

شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان سیمولنت ژل در یک انژکتور فشاری پیچشی بر اساس مدل توانی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶

علی صابری مقدم^۱، فرهاد منصوریزاده^۲، محمد مهدی بحری رشت آبادی^۳، اسماعیل ولی‌زاده^۴
۱- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی، articlemut@gmail.com
۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی
۳- دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی
۴- دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا

چکیده

پیش‌رانه‌های ژل به علت برخورداری از مزایای هر دو پیش‌رانه جامد و مایع آینده امیدبخشی را در صنایع هوافضا دارند. پیش‌رانه‌های ژل برخلاف پیش‌رانه مایع مادر، رفتاری غیر نیوتونی دارند که باعث پیچیدگی رفتار آنها در سیستم پیش‌ران‌شان به‌خصوص در فرایند اتمیزاسیون می‌شود. در این مقاله جریان داخلی انژکتور فشاری پیچشی برای پیش‌رانه ژل بر اساس مدل توانی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها به‌صورت سه‌بعدی و بر اساس مدل حجم سیال (VOF) در مقادیر مختلف شاخص تطابق و شاخص جریان رفتار سیال در دبی ورودی ثابت انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش مقدار شاخص رفتار جریان سیال (n) فشار تزریق موردنیاز در دبی جرمی یکسان کاهش پیدا می‌کند. فشار تزریق موردنیاز برای دبی 0.063 kg/s برای $n=0.2$ ، $1/8$ مگاپاسکال و برای $n=0.6$ ، 0.45 مگاپاسکال به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش شاخص تطابق، از نظر الگوی جریان بیشترین تأثیر را در بخش محفظه چرخش انژکتور دارد، به‌طوری‌که طول هسته هوای تشکیل‌شده در راستای محور انژکتور، با افزایش شاخص تطابق، کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انژکتور فشاری پیچشی، پیش‌رانه ژل، اتمیزاسیون، مدل توانی، نازک شونده برشی

3D Numerical simulation of gel simulant flow in a pressure swirl injector based on power-law model

Ali Saberi Mogaddam^{1*}, Farhad Mansourizadeh², Mohammad Mahdi Bahri Rasht Abadi³, Esmaeil Valizadeh⁴

1 Professor, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, articlemut@gmail.com

2 Ph.D. Student, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran

3 Ph.D. Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran

4 Ph.D. Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran

Abstract

Gel propellants are promising in the aerospace industry due to the benefits of both solid and liquid propellants. Unlike their base liquid propellants, the gel propellants have a non-Newtonian behavior that complicates their behavior in the propulsion system, especially in the atomization process. In this paper, the internal flow of a pressurized swirl injector for gel propulsion was studied using computational fluid dynamics based on the power law model. The simulations were performed in 3D mode and based on the volume of fluid model (VOF) in different values of the consistency and flow index of the fluid behavior at a constant inlet flow rate. The results showed that by increasing the value of fluid flow behavior index (n), the required pressure decreases for a same mass flow rate. The required pressures of the fluid flow of 0.063 kg/s were obtained as 1.8 and 0.45 MP for $n = 0.2$ and $n = 0.6$ respectively. The results also showed that increasing the consistency index, in terms of flow pattern, has the greatest impact on the injector swirl chamber so that the length of the air core formed along the injector axis decreases with increasing the conformity index

Keywords: Pressure Swirl Injector, Gel Propellant, Atomization, Power-law model, Shear thinning

۶۹

سال ۱۱ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۱

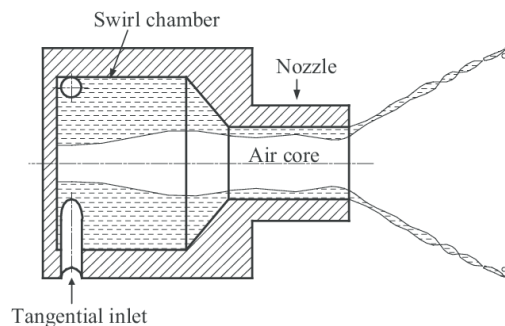
نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



۱. مقدمه

گریز از مرکز^۶ تقسیم‌بندی می‌شوند. انژکتور فشاری پیچشی^۷ که در گروه انژکتورهای گریز از مرکز است، یکی از مناسب‌ترین و رایج‌ترین انژکتورها برای اتمیزاسیون پیش‌رانده است [۸]. با توجه به شکل ۱ انژکتور فشاری پیچشی از سه قسمت اصلی ۱- ورودی مماسی^۸ ۲- محفظه چرخش^۹ و ۳- نازل یا اوریفیس تشکیل شده است. در انژکتورهای فشاری پیچشی سیال از طریق ورودی‌های مماسی، به‌صورت مماس بر دیواره محفظه انژکتور وارد آن شده و به‌واسطه ورود مماسی، سرعت چرخشی به سیال القا می‌شود. القای سرعت چرخشی به سیال باعث می‌شود که سیال خروجی از انژکتور فشاری پیچشی به‌صورت مخروط خارج شود [۹].



شکل ۳. اجزای تشکیل‌دهنده انژکتور فشاری پیچشی [۹].

فرایند اتمیزاسیون انژکتورهای فشاری پیچشی بدین‌صورت است که در ابتدا ورق‌های مایع^{۱۰} خروجی از انژکتور به لیگامنت‌ها^{۱۱} تبدیل می‌شوند و در اثر فروپاشی لیگامنت‌ها، قطرات شکل می‌گیرند. از جمله مهم‌ترین نیروهای مؤثر در فروپاشی ورق مایع خروجی از نازل انژکتور فشاری پیچشی ناپایداری آئرو‌دینامیکی و موج-های سطحی^{۱۲} است، در مقابل نیروهای دیگری مثل کشش سطحی و ویسکوزیته سیال اثر

در چند دهه گذشته پیش‌راندهایی که کارایی و ایمنی بالاتری داشته‌اند، بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گرفته‌اند و تقاضا برای استفاده از این پیش‌راندها در راکت‌ها و سایر کاربردهای مشابه افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد از بین پیش‌راندهای موجود، پیش‌راندهای ژلی^۱ قابلیت و توانایی تأمین نیازهای امروزی صنایع هوافضا را داشته باشند [۱]. پیش‌رانده ژل از افزودن عامل ژل‌کننده به پیش‌رانده مایع تهیه می‌شود. پیش‌رانده ژل در حالت پایدار رفتار جامدگونه و در حالت دینامیکی رفتار سیال غیر نیوتونی از خود نشان می‌دهد [۲، ۳]. این تغییر در رفتار پیش‌رانده ژل باعث شده است که پیش‌راندهای ژل علاوه بر برخورداری از مزایای هر دو پیش‌رانده جامد و مایع، بسیاری از مشکلات پیش‌راندهای مایع و جامد را نداشته باشند. اکثر پیش‌راندهای ژل سیالاتی با رفتار نازک شونده برشی^۲ هستند، طوری که با افزایش نیروی برشی ویسکوزیته آن کاهش می‌یابد [۴، ۵]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی پیش‌رانده ژل فرایند اتمیزاسیون^۳ است، زیرا بالا بودن ویسکوزیته در این پیش‌راندها موجب شده است تا فرایند اتمیزاسیون در این پیش‌راندها به‌سختی انجام شود. در مقادیر ویسکوزیته بالا، اندازه قطرات ایجادشده در فرایند پاشش بزرگ هستند. بزرگ بودن اندازه قطرات موجب کاهش عملکرد و افزایش طول محفظه احتراق (افزایش وزن سیستم پیش‌رانده) می‌شود [۶، ۷].

