقتر از مدل هاى تک معادله و دو معادلهای دارد. اما در عوض هزینه محاسباتی آن بیشتر از سایر مدلهاست. علت اصلی شبیهسازی سهبعدی جریان (بجای دوبعدی) اطمینان از عملکرد صحیح مدل RSM در محاسبه مدلسازی تنشهای رینولدز و حل جریان گردابهای سهبعدی درون انژکتور است که تأثیر مستقیم بر روی پارامترهایی همچون افت فشار، زاویه پاشش و ضریب تخلیه (ضخامت فیلم) خواهد گذاشت.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$
(f)
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) =$$

$$- \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$
(Δ)

جریان داخلی و خارجی یک انژکتور از برهمکنش یک سیال با مایع با سیال گاز محیطی تشکیل شده است و بین فاز مایع و گاز یک مرز مشخص وجود دارد. برای شبیه سازی فصل مشترک نیاز به حل یک معادله اضافی است. مدل حجمی سیال ³، VOF از جمله روشهای اویلر – اویلر است. در این روش تابعی از زمان و مکان به فاز هر دو سیال نسبت داده می شود. نسبت حجمی سیال q ام با پارامتر بدون بعد α_q به صورت (۶) تعریف می شود.

$$\alpha_q = \frac{Volume \ of \ q^{tn} fluid \ in \ cell}{Volume \ of \ all \ fluids \ in \ cell} \tag{9}$$

برای یک سلول خالی از سیال q ام $\alpha_q = \alpha_q$ و برای یک سلول پر از سیال q ام $\alpha_q = 0$ مام سلول یک سلول $\alpha_q = 1$. بهطورکلی برای تمام سلول او فازها $1 \ge \alpha_q \ge 0$. از آنجاکه هیچ حفره خالی از سیالی در میدان جریان وجود ندارد نتیجه می شود که:

$$\sum \alpha_q = 1 \tag{Y}$$

برای میدان جریان دوفازی گاز مایع معادله (۷) به صورت (۸) درمی آید. $\alpha_L + \alpha_g = 1$ (۸)

²Taylor Vortices هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمنماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف

¹Bernoulli

³Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

⁴Closure

⁵Reynolds Stress Model (RSM)

⁶Volume of Fluid

FCCI-2018-1093

بهمنظور شبیهسازی و مطالعه جریان داخلی انژکتور، دو انژکتور درونی (هیدرازین) و بیرونی (دینیتروژن تتراکسید) بهصورت مجزا شبیهسازی شدهاند. دامنه محاسباتی انژکتورهای سوخت و اکسنده در شکل ۴ مشاهده می شود. هر دو انژکتور دو راهگاه ورودی دارند.

یک نمونه شبکه محاسباتی انژکتور درونی و یک نمونه شبکه محاسباتی انژکتور بیرونی در شکل ۵ مشاهده میشود. بسته به ابعاد هندسی انژکتور از تعداد پانصد هزار الی یکمیلیون و دویست هزار المان سهبعدی استفاده شده است. این شبکه بیسازمان^۱ است و در نزدیکی راهگاه ورودی و خروجی انژکتور بهاندازه کافی ریز است. شبکهبندی در محیط نرمافزار Ansys ICEM صورت گرفته است.

دامنه خروجی بهاندازهای بزرگ در نظر گرفته شده است که جریان دوردست تأثیر ناچیزی بر ساختار جریان انژکتور داشته باشد. گام زمانی حل متناسب با دامنه محاسباتی بین ^۶ ۲۰۰ تا ۲۰^{۸۰} ثانیه تغییر میکند. سیال بهکاررفته در شبیهسازی انژکتور درونی هیدرازین-هوا و در شبیهسازی انژکتور بیرونی دینیتروژن تتراکسید-هوا است. برای حل جریان از الگوریتم SIMPLE و میانیابی فشار !PRESTO استفاده شده است. معادلات ممنتوم با دقت مرتبه دوم و تنشهای رینولدز با دقت مرتبه اول گسسته سازی شده است. از نرمافزار تجاری Ansys Fluent 18.0 برای حل استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی مناسب به صورت زیر عمل شده است:

- ورودی های انژکتور از نوع mass flow inlet تعریف شده است.
- دیوارههای انژکتور دیواره بدون لغزش No Slip Wall تعریفشدهاند.
- خروجی محیط به صورت Pressure Outlet و فشار اتمسفریک برای آن ها درنظر گرفته شده است.