فرایند اتمیزاسیون در سیستم‌های پیش‌رانده توسط انژکتور^۴ انجام می‌شود. در حالت کلی انژکتورها به دو دسته کلی انژکتورهای جریانی^۵ و



تعدیل‌کننده داشته و مانع از فروپاشی ورق‌های مایع می‌شوند [۱۰، ۱۱].

گرین و همکاران [۱۲] به مطالعه مشخصات اسپری شبیه‌ساز پیش‌رانه ژل^{۱۳} در انژکتورهای هوا-دمشی^{۱۴} و هم‌محور^{۱۵} پرداختند. در هر دو انژکتور، سیمولنت پیش‌رانه ژل از المان مرکزی و گاز نیتروژن از المان‌های کناری تزریق شد. این محققان نشان دادند که اسپری تولیدشده از آب در مقایسه با سیمولنت ژل یکنواختی بیشتری دارد. رحیمی [۱۳] با استفاده از یک انژکتور هوا-دمشی به امتیازسیون سوخت‌های ژلی پرداخت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش نسبت جرمی گاز به سوخت ژل، اندازه قطرات کاهش یافت. توانگر و همکاران [۱۴] با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که بر اساس ویسکوزیته متوسط قطره غیرنیوتنی، الگوی شکست قطرات غیرنیوتنی مطابق با الگوی شکست قطرات نیوتنی قابل تقسیم‌بندی است با این تفاوت که مورفولوژی این نوع قطرات تفاوت‌های زیادی با مورفولوژی قطرات نیوتنی دارد؛ همچنین نشان دادند که با ایجاد تغییر در هندسه انژکتورهای برخوردی^{۱۶}، الگوی جت خروجی سیال ویسکوپلاستیک^{۱۷} با تغییرات فشار، نسبت به آب تغییر می‌کند.

دش و همکاران [۱۵] با استفاده از انژکتورهای فشاری پیچشی ساخته‌شده از شیشه پیرکس^{۱۸} نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تجربی حاصل از اسپری آب را مقایسه کردند. شبیه‌سازی با استفاده از روش حجم سیال^{۱۹} به‌صورت دوبعدی تقارن محوری چرخشی^{۲۰} و با شبکه‌بندی بی‌سازمان^{۲۱} انجام شد. آن‌ها نشان دادند که شکل

حفره هوای تشکیل‌شده با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته و از نظر قطر هسته هوای تشکیل‌شده در اوریفیس انژکتور، خطای در حدود ۹ درصد وجود دارد. حسینعلی‌پور و همکاران [۱۶] بعد از طراحی و ساخت یک نمونه انژکتور فشاری پیچشی و انجام آزمایش‌های اسپری با آب، به شبیه‌سازی سه‌بعدی انژکتور ساخته‌شده پرداختند. در این مطالعه از مدل آشفتگی k-epsilon-RNG برای مدل‌سازی جریان آشفته داخل انژکتور استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که ضخامت لایه فیلمی شکل‌گرفته در اوریفیس انژکتور در ابتدای نازل زیاد و با نزدیک شدن به خروجی انژکتور از ضخامت آن کاسته می‌شود. ماندال و همکاران [۱۷] با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی تقارن محوری چرخشی انژکتور فشاری پیچشی به مطالعه اثر هندسه انژکتور بر خصوصیات عملکردی سیال غیر نیوتنی بر اساس مدل توانی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در سیالات نازک‌شونده برشی با افزایش نسبت قطر محفظه چرخش به قطر اوریفیس انژکتور، ضریب تخلیه افزایش و زاویه پاشش کاهش پیدا می‌کند. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت طول به قطر اوریفیس انژکتور، زاویه پاشش و ضریب تخلیه کاهش پیدا می‌کند. رضایی‌مقدم و همکاران [۱۸] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی رفتار سیالات غیرنیوتنی براساس مدل توانی در انژکتور فشاری پیچشی را بررسی کردند. این شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی تقارن محوری چرخشی با شبکه‌بندی سازمان‌یافته و مدل آشفتگی k-epsilon-RNG صورت گرفت. نتایج





آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار شاخص رفتار جریان سیال^{۲۳} (n) مقدار سرعت شعاعی^{۲۴} سیال در خروجی انژکتور کاهش پیدا می‌کند. یانگ و همکاران [۱] به بررسی تأثیر ثابت شاخص هندسی^{۲۵} انژکتور پیچشی فشاری روی اتمیزاسیون سیمولنت ژل پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات یانگ و همکاران نشان داد که با افزایش ثابت مشخصه هندسی انژکتور، طول شکست و زاویه پاشش افزایش و ضریب تخلیه کاهش پیدا می‌کند. کیم و همکاران [۱۹] با استفاده از سیستم عکس‌برداری، اتمیزاسیون سوخت کروسین، کروسین ژل و کروسین دوغابی (متشکل از سوخت کروسین ژلی و ذرات فلزی آلومینیوم) در یک انژکتور فشاری پیچشی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که طول شکست و ضریب تخلیه انژکتور در اسپری کروسین دوغابی در مقایسه با کروسین ژل و کروسین مایع بیشتر است. فو و همکاران [۲۰] به بررسی تأثیر قطر مجرای ورودی انژکتور فشاری پیچشی از نوع انتها-باز^{۲۶} روی اتمیزاسیون سیمولنت ژل پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش قطر از ۱/۶ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر فرایند اتمیزاسیون سیمولنت ژل بهبود پیدا می‌کند.

یانگ و همکارانش [۲۱] تأثیر غلظت ژل‌کننده سیمولنت ژل روی ضخامت لایه فیلمی تشکیل‌شده در اوریفیس انژکتور فشاری پیچشی را بررسی کردند. نتایج تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های یانگ و همکاران نشان داد که با افزایش ترکیب درصد ژل‌کننده ضخامت لایه فیلمی نیز افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها در توجیه این پدیده بیان کردند که با افزایش ترکیب درصد

ژل‌کننده ویسکوزیته سیمولنت ژل و ویسکوزیته ضخامت لایه فیلمی نیز افزایش پیدا می‌کند. کانت و بنرجی [۲۲] با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی تأثیر پارامترهای بی‌بعد طراحی انژکتور فشاری پیچشی روی خصوصیات عملکردی بر اساس مدل توانی را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد، با افزایش مقدار شاخص جریان (n) نسبت ضخامت لایه فیلمی به قطر اوریفیس انژکتور (h/R_0) افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالب بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت که اکثر مطالعات عددی و تجربی انجام‌شده، درباره تأثیر هندسه انژکتور فشاری پیچشی بر عملکرد فرایند اتمیزاسیون است. به‌عبارت‌دیگر تحقیقات کمی در خصوص تأثیر نوع پیشراننده ژل و رفتار رئولوژیکی آن روی پارامترهای عملکردی از قبیل زاویه پاشش، سرعت‌های خروجی و ضخامت لایه فیلمی در داخل انژکتور فشاری پیچشی انجام شده است. بنابراین با توجه به توسعه روزافزون استفاده از پیشراننده‌های ژل در سیستم‌های پیشراننده و از طرف دیگر لزوم شناخت رفتار پیشراننده ژل در مهم‌ترین بخش سیستم پیشراننده یعنی انژکتور، در این مقاله با توجه به مشخصات رفتاری ژل UDMH که طبق مدل توانی، مقادیر شاخص تطابق^{۲۷} در محدوده $K=8 \text{ Pa.s}^n$ و شاخص رفتار جریان سیال $n=0.4$ دارد، به بررسی تأثیر مقادیر K و n پیشراننده ژل بر جریان داخلی انژکتور فشاری پیچشی در یک دبی جرمی ثابت به کمک دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است.

۲. شبیه‌سازی عددی

۱.۲. معادلات حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان داخل انژکتور فشاری پیچشی معادلات بقای جرم یا پیوستگی (رابطه ۱) و مومنتوم یا ناویر استوکس (رابطه ۲) هستند. همچنین به منظور تعقیب و تصویرسازی سطح آزاد بین هوا و مایع در داخل انژکتور فشاری پیچشی از مدل حجم سیال (VOF) استفاده شده است [۱۸]. در مدل VOF مقدار کسر حجمی هر فاز در هر سلول محاسباتی با معادله دیگری با عنوان معادله کسر حجمی (رابطه ۳) محاسبه می‌شود.

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (2\mu D) + g + \frac{1}{\rho} F_b \quad (2)$$

$$f(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{In gas} \\ 0 < f < 1 & \text{at the gas-liquid interface} \\ 1 & \text{In liquid} \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه‌های (۱) و (۲)، ρ و μ ، P و U به ترتیب، بردار سرعت، ویسکوزیته سیال، مقدار فشار و چگالی هستند. از طرفی نمایانگر g میزان شتاب گرانش بوده و F_b بیانگر نیروی تنش سطحی که تنها در سطح مشترک دو سیال رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. D نیز تانسور تنش (تغییر شکل) است. در رابطه (۳)، t نشان‌دهنده زمان و x نماینده شماره گره در مدل عددی است. ویسکوزیته به نرخ برش در پیشران‌های ژل در حالت دینامیکی به صورت رقیق‌شونده وابسته است. به همین دلیل در پیشران‌های ژل بیشتر از توابع ویسکومتریک به صورت رقیق‌شونده استفاده می‌شود. در این پژوهش، برای مدل کردن

ویسکوزیته از مدل توانی استفاده شده است. رابطه (۴) مدل توانی را نشان می‌دهد. در این معادله n شاخص رفتار جریان سیال، K شاخص تطابق یا شاخص قوام سیال و $\dot{\gamma}$ نرخ برش اعمال شده به سیال است. اگر مقدار $n < 1$ باشد، سیال موردنظر رفتار نازک شونده برشی دارد.

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

۲.۲. هندسه حل، شرایط مرزی و خواص

سیال

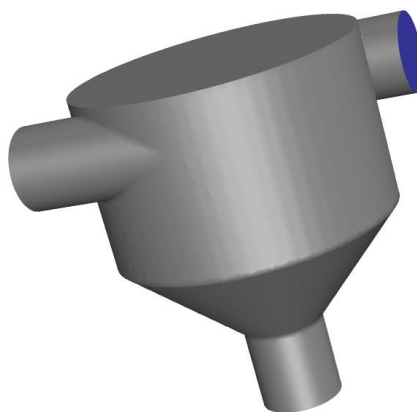
به منظور مطالعه اثر شاخص رفتار جریان سیال و شاخص تطابق بر روی مشخصه‌های جریان در انژکتور فشاری پیچشی مدل‌سازی سه‌بعدی انجام شد. جدول ۱ مشخصات هندسی مدل و شکل (۲) شماتیک هندسی مدل موردبررسی را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی پیشرانه ژل به عنوان سیال عامل با مقادیر مختلف شاخص تطابق ($K=8, K=4, K=2 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$) و شاخص رفتار جریان سیال ($n=0.2, n=0.4, n=0.6$) در دمای محیط در نظر گرفته شد. شرایط مرزی به کاررفته در تمامی شبیه‌سازی‌ها به صورت زیر است:

- دبی جرمی در ورودی انژکتور (دبی جرمی ثابت 0.063 کیلوگرم بر ثانیه)؛
- فشار محیط برای خروجی انژکتور (101325 پاسکال)؛
- شرط عدم لغزش برای دیواره‌های انژکتور.



جدول ۲. خواص پیشرانه ژل [۲۳]

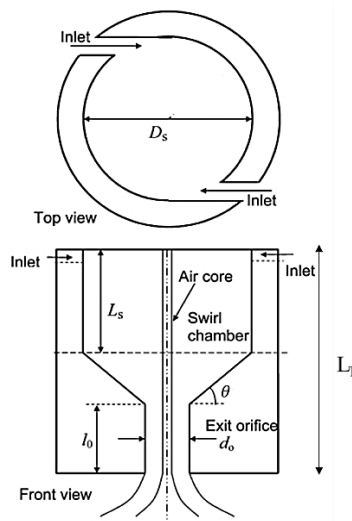
مقدار	واحد	خواص
۱۰۱۳	Kg/m^3	دانسیته
۰/۰۶۵	N/m	کشش سطحی
۰/۰۰۱	Pa.s	ویسکوزیته حداقل



۳.۲. روش عددی

به منظور حل عددی جریان داخل انژکتور فشاری پیچشی از بسته نرم‌افزاری ANSYS Workbench و نرم‌افزار فلونت استفاده شد. برای حل میدان دوفازی انژکتور پیچشی، از حلگر فشار مینا^{۲۸} و با الگوریتم مجزا^{۲۹}، استفاده شد. برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل^{۳۰} انتخاب شد. برای میان‌یابی فشار روی هر سطح سلول، از طرح PRESTO! استفاده شد، زیرا در جریان‌های چرخشی این روش سبب پایداری فرایند حل می‌شود. برای معادلات

مومنتوم و معادلات اغتشاش (انرژی جنبشی توربولانس^{۳۱} و نرخ اتلاف^{۳۲}) برای دقت بالاتر از طرح بالادست مرتبه دوم^{۳۳} استفاده شد؛ زیرا هنگامی که جریان از خطوط مش به صورت مورب، عبور کند، طرح بالادست مرتبه اول^{۳۴}، خطای گسسته‌سازی عددی را افزایش می‌دهد. در انژکتورهای فشاری پیچشی، به دلیل چرخش قوی سیال حول محور انژکتور و تشکیل گرادیان‌های شدید فشاری در داخل انژکتور، از مدل آشفتگی k-e-RNG استفاده شد. همچنین براساس مدل توانی مقادیر مختلف از n و K به نرم‌افزار فلونت اعمال شد که در تمامی شرایط شبیه‌سازی، مقدار ویسکوزیته حداقل که باید به نرم‌افزار تعریف شود ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۲. شکل هندسی و شماتیک انژکتور فشاری پیچشی مورد مطالعه [۱۷].