۴ بررسی نتایج

الف) استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

بهمنظور مطالعه تأثیر اندازه المانهای شبکه بر روی نتایج حل عددی، یکی از انژکتورها با چند شبکه محاسباتی مختلف حل شده است. برای این کار انژکتور درونی با سه شبکه محاسباتی ۲۶۰۰۰۰ و ۱۰۴۰۰۰ و ۱۰۴۰۰۰ المانی با شرایط یکسان شبیهسازی شده است. افزایش تعداد المانها از طرفی باعث بهتر مشخص شدن مرز فاز مایع میشود و پدیدههایی همچون بشکیل فیلم مایع داخل اریفیس و فروپاشی ستون مایع خارج انژکتور بهدرستی شکل خواهند گرفت؛ اما از سوی دیگر هزینههای محاسباتی بهمراتب بالا میرود. در شکل ۶ زاویه پاشش و سرعت متوسط خروجی برحسب تعداد المانهای شبکه رسم شدهاند. مشاهده میشود با افزایش تعداد المانها از مرز ۲۰۰۰۰ المان، نتایج تغییرات چندانی ندارد و میتوان به کمک همین شبکه و با رعایت الزامات ابعاد شبکه در مجاورت دیواره از آن استفاده کرد.



شکل ۴ دامنه محاسباتی انژکتور درونی (بالا) و بیرونی (پایین)



شکل ۵ شبکه محاسباتی انژکتور درونی (بالا) و بیرونی (پایین)

¹Unstructured هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمنماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شكل ۶ زاويه پاشش و سرعت خروجی انژكتور برحسب تعداد المان

ب) مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی

برای اطمینان یافتن از نتایج عددی پیش از پرداختن به مسئله اصلی، هندسهای نزدیک به هندسه انژکتور اصلی از میان کارهای تجربی انتخاب شد؛ بهطوری که از نظر ابعاد هندسی نزدیک به مسئله پژوهش حاضر باشد. کار تجربی گوینداراج[۱۱] مطالعه اثرات هندسی بر روی زاویه پاشش و قطر قطرات بود. هندسه انژکتور آزمون شماره ۱ ایشان به ابعاد انژکتور پژوهش حاضر نزدیک تر است (شکل ۷). برای اینکه اثر شرایط مرزی دوردست روی نتایج قابل صرفنظر کردن باشد، بیش از ۱۲ برابر قطر خروجی انژکتور دامنه خارج انژکتور گسترش دادهشده است.

برای شبکهبندی دامنه از شبکهای بیسازمان با ۹۴۸۲۴۲ المان منشوری مثلثی استفاده شده است. در هنگام تولید شبکه باید همواره ابعاد المانهای مجاور دیواره با مدل آشفتگی سازگار باشد. مدل آشفتگی تنش رینولدز طبق آنچه در مرجع [۱۳] آورده شده است، نیاز به این دارد که مقدار ⁺y در حدود ۱۱ باشد. در هنگام تولید شبکه همواره این شرط رعایت شده است.

نتایج حل عددی در دو نقطه کاری برای هندسه شکل ۷ با نتایج آزمایش تجربی [۱۱] برای زاویه پاشش مقایسه شدهاند. نتایج در جدول ۱ خلاصه شده است. خطای محاسبه زاویه پاشش به روش عددی در مقایسه با روش تجربی کمتر از ۹٪ است. این خطا به علت ضعف در مدل آشفتگی، وجود تفاوت در هندسه کار تجربی (همانند زبری سطح) و هندسه عددی، وجود خطا در نتایج کار تجربی به علت وجود ابزارآلات اندازه گیری مختلف (دبی سنجی، فشار سنجی، تصویربرداری و…)، خطا در اندازه گیری زاویه هندسه پاشش به علت انحنای چتر پاشش و … وجود دارد.