جدول ۱. مشخصات هندسی انژکتور فشاری پیچشی

مقدار	نماد	قسمت‌های انژکتور
۸/۷۵	L_T	طول کلی انژکتور (mm)
۲	L_0	طول اوریفیس (mm)
۲	d_0	قطر اوریفیس (mm)
۷	D_s	قطر بخش چرخش‌ساز (mm)
۴/۲۵	L_s	طول محفظه چرخش (mm)
۲	d_p	قطر مجرای ورودی (mm)
۲	-	تعداد مجرای ورودی
۴۵	θ	زاویه بخش همگرا

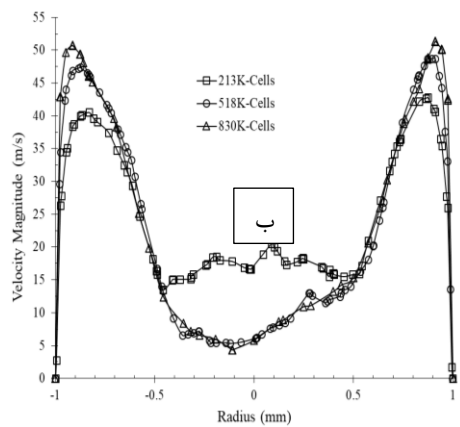
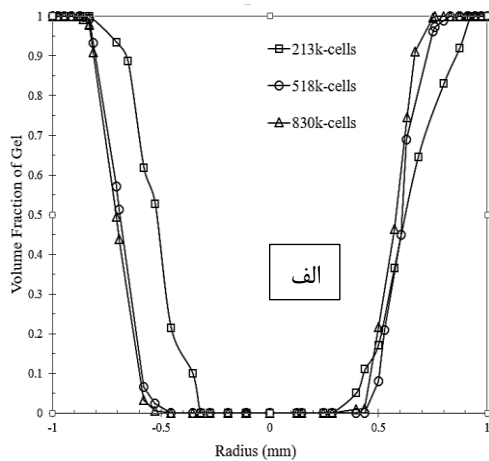
همچنین خواص مورد نیاز پیشرانه ژل که به‌عنوان سیال عامل در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده، در جدول ۲ آورده شده است.



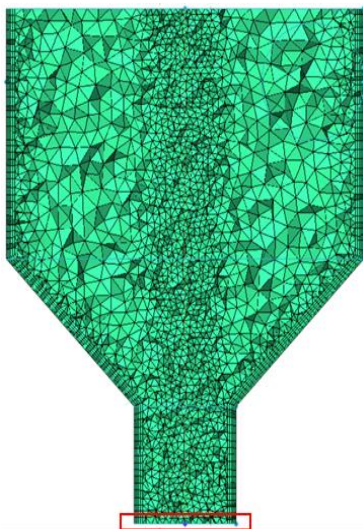
۴.۲. آزمایش استقلال از شبکه

با توجه به اینکه در انژکتور فشاری پیچشی کسر حجمی سیال اسپری شونده و سرعت کل در اوریفیس خروجی انژکتور از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد انژکتور فشاری هستند، پس در این بخش آزمایش استقلال از شبکه پارامترهای گفته شده بررسی شد. شکل ۳-الف نمودار کسر حجمی پیشرانه ژل در طول قطر اوریفیس انژکتور، در سه سلول محاسباتی ۲۱۳، ۵۱۸ و ۸۳۰ هزار سلول را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-الف می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات کسر حجمی پیشرانه ژل با تغییر تعداد سلول‌های محاسباتی از ۵۱۸ هزار به ۸۳۰ هزار سلول تغییر چشمگیری نداشته است. همچنین با توجه به شکل ۳-ب نیز می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی از ۵۱۸ هزار به ۸۳۰ هزار سلول، تغییر چشمگیری در سرعت کل صورت نگرفته است. پس تعداد ۵۱۸ هزار سلول محاسباتی به‌عنوان تعداد سلول محاسباتی مناسب انتخاب شد. محل داده برداری در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴ شبکه‌بندی انجام شده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ناحیه محور مرکزی انژکتور به علت تشکیل حفره هوا تراکم بیشتری دارد. همچنین نواحی نزدیک به دیواره نیز به علت داشتن گرادیان‌های شدید فشاری و سرعتی با صورت شبکه‌بندی لایه‌مرزی با مقدار $y^+ = 30$ انجام شده است.



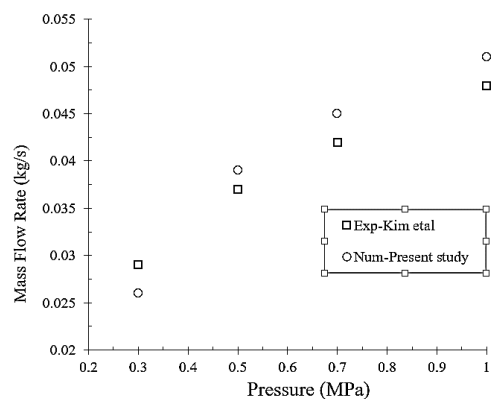
شکل ۳. استقلال از شبکه‌بندی بر اساس الف) کسر حجمی پیشرانه ژل و ب) سرعت کل در خروجی انژکتور



شکل ۴. شبکه‌بندی انجام شده روی هندسه انژکتور فشاری پیچشی و محل داده برداری آزمایش استقلال از شبکه

۵.۲. اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی روش حل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، کار تجربی انجام شده توسط کیم و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. کیم و همکاران [۱۹] سوخت با مشخصات ترموفیزیکی دانسیته 790 kg/m^3 ، ویسکوزیته $0.024 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ، کشش سطحی 0.027 N/m را در دمای محیط با استفاده از انژکتور فشاری پیچشی مورد آزمایش قرار دادند. در شکل ۵ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نمودار رسم شده بیشینه خطای به دست آمده ۱۰ درصد است، پس با توجه به بیشینه خطای محاسبه شده می‌توان نتیجه گرفت که روش حل انتخاب شده ضریب اطمینان بالایی دارد.



شکل ۵. مقایسه دبی تجربی خروجی از انژکتور فشاری پیچشی با نتایج شبیه‌سازی حاضر به منظور اعتبارسنجی روش حل

۳. نتایج و بحث

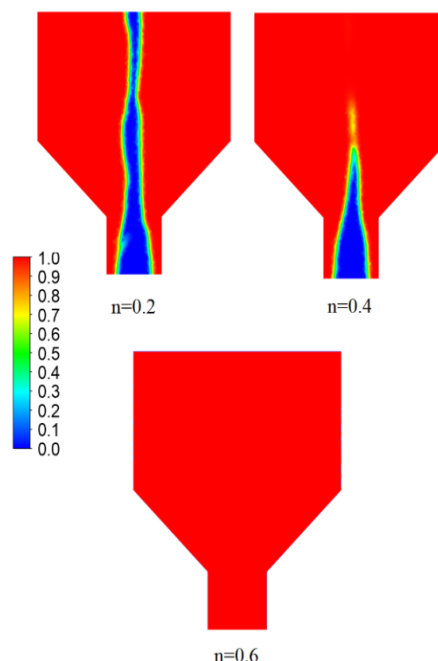
۱.۳. تأثیر شاخص جریان رفتار سیال پیشرانه ژل بر جریان داخل انژکتور فشاری پیچشی

در این بخش تأثیر شاخص رفتار جریان سیال روی رفتار جریان پیشرانه ژل در مقدار ثابت شاخص تطابق ($K=8 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$) داخل انژکتور فشاری پیچشی بررسی شده است.

الف- قطر هسته هوا و ضخامت لایه فیلمی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در انژکتورهای فشاری پیچشی قطر هسته هوای تشکیل شده در راستای محور انژکتور است. شکل ۶ کانتر کسر حجمی پیشرانه ژل را در مقادیر مختلف از شاخص رفتار جریان سیال (n) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است در یک دبی ورودی یکسان، هسته هوای تشکیل شده در مقدار $n=0.2$ از نظر کشیدگی به داخل انژکتور در مقایسه با مقادیر شاخص رفتار جریان سیال 0.4 و 0.6 بیشتر بوده است. همچنین نکته بسیار مهمی که لازم است بدان اشاره شود عدم شکل‌گیری هسته هوا در مقدار $n=0.6$ است. در توجیه این پدیده می‌توان گفت هسته هوا در انژکتور فشاری پیچشی زمانی شکل می‌گیرد که نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در اثر سرعت چرخشی، به نیروی ویسکوز سیال غلبه کند. از طرف دیگر با توجه به اینکه در مدل توانی مقدار شاخص رفتار جریان سیال نشان‌دهنده وابستگی ویسکوزیته ظاهری سیال به نرخ برش است، با افزایش مقدار n وابستگی رفتار سیال به نرخ برش کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش مقدار n رفتار نازک‌شوندگی پیشرانه ژل کاهش پیدا می‌کند. بنابراین در مقدار $n=0.6$ روند کاهشی ویسکوزیته ظاهری در داخل انژکتور در مقایسه با مقادیر شاخص رفتار جریان سیال 0.4 و 0.2

بسیار کمتر بوده و در مقدار $n=0.6$ نیروی گریز از مرکز توان غلبه بر نیروی ویسکوز سیال را ندارد.

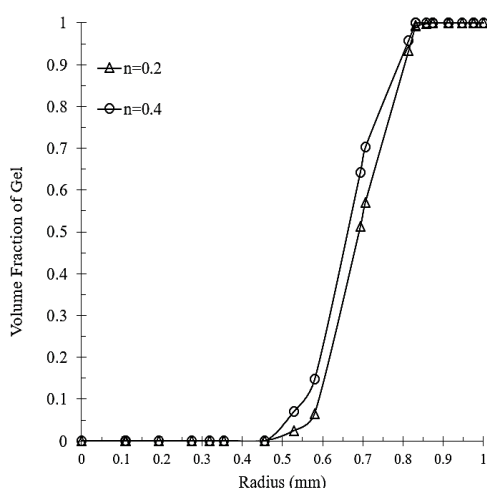


شکل ۶. کانکتور کسر حجمی پیشرانه ژل در مقادیر مختلف n در مقدار شاخص تطابق $K=8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

به منظور نتیجه‌گیری بهتر در مورد تأثیر شاخص رفتار جریان سیال روی ضخامت لایه فیلمی شکل گرفته در اوریفیس انژکتور در شکل ۷ روند تغییرات کسر حجمی برای دو مقدار شاخص رفتار جریان سیال 0.2 و 0.4 در طول شعاع اوریفیس انژکتور رسم شده است (با توجه به شکل ۶ چون اوریفیس انژکتور کامل از پیشرانه پر شده و مقدار کسر حجمی پیشرانه ژل در طول اوریفیس برابر ۱، در شکل ۷ رسم نشده است). همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، ضخامت لایه فیلمی تشکیل شده با اسپری پیشرانه ژل در $n=0.2$ کمتر از $n=0.4$ است.

ب- زاویه بردار سرعت

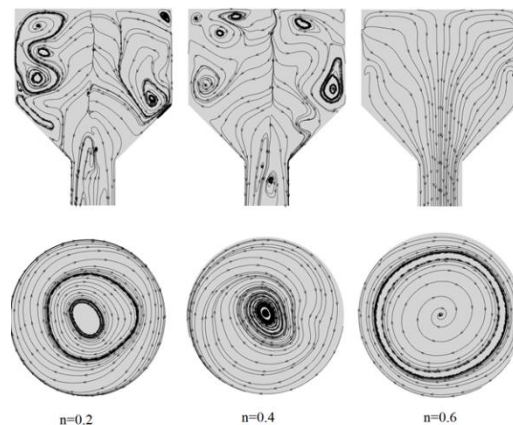
یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین عملکرد انژکتورهای فشاری پیچشی زاویه بردار سرعت در خروجی انژکتور است. زاویه سرعت خروجی از اوریفیس انژکتور، تعیین کننده زاویه پاشش خروجی از انژکتور است. جدول ۳ مقادیر زاویه بردار سرعت، سرعت محوری، سرعت چرخشی و نسبت سرعت چرخشی به سرعت محوری را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۳ کاملاً روشن است که با کاهش مقدار n زاویه بردار سرعت و سرعت چرخشی در اوریفیس انژکتور افزایش یافته است. در انژکتورهای فشاری پیچشی هر چقدر نسبت سرعت چرخشی به محوری در اوریفیس انژکتور افزایش پیدا کند، زاویه پاشش افزایش پیدا می‌کند. افزایش زاویه پاشش سبب شکست سریع ورق مایع خروجی از انژکتور فشاری پیچشی می‌شود. داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار n این نسبت سرعت چرخشی به محوری کاهش یافته، در نتیجه زاویه بردار سرعت یا همان زاویه پاشش کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۷. کسر حجمی پیشرانه ژل در طول شعاع اوریفیس انژکتور برای مقادیر $n=0.4$ و $n=0.2$ در شاخص تطابق $K=8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

جدول ۳. مقایسه زاویه بردار سرعت خروجی از انژکتور فشاری پیچشی در مقادیر مختلف از n در مقدار ثابت $K=8 \text{ Pa.sn}$

مشخصه	$n=0.2$	$n=0.4$	$n=0.6$
زاویه بردار سرعت (deg)	۷۵	۶۹	۴۷
سرعت محوری (m/s)	۴۰	۳۷	۲۶
سرعت چرخشی (m/s)	۳۸/۵	۳۰/۵	۱۲
نسبت سرعت چرخشی به محوری	۰/۹۶	۰/۸۲	۰/۴۶



شکل ۸. خطوط جریان پیشرانه ژل در داخل انژکتور فشاری پیچشی در مقادیر مختلف n

ج- الگوی جریان داخل انژکتور

در این بخش الگوی جریان شکل گرفته در داخل راکتور با استفاده از خطوط جریان بررسی می‌شود. خطوط جریان در شکل ۸ نشان می‌دهد که در مقدار $n=0.6$ جریان پیشرانه ژل به علت ویسکوزیته بالا قدرت چرخش و آشفتگی کمتری دارد. همچنین در $n=0.6$ جریان پیشرانه ژل بدون تشکیل ناحیه گردابی به صورت خطوط جریان موازی از انژکتور خارج می‌شود. این اتفاق نشان می‌دهد که در این نواحی نرخ‌های برش پایین به سیال اعمال می‌شود و در نتیجه ویسکوزیته پیشرانه ژل زیاد کاهش نمی‌یابد. در مقابل با کاهش مقدار شاخص رفتار جریان سیال

میزان آشفتگی افزایش پیدا کرده است و در پی آن نرخ برش‌های شدیدتری به پیشرانه ژل اعمال می‌شود که موجب کاهش ویسکوزیته و تشکیل گردابه‌های قدرتمند در داخل انژکتور می‌شود. با نگاهی دقیق‌تر به تفاوت خطوط جریان $n=0.4$ و $n=0.6$ می‌توان گفت در $n=0.2$ خطوط جریان پیشرانه ژل در نزدیکی دیواره تراکم بیشتری دارد و نشان از نیروی گریز از مرکز بیشتر سیال است. از شکل‌های ۶ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت نرخ کاهش ویسکوزیته ظاهری پیشرانه ژل در داخل انژکتور به حدی رسیده است که نیروی گریز از مرکز توانسته بر نیروی ویسکوز پیشرانه غلبه کرده و جریان گردابی با شدت بیشتری ایجاد کند.