$$d_o = 0.9 \ (mm)$$
 $l_o = 0.5 \ (mm)$ $K = \frac{A_p}{D_o D_s} = 0.252$
 $D_p = 0.75 \ (mm)$ $l_p = 2 \ (mm)$ [11] شكل ۷ هندسه انژكتور مرجع

جدول ۱ مقایسه نتایج حل عددی و نتایج مرجع [۱۱]

نقطه	نقطه	نقطه			
کاری	کاری	کاری	نماد	کمیت (یکا)	رديف
سوم	دوم	اول			
۲.	١٢	١٠	'n	دبی جرمی (گرم در ثانیه)	١
۲۹	11/8	۶/۳	ΔP	افت فشار (بار)	٢
۷۳/۵	9 9	۵۶	α_{exp}	زاویه پاشش تجربی [11] (درجه)	٣
۶۷	۶۷	۶۰	$\alpha_{_{CFD}}$	زاویه پاشش عددی (درجه)	۴
λ/λ	-1/۵	- Y/1	е	خطای حل عددی ٪	۵
٩٧			α_{inv}	زاویه پاشش غیرلزج[۱]	۶
۲۹			-	زاويه پاشش بابو [۱]	۷
١١٩			-	زاویه پاشش لفبور ۱ [۱]	٨
٢٩	۷۱	۶۷	-	زاویه پاشش لفبور ۲ [۱]	٩

ج) انژکتور درونی

شکل ۸ توزیع فاز مایع درون انژکتور درونی را نشان میدهد. درون انژکتور یک حفره هوا وجود دارد که قطر آن در قسمت اریفیس افزایش یافته است. فیلم مایع نازکی داخل اریفیس خروجی تشکیل شده است. این فیلم مایع بیرون از انژکتور به علت برهمکنش نیروهای آئرودینامیکی، لزجت و کشش سطحی فرومی پاشد و قطره تشکیل می شود.

شکل ۹ افت فشار درون انژکتور بیرونی را نشان میدهد. منابع افت فشار درون انژکتور عبارت است از:

- اثرات لزجت نزدیک دیوارههای جامد
 - تغيير سطح درون انژكتور

همچنین اثرات آشفتگی جریان سبب تشدید افت فشار درون انژکتور فشاری چرخشی (نسبت به فرض جریان ایدهآل) میشود.

شکل ۹ توزیع سرعت درون انژکتور فشاری چرخشی را نشان میدهد. مشاهده میشود همان گونه که مرجع [۱۲] نیز ذکر کرده بود، با نزدیک شدن به سطح حفره هوا به علت افزایش مؤلفه زاویه سرعت و ثابت ماندن مؤلفه محوری سرعت، اندازه سرعت افزایش یافته است.

در شکل ۱۰ توزیع سرعت بهدستآمده از روش عددی با تحلیل جریان ایدهآل (گردابه آزاد) مقایسه شده است. تئوری جریان ایدهآل درون انژکتور فرض میکند جریان داخلی انژکتور غیرلزج و غیرچرخشی است. درنتیجه انتظار میرود توزیع سرعت زاویه با شعاع رابطه عکس داشته باشد $\frac{2}{r} = w$ [۱۰]. اما توزیع سرعت زاویه بهدستآمده از روش عددی از چندین نظر با توزیع شعاعی خطی متفاوت است:

> هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمنماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

FCCI-2018-1093

- سرعت روی دیواره در جریان لزج برابر صفر است. اما در جریان غیرلزج مؤلفه سرعت مخالف صفر است.
- به علت حضور لزجت جریان و همچنین اثرات اتلاف آشفتگی بیشینه سرعت زاویهای بهدستآمده از روش عددی کمتر از فرض جریان ایدهآل است. بهعبارتدیگر در جریان ایدهآل به علت عدم حضور اتلاف ناشی از لزجت و آشفتگی جریان سرعت زاویهای را بیش از مقدار واقعی پیش بینی می کند.
- اثرات اختلاط جریان و تنشهای برشی در مجاورت حفره هوا سبب میشود که منحنی توزیع سرعت زاویه در حل عددی هموارتر از توزیع سرعت زاویهای ایدهآل درون انژکتور به دست آید.