د- فشار تزریق و ضریب تخلیه

جدول ۴ مقادیر فشار ورودی، ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی به دست آمده از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به تعریف ضریب تخلیه که نسبت دبی واقعی به دبی حالت ایده‌آل است، از طریق رابطه ۵ این ضریب قابل محاسبه است.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} = \frac{\dot{m}_{real}}{A_n \sqrt{2\rho\Delta p}} \quad (5)$$

در رابطه ۵، (A_n) سطح مقطع اوریفیس انژکتور، (ρ) دانسیته سیال و (Δp) فشار تزریق به دست آمده است. همچنین ضریب پرشوندگی سطح که نشان‌دهنده میزان سطح اشغال شده اوریفیس انژکتور توسط پیشرانه ژل است با رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$1 - \frac{r_a^2}{r_n^2} = \text{ضریب پر شوندگی} \quad (6)$$

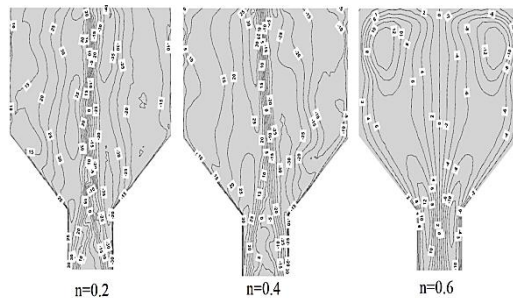
در رابطه ۶، (r_a) شعاع هسته هوای شکل گرفته در اوریفیس انژکتور و (r_n) شعاع اوریفیس



انژکتور است. مقدار شعاع هسته هوا با استفاده از مقادیر نمودار شکل ۷ به دست آمد. با توجه به داده‌های جدول ۴ مقادیر ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی اوریفیس انژکتور با کاهش شاخص رفتار جریان سیال، کاهش می‌یابد همچنین با توجه به مقادیر فشار به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که به منظور تزریق دبی جرمی یکسان با مقادیر مختلف n ، پیشرانه ژلی که مقدار n کمتری دارد، نیازمند فشار تزریق بالاتری برای تأمین دبی مورد نیاز است.

جدول ۴. تأثیر مقدار n بر فشار تزریق، ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی پیشرانه ژل در دبی تزریق یکسان 0.063 kg/s در انژکتور فشاری پیچشی

مشخصه	$n=0.2$	$n=0.4$	$n=0.6$
فشار تزریق (MPa)	۱/۸	۱/۳	۰/۴۵
ضریب تخلیه	۰/۳۳	۰/۴	۰/۶۶
ضریب پرشوندگی	۰/۴۶۷	۰/۵۱۰	۱
دبی ایده آل (kg/s)	۰/۱۸۸	۰/۱۵۷	۰/۰۹۴



شکل ۹. خطوط هم‌تراز سرعت چرخشی برای مقادیر مختلف شاخص رفتار جریان سیال در انژکتور پیچشی

برای توضیح بهتر علت افزایش فشار تزریق برای دبی یکسان در انژکتور فشاری پیچشی با کاهش مقدار n ، لازم است اندازه سرعت چرخشی ایجاد شده در محفظه چرخش انژکتور بررسی شود. شکل ۹ خطوط هم‌تراز سرعت چرخشی را برای هر سه مقدار شاخص رفتار جریان سیال

نشان می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های شکل ۹ مشخص است سرعت چرخشی شکل گرفته در انژکتور برای $n=0.2$ بیشتر است. طبق رابطه ۷ و ارتباط نیروی گریز از مرکز با مجذور سرعت چرخشی، کاملاً روشن است که با افزایش سرعت چرخشی، پیشرانه تمایل حرکت به سمت دیواره‌ها را خواهد داشت. بنابراین با افزایش مقدار n ، سرعت چرخشی در داخل انژکتور کاهش پیدا می‌کند، بنابراین سیال به جای حرکت به سمت دیواره‌های انژکتور، تمایل دارد به سمت خروجی و به صورت محوری حرکت کند. محدوده سرعت چرخشی ایجاد شده برای $n=0.2$ ، $0.45-0$ متر بر ثانیه، برای $n=0.4$ ، $0.40-0$ متر بر ثانیه و $n=0.6$ محدوده $0.14-0$ متر بر ثانیه است.

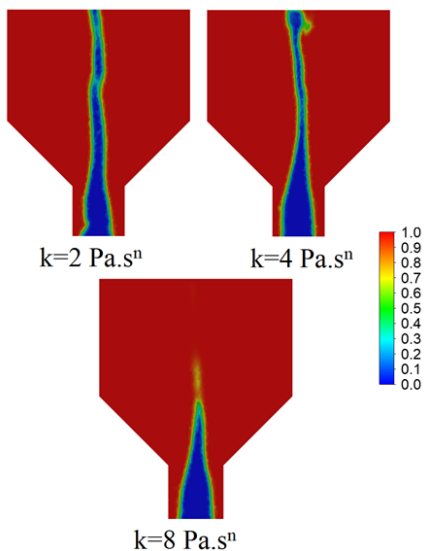
$$F_{centrifugal} = m \frac{w^2}{r} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، (m) جرم سیال، (w) سرعت چرخشی و (r) شعاع چرخش است.

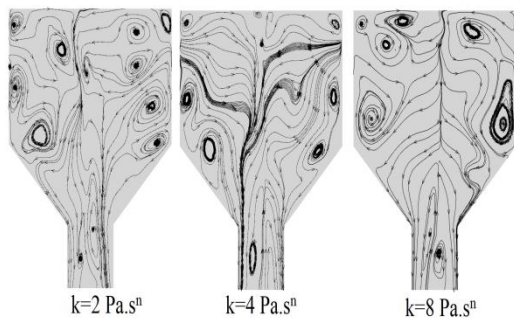
همچنین با بررسی بازه تغییرات ویسکوزیته ظاهری پیشرانه ژل و نرخ برش اعمال شده به پیشرانه ژل در مرکز محفظه چرخش انژکتور (به طول $2/2$ میلی‌متر) می‌توان نتیجه گرفت که نرخ برش وارد شده به پیشرانه ژل در مقدار $n=0.2$ در طول خط مورد نظر بیشتر از $n=0.4$ و $n=0.6$ است. از طرف دیگر با توجه به کاهش بیشتر ویسکوزیته ظاهری پیشرانه ژل در مقابل نرخ برش در مقدار $n=0.2$ ، ویسکوزیته آن در مقایسه با سایر مقادیر n ، با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. اما نکته بسیار مهمی که از شکل ۱۰-الف می‌توان برداشت کرد که در مقدار $n=0.6$ مقادیر نرخ برش اعمال شده به پیشرانه ژل با نزدیک‌تر شدن به محور انژکتور کاهش پیدا می‌کند. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که با توجه به خطوط جریان نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ در



مدل توانی در مقادیر کم نرخ برش، اختلاف ویسکوزیته ظاهری پیشرانه ژل با افزایش مقدار شاخص تطابق در n ثابت بیشتر می‌شود. بنابراین در $K=8 \text{ Pa.s}^n$ نیروی‌های برشی اعمال شده توان غلبه بر ویسکوزیته سیال را نداشته و هسته هوا تشکیل نمی‌شود.



شکل ۱۱. کانتور کسر حجمی پیشرانه ژل در مقادیر مختلف شاخص تطابق در مقدار $n=0.4$.



شکل ۱۲. الگوی جریان پیشرانه ژل در مقادیر مختلف از شاخص تطابق در مقدار ثابت $n=0.4$

ب- الگوی جریان

با توجه به شکل ۱۲ الگوی جریان داخل انژکتور با خطوط جریان در مقادیر مختلف شاخص تطابق مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود با افزایش مقدار شاخص تطابق از تعداد گردابه‌های

این ناحیه پیشرانه ژل سرعت چرخشی کمی دارد و سیال تمایل زیاد برای حرکت به سمت خروجی دارد به همین دلیل و با توجه به داده‌های شکل ۱۰، به علت کم شدن تنش‌های وارده به سیال، نرخ برش کاهش و به تبع آن ویسکوزیته افزایش پیدا می‌کند.

۴. تأثیر شاخص تطابق پیشرانه ژل بر جریان

داخل انژکتور فشاری پیچشی

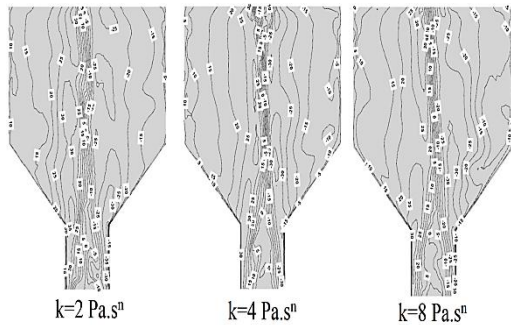
در این بخش تأثیر شاخص تطابق بر رفتار جریان پیشرانه ژل در مقدار ثابت شاخص رفتار جریان سیال ($n=0.4$) داخل انژکتور فشاری پیچشی بررسی شده است. لازم به یادآوری است علت انتخاب مقدار $n=0.4$ ساخت نمونه سیمولنت ژل با مقدار n گفته شده است.

الف- کسر حجمی پیشرانه ژل

شکل ۱۱ کانتور کسر حجمی پیشرانه ژل را در مقادیر مختلف شاخص تطابق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با کاهش مقدار شاخص تطابق طول هسته هوای کشیده شده به داخل انژکتور نیز بیشتر می‌شود. همچنین با مقایسه قطر هسته هوای تشکیل شده در بخش محفظه چرخش انژکتور می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مقدار شاخص تطابق، قطر هسته هوای تشکیل شده در بخش محفظه چرخش انژکتور افزایش پیدا کرده است. در توجیه این پدیده لازم است به مقادیر نرخ برش اعمال شده به پیشرانه ژل در اوریفیس و محفظه چرخش انژکتور اشاره کرد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، مقدار نرخ برش اعمال شده به پیشرانه ژل در ناحیه محفظه چرخش انژکتور کمتر از مقدار نرخ برش اعمال شده در اوریفیس انژکتور است، پس طبق

جدول ۵. تأثیر K بر روی فشار تزریق، ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی پیشرا نه ژل در مقدار $n=0.4$ در انژکتور فشاری پیچشی

مشخصه	K=2	K=4	K=8
فشار تزریق (MPa)	۱/۵	۱/۴	۱/۳
ضریب تخلیه	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۴
ضریب پرشوندگی	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۵۱۰
دبی ایده آل (kg/s)	۰/۱۷۲	۰/۱۶۶	۰/۱۵۷



شکل ۱۳. خطوط هم‌تراز سرعت چرخشی برای مقادیر مختلف شاخص تطابق در مقدار $n=0.4$ در انژکتور پیچشی

همچنین با مقایسه مقادیر فشار لازم برای اسپری مقدار ثابت دبی، واضح است با کاهش مقدار شاخص تطابق، فشار مورد نیاز برای تزریق افزایش یافته است. در توجیه این پدیده نیز به مشابه بخش قبل لازم است، مقادیر سرعت چرخشی در محفظه چرخش انژکتور بررسی شود. شکل ۱۳ مقادیر خطوط هم‌تراز سرعت چرخشی را در داخل انژکتور فشاری پیچشی نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر نشان داده شده، مقدار سرعت چرخشی در مقادیر کم شاخص تطابق بیشتر است. از طرف دیگر با افزایش سرعت چرخشی از میزان تمایل حرکت سیال به سمت خروجی کاسته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت جریان شکل گرفته در بخش محفظه چرخش انژکتور، بیشترین تأثیر را بر عملکرد انژکتور فشاری پیچشی در اتمیزاسیون پیشرا نه دارد.

تشکیل شده در محفظه چرخش انژکتور و آشفته‌گی جریان کاسته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در یک مقدار ثابت از شاخص رفتار جریان سیال، هرچه مقدار پیشرا نه ژل شاخص تطابق کمتری داشته باشد، عملکرد انژکتور فشاری پیچشی از نظر پارامترهای عملکردی بهتر خواهد بود. بنابراین بهترین حالت برای بهبود عملکرد فرایند اتمیزاسیون پیشرا نه ژل در انژکتور فشاری پیچشی کاهش مقدار شاخص رفتار جریان سیال و شاخص تطابق است. به عبارت دیگر در فرایند تولید پیشرا نه ژل بهتر است روشی در پیش گرفته شود که نه تنها رفتار نازک‌شوندگی برشی پیشرا نه ژل افزایش یابد، بلکه شاخص تطابق کمی داشته باشد.