د) انژکتور بیرونی

میدان جریان انژکتور بیرونی به دلیل حضور دیوارههای انژکتور درونی، با میدان جریان داخلی یک انژکتور فشاری چرخشی ساده متفاوت است. در این انژکتورها علاوه بر سه پارامتر هندسی اصلی یعنی p_s ،D_p قطر انژکتور مرکزی و ضخامت دیواره آن نیز بر عملکرد انژکتور بیرونی اثر میگذارد.

دیواره داخلی انژکتور بیرونی سبب افزایش افت ناشی از لزجت میشود و به همین جهت افت فشار یک انژکتور بدون دیواره داخلی نسبت به افت فشار یک انژکتور محدود به دیواره داخلی (شکل ۱۱) کمتر است.

همان گونه که پیش تر نیز ذکر شد دو منبع اصلی افت فشار در انژکتورهای پیچشی اصطکاک دیوار (اتلاف ممنتوم ناشی از تنش برشی) و کاهش سطح مقطع در اریفیس خروجی است. در اثر حضور دیواره افزایش انژکتور بیرونی اصلی افتهای ناشی از تنش برشی روی دیواره افزایش میابد. همچنین همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده میشود، نسبت سطح محفظه چرخش و سطح اریفیس خروجی در انژکتور اصلی حدود ۱۴/۲ است. اما در یک انژکتور بدون دیواره داخلی این نسبت ۱/۷ است. درنتیجه افت ناشی از تغییر سطح نیز در انژکتور بیرونی اصلی نسبت به انژکتور بدون دیواره داخلی بیشتر است. در جدول ۲ مشاهده میشود با افزودن دیواره داخلی به انژکتور ساده اکسنده افت فشار ۲۱٪ (۱/۳۰ بار) افزایش پیدا کرده است. در اثر افزایش افت فشار انژکتور، ضریب تخلیه انژکتور نیز



شکل ۸ توزیع فاز مایع درون انژکتور فشاری چرخشی



شکل ۹ توزیع فشار (راست) و سرعت (چپ) درون انژکتور فشاری چرخشی



شکل ۱۰ توزیع سرعت زاویهای در راستای شعاع در محفظه چرخش



هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمنماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۱۲ اثر حذف دیواره داخلی بر توزیع سطح انژکتور بیرونی

جدول ۲ اثر دیواره داخلی بر روی عملکرد انژکتور بیرونی

Injector Type	α (Deg)	ΔP (bar)	C _D	V _{exit} (m/s)
Main	90	2.98	0.053	9.1
Without Inner Wall	103	2.67	0.056	6.6

جدول ۲ نشان می دهد که با افزودن دیواره داخلی به انژکتور بیرونی، زاویه اسپری از ۹۰ به ۱۰۳ درجه افزایش مییابد. علت این پدیده اثرات ناشی از لزجت بر روی مؤلفه چرخشی سرعت است. تنش برشی دیواره داخلی سبب کاهش مؤلفه چرخشی سرعت میشود و زاویه اسپری در حالت اصلی نسبت به حالت بدون دیواره داخلی کمتر است. در اثر برداشته شدن دیواره داخلی، سطح اریفیس خروجی افزایش پیدا میکند و حدوداً ۴/۵ برابر میشود. درنتیجه میانگین سرعت در خروجی از مقدار ۱/۱ به ۶/۶ متر در ثانیه (۲۷ ٪) کاهش پیدا میکند (شکل ۲۷). توزیع فاز مایع درون انژکتور بیرونی در شکل ۲۸ دیده میشود. مشاهده میشود که حفره هوا در اثر قطر مؤثر خروجی انژکتور از یک حد مشخص کمتر شود (قطر داخلی افزایش یابد یا قطر خارجی کاهش یابد) حفره هوا کوچکتر خواهد شد و در حالتی حدی از بین میرود. در چنین حالتی فیلم مایع تمام اریفیس را پر خواهد کرد.