ج- فشار تزریق و ضریب تخلیه

با توجه به داده‌های جدول ۵، از مقادیر ضریب تخلیه و ضریب پرشوندگی می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در مقدار بازه مورد نظر شاخص تطابق $2 < K < 8$ تغییر چندانی در قسمت اوریفیس انژکتور صورت نمی‌گیرد، زیرا در این ناحیه به علت پایین بودن ضخامت پیشرا نه ژل و بالا بودن مقادیر سرعت محوری و چرخشی، گرادیان سرعت بالایی، به پیشرا نه اعمال می‌شود و به واسطه بالا بودن گرادیان سرعت، نرخ برش بیشتری به پیشرا نه اعمال می‌شود. در نتیجه اعمال بالای نرخ برش به پیشرا نه طبق مدل توانی، مقادیر ویسکوزیته ظاهری با وجود اختلاف در مقادیر شاخص تطابق نزدیک به هم خواهد بود به همین دلیل در قسمت اوریفیس انژکتور در بازه مورد نظر تغییر چندانی در مقادیر ضریب پرشوندگی و ضریب تخلیه دیده نمی‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه روش حجم سیال (VOF) تأثیر شاخص رفتار جریان سیال (n) و شاخص تطابق (K) پیشرانه ژل بر اساس مدل غیر نیوتونی سیال توانی بر جریان داخل و پارامترهای عملکردی انژکتور فشاری پیچشی بررسی شد. جریان داخل انژکتور به صورت آشفته و مستقل از زمان در مقادیر مختلف شاخص رفتار جریان سیال ($n=0.2, 0.4, 0.6$) و شاخص تطابق ($K=2$) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- با کاهش شاخص رفتار جریان سیال پیشرانه ژل در یک مقدار ثابت شاخص تطابق، ضخامت لایه فیلمی کاهش و قطر هسته هوا و میزان کشیدگی جریان هوا به داخل انژکتور، افزایش می‌یابد؛

۲- با کاهش مقدار n نسبت سرعت چرخشی به سرعت محوری و زاویه پاشش خروجی از اوربیس انژکتور افزایش می‌یابد؛

۳- در یک دبی ثابت در انژکتور فشاری پیچشی، پیشرانه ژلی که مقدار n کمتری دارد، به فشار تزریق بالاتری نیاز است؛

۴- با افزایش مقدار شاخص تطابق در یک مقدار ثابت از n ، سرعت چرخشی، ضخامت لایه فیلمی و قطر هسته هوا تغییر چندانی نمی‌کند، اما از طول کشیدگی جریان هوا به داخل انژکتور کاسته می‌شود؛

۵- تغییر در میزان شاخص تطابق در مقدار n ثابت، بیشترین تغییر از نظر الگوی جریان پیشرانه ژل، در بخش محفظه چرخش انژکتور اتفاق می‌افتد؛

۶- برای بهبود فرایند اتمیزاسیون پیشرانه ژل در انژکتور فشاری پیچشی بهتر است، پیشرانه

ژلی تهیه شود که با حفظ رفتار نازک شوندگی بالا (n کمتر)، مقدار شاخص تطابق پایین‌تری داشته باشد.

۶. مآخذ

[1] Yang, L.-j., et al., Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors. Fuel, 2012. 97: p. 253-261.

[۲] صابری مقدم، ع و حاجیلری، ن. "پیشرانه‌های ژل"، تحقیق و توسعه مواد پرنرزی، سال ۴، پیاپی ۶، ۱۳۸۷.

[۳] صابری مقدم، ع. منصوری‌زاده، ف. ولی زاده، ا. "بررسی تأثیر رئولوژی پیشرانه ژل بر مشخصه‌های اتمیزاسیون انژکتور جریان پیچشی" فناوری در مهندسی هوافضا، دوره ۵، پیاپی ۱۷، ۱۴۰۰.

[4] Mallory, J., S.J. DeFini, and P. Sojka, Formulation of Gelled Propellant Simulants, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.

[5] Saberi Moghaddam, A. Rezaei, M.R., and Tavangar, S. Experimental Investigation of Characteristic Length Influence on a Combustion Chamber Performance with Liquid and Gelled UDMH/IRFNA Bi-Propellants. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019. 44(9): p. 1154-1159.

[6] Lee, I. and J. Koo, Break-up characteristics of gelled propellant simulants with various gelling agent contents. Journal of Thermal Science, 2010. 19(6): p. 545-552.

[7] Yang, L.-j., et al., Atomization of gelled propellants from swirl injectors with leaf spring in swirl chamber. Atomization and Sprays, 2011.

[۸] امی، ف. "موتور و پیشرانش فضایی" انتشارات بعثت، تهران؛ ۱۳۹۰.

[9] Amini, G., Liquid flow in a simplex swirl nozzle. International Journal of Multiphase Flow, 2016. 79: p. 225-235.



[22] Kant, K. and R. Banerjee., Assessment of Primary Breakup of Liquid Sheet Emanating from a Pressure Swirl Atomizer for Non-Newtonian Fluids. International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS), 2021.

[۲۳] اسکندری، ا. صابری مقدم، ع. امام فرد، ز. " ساخت و کنترل کیفیت سوخت ژل UDMH و بارگذاری آن با ذرات آلومینیوم و کربن " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. ۱۳۹۸.

۱۳. پی نوشت

- 1- Gelled Propellant
- 2- Shear thinning
- 3- Atomization
- 4- Injector
- 5- Straight injector
- 6- Centrifugal injector
- 7- Pressure swirl
- 8- Tangential inlets
- 9- Swirl Chamber
- 10- Liquid sheet
- 11- ligaments
- 12- Surface wave
- 13- Simulant
- 14- Air-blast
- 15- Coaxial
- 16- Impinging injector
- 17- Viscoplastic
- 18- Pyrex
- 19- Volume of Fluid
- 20- Swirl axisymmetric
- 21- Unstructured
- 22- Power law
- 23- Power index
- 24- Radial velocity
- 25- Geometry characteristic constant
- 26- Open-end swirl injector
- 27- Consistency index
- 28- Pressure base
- 29- Segregate
- 30- Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
- 31- Turbulent kinetic Energy
- 32- Dissipation rate
- 33- Second order up wind
- 34- First order up wind

[10] Lefebvre, A.H. and V.G. McDonell, Atomization and sprays. 2017: CRC press.

[11] Ashgriz, N., Handbook of atomization and sprays: theory and applications. 2011: Springer Science & Business Media.

[12] Green, J., Rapp, D., and Roncace, J., Flow visualization of a rocket injector spray using gelled propellant simulants. 27th Joint Propulsion Conference. 1991.

[13] Rahimi, S. Air-blast atomization of gel fuels. 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2001.

[۱۴] توانگر، س. هاشم آبادی، ح. صابری مقدم، ع. " مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی اتمایز شدن سیال غیر نیوتنی غیرالاستیک " رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. ۱۳۹۳.

[15] Dash, S., et al., Formation of air core in nozzles with tangential entry. J. Fluids Eng., 2001. 123(4): p. 829-835.

[۱۶] حسینعلی پور، م. کریمایی، ح. امی، ف. " طراحی، شبیه سازی و آزمایش یک انژکتور گریز از مرکز با ورودی های مماسی " سوخت و احتراق. ۱۳۹۳.

[17] Mandal, A., et al., Flow of power-law fluids in simplex atomizers. International journal of heat and fluid flow, 2008. 29(5): p. 1494-1503.

[18] Rezaei moghaddam, M., et al. Modeling of Non-Newtonian Fluid Flow Within Simplex Atomizers. in ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. 2010.

[19] Kim, H., et al., Spray characteristics of aluminized-gel fuels sprayed using pressure-swirl atomizer. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2017. 249: p. 36-47..

[20] Fu, Q., et al., Spray characteristics of gel propellants in an open-end swirl injector. Fuel, 2019. 254: p. 115555.

[21] Yang, L., et al., Spray Characteristics of Gel Propellants in Open-End Swirl Injector. 5th Topical Problems of Fluid Mechanics, 2019.