ه) مقایسه نتایج با روابط تجربی موجود

در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ ترتیب منحنی ضریب تخلیه و زاویه پاشش برحسب ضریب هندسی انژکتور درونی رسم شده است. نتایج حل عددی با نتایج کارهایی که محققان بر روی انژکتورهای فشاری چرخشی انجام دادهاند، مقایسه شده است[۱]. مشاهده میشود که در محاسبه ضریب تخلیه حل عددی بیشترین تطابق را با معادله (۱۵) متعلق به کارلسیل دارد. اما خطای نسبی محاسبه ضریب تخلیه به ۲۴٪ نیز می سد. در محاسبه زاویه پاشش نیز رابطه دوم لفبور با معادله (۲۲) بیشترین تطابق را با نتایج عددی دارد. اما در محاسبه زاویه پاشش نیز خطای نسبی بین روش عددی و رابطه لفبور به ۲۲٪ می سد.

شکل ۱۷ و شکل ۱۸ به ترتیب ضریب تخلیه و زاویه پاشش برحسب ضریب هندسی نشان میدهند. مشاهده میشود که رفتار ضریب تخلیه انژکتور بیرونی (همانند انژکتور درونی) با نتایج مدل کارلیسل تطابق دارد. اما یک ضریب تصحیح (حدود ۰/۷) برای انطباق بر نتایج کار ایشان باید بر

نتایج حل عددی اعمال شود. همچنین با بررسی زاویه پاشش مشخص میشود که مدلهای ارائهشده برای زاویه پاشش انژکتور بیرونی مناسب



شکل ۱۳ توزیع سرعت در انژکتور بیرونی اصلی (راستٌ) و بُدون دیوار داخلی (چپ)



شکل ۱۴ توزیع فاز در انژکتور بیرونی اصلی (راست) و بدون دیوار داخلی (چپ)



هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴و ۲۵ بهمنماه ۱۳۹۶ تهران، دانشگاه صنعتی شریف

شکل ۱۵ ضریب تخلیه برحسب ضریب هندسی برای انژکتور درونی



شکل ۱۶ زاویه پاشش برحسب ضریب هندسی برای انژکتور درونی





شکل ۱۸ زاویه پاشش برحسب ضریب هندسی برای انژکتور بیرونی

۵ نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، جریان داخلی یک انژکتور هم محور پیچشی مقیاس کوچک با هدف بررسی میزان تطابق ضریب تخلیه و زاویه پاشش گذرگاههای سوخت و اکسنده با طراحی انجامشده با استفاده از نرمافزار انسیس فلوئنت به صورت سهبعدی شبیه سازی شد. برای این کار از مدل سهبعدی انژکتور و فرضیاتی از قبیل جریان تراکم ناپذیر و ناپایا، معادلات آشفتگی RSM و روش چند فازیVOF استفاده شد. نتایج شبیه سازی با روابط تجربی موجود در منابع مقایسه شد. خلاصه نتایج حاصل از پر ژوهش حاضر به شرح زیر است:

- در محدوده نزدیک به شرایط طراحی، ضریب تخلیه انژکتور با افزایش ثابت هندسی، افزایش مییابد. اما زاویه اسپری به تدریج کاهش مییابد. این نتیجه به لحاظ کیفی، در تطابق کامل با یافته های منابع موجود است. میزان تغییرات این پارامترها بسته به ابعاد انژکتور و شرایط عملکردی متفاوت است که برای انژکتور مدنظر این پژوهش، محدوده کمی این تغییرات استخراج شد.
- مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی جریان و داده تجربی موجود برای انژکتور به کاررفته در این پژوهش، نشان داد خطای شبیه سازی سه بعدی جریان در تخمین زاویه پاشش حداکثر ۹ درصد است. البته این اختلاف در شرایط نزدیک به شرایط طراحی بسیار کمتر و در حدود ۲ درصد است.
- محاسبه ضریب تخلیه و زاویه پاشش با بهکارگیری روابط تجربی موجود نشان داد که نتایج حاصل اختلاف قابل توجهی دارند. این مسئله تأییدی بر این نکته است که برای طراحی انژکتورهایی در مقیاس ایـن پـژوهش، روابط موجود نامعتبر بوده و باید فرآیند شبیهسازی و انجـام آزمـایش در دستور کار قرار گیرد.
- گذرگاه بیرونی انژکتور به دلیل وجود بدنـه گـذرگاه درونـی، افـت فشـار بالاتر، زاویه پاشش و ضریب تخلیه کمتری نسبت به یک انژکتور پیچشی متداول با همان هندسه دارد. اما سرعت خروجی آن بیشتر از حالت یـک انژکتور پیچشی متداول است.

فهرست علائم

Α	سطح مقطع	Р	فشار
C_D	ضريب تخليه	r	مؤلفه شعاعى
D	قطر	и	سرعت محورى
g	شتاب گرانش	ν	سرعت شعاعي
h	ار تفاع	V	اندازه سرعت
K	ثابت ھندسی	w	سرعت زاویهای
L	طول	Z	مؤلفه محورى
'n	دبی جرمی		
			علائم يونانى
α	زاويه پاشش	ρ	چگالی
α_q	نسبت حجمي	θ	مؤلفه زاویهای
	-		زيرنويسها
g	گاز	p	راهگاه ورودی
l	مايع	S	محفظه چرخش

اريفيس خروجي 0

هفتمين كنفرانس سوخت و احتراق ايران، ٢۴و ٢۵ بهمنماه ١٣٩۶

مراجع

[1] Levebvre, Atomization and Sprays, Taylor & Francis, 1989.

[2] Bayvel, L., Orzechowski, Z., Liquid Atomization, Taylor & Francis, 1993

[3] A. T. Sakman, M. A. Jog, and S. M. Jeng, "Parametric Study of Simplex Fuel Nozzle," vol. 38, no. 7, 2000.

[4] E. von Lavante, U. Maatje, F.O. Albina, "Investigation of Unsteady Effectsin Pressure Swirl Atomizers", in ILASS–Europe, 2002.

[5] J. Madsen, B. H. Hjertager, T. Solberg, "Numerical Simulation of Internal Flow in a Large-Scale Pressure-Swirl Atomizer", in ILASS-Europe 2004.

[6] B. Sumer, N. Erkan, O. Uzol, and I. H. Tuncer, "Experimental and Numerical Investigation of a Pressure Swirl Atomizer, Defense Industries Research and Development Institute, Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜB İ TAK-SAGE), Ankara, Turkey," in 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2012, pp. 1–8.

[7] S.K. Amedorme, "Modelling of Multiphase Flow in Pressure Swirl Atomizer", International Journal of

Engineering and Technology, Volume 6 No.5, 2016.

۸- محمدمهدی صالحی، اکبر غفوریان، علیرضا رمضانی،۱۳۸۳، "شبیهسازی
 جریان داخلی انژکتور پیچشی با ورودی مماسی"، نهمین کنفرانس

دینامیکشارهها، دانشگاه شیراز.

[9] M. R. Morad and E. Eslami, "Numerical and Experimental Study on Air Core Formation in a Liquid-Liquid Coaxial Swirl Injector," in ICLASS, 2006.

۱۰- مهساجان محمدی، آزاده کبریایی، محمد فرشچی، ۱۳۹۳، "شبیه سازی جریان داخل و خارج انژکتورهای فشاری-چرخشی"، چهاردهمین کنفرانس بین المللی هوافضای ایران، سازمان پژوهش های علمی وصنعتی ایران، تهران.

[11] M. Govindaraj and M. H. Suryanarayana, "Axial and Radial Variation of Spray Characteristics of a Small- Scale Simplex Atomizer," ASME, pp. 1–8, 2014.

[12] J. J. Chinn, "An Apprisal of Swirl Atomizer Inviscid Flow Analysis.pdf," At. Spray, 2009.

[13] Ansys, ANSYS Fluent User's Guide, no. January. Ansys Incorporation, 2017.