

## (علمی-ترویجی)

# بررسی تأثیر رفتار رئولوژی پیشرانۀ ژل بر مشخصه‌های اتمیزاسیون انژکتور جریان پیچشی

پیشرانۀ‌های ژل به علت برخورداری از مزایای هر دو پیشرانۀ جامد و مایع آیندۀ امید بخشی در کاربردهای هوافضایی دارند. پیشرانۀ‌های ژل پیشرانۀ‌های مایعی هستند که خواص رئولوژیکی آن‌ها با افزودن ژل‌کننده و برخی افزودنی‌ها تغییر می‌کند. خواص رئولوژیکی پیشرانۀ تأثیر زیادی بر فرآیند اتمیزاسیون آن دارد. بنابراین در این مقاله ضمن معرفی خواص رئولوژیکی پیشرانۀ ژل، به تأثیر خواص این پیشرانۀ بر اتمیزاسیون در انژکتور جریان پیچشی پرداخته شده و برخی نکات مهم جهت طراحی انژکتور جریان پیچشی، به منظور افزایش کیفیت اتمیزاسیون پیشرانۀ ژلی ارائه شده است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان دادند که بالا بودن ویسکوزیتۀ اولیۀ پیشرانۀ ژل نسبت به پیشرانۀ مایع مادر موجب افزایش ضریب تخلیه، اندازه قطر قطرات و طول شکست صفحات ژل و کاهش زاویۀ پاشش در انژکتور جریان پیچشی می‌شود و از نظر میزان اثرگذاری بر عملکرد سیستم پیشرانۀ ژل اندازه قطر قطرات از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین، با توجه به خاصیت نازک‌شوندگی برشی پیشرانۀ ژل و امکان اتمیزاسیون پیشرانۀ ژل با انژکتور جریان پیچشی، به منظور بهبود اتمیزاسیون پیشرانۀ ژل، طراحی انژکتور جریان پیچشی باید به‌گونه‌ای باشد که نرخ برش بیشتری به پیشرانۀ ژل جهت کاهش ویسکوزیتۀ اولیۀ آن اعمال کند.

واژه‌های کلیدی: پیشرانۀ ژل، اتمیزاسیون، رئولوژی، نازک‌شوندگی برشی، تیکسوتروپیک،

انژکتور جریان پیچشی

علی صابری مقدم<sup>۱\*</sup>، فرهاد منصوریزاده<sup>۱\*\*</sup> و اسماعیل ولی‌زاده<sup>۲\*\*\*</sup>

۱- مجتمع شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴

۲- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

\* استاد (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

saberi\_mog321@mut.ac.ir

\*\* دانشجوی دکتری

\*\*\* دانش‌آموخته دکتری

## Investigation of Effect of Rheological Behavior of Gelled Propellant on Atomization Characteristics of Swirl Injector

The Gelled propellants have a promising future for aerospace applications because of possessing the advantages of both solid and liquid propellants. A gel propellant is a liquid propellant whose rheological properties have changed by the addition of gellant and other additives. The rheological properties of the propellant have a significant influence on the atomization process. In this paper, the rheological properties of the gel propellant are introduced. Then, the effect of gel propellant properties on the atomization in the swirl injector has been investigated. Subsequently, some important points for designing a swirl injector that can influence enhancing the atomization quality of the gelled propellant are presented. The results of the studies revealed that higher initial viscosity of the gelled propellant compared with the mother liquid propellant cause increase in the discharge coefficient, the size of droplet diameter, and the breakup length of the gel sheet while causing a decrease of spray cone angle in the swirl injector compared with liquid propellant and in the point of view of influenced by the size of droplet diameter on the gel propulsion system. Considering the shear thinning effect of the gel propellant and ability to atomization of gelled propellant by swirl injector, to improve the quality of the atomization of gel propellant, the design of the swirl injector should be such that the shear rate applied on the gel propellant should be increased to conquer the initial viscosity of the gel.

**Keywords:** Gelled Propellant, Atomization, Rheology, Shear Thinning, Thixotropic, Swirl Injector

A. Saberi Moghaddam<sup>1\*</sup>, F. Manourizadeh<sup>1\*\*</sup>, and E. Valizadeh<sup>2\*\*\*</sup>

1- Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Postal Code: 158751774, Tehran, IRAN

2- Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* Professor (Corresponding Author): Email:

saberi\_mog321@mut.ac.ir

\*\* Ph.D. Student

\*\*\* Ph.D. Holder

## (علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

## ۱- مقدمه

شکل همگن در خود نگه دارد [۶]. اجزای اصلی تشکیل دهنده یک نمونه پیشرانۀ ژل عبارت‌اند از: پیشرانۀ مایع، عامل ژل کننده و سایر افزودنی‌ها مانند پایدارکننده‌ها، ذرات پرانرژی و فعال‌کننده سطح<sup>۱</sup>. پیشرانۀ مایع جزء اصلی تشکیل دهنده پیشرانۀ‌های ژلی است. به عبارت دیگر، پیشرانۀ‌های ژلی بهبودیافته پیشرانۀ‌های مایع هستند که قابلیت افزودن مواد پرانرژی به منظور افزایش کارایی و ایمپالس ویژه پیشرانۀ را دارا هستند [۷-۸]. با توجه به مزایای پیشرانۀ‌های ژل تلاش‌های زیادی به منظور استفاده از این پیشرانۀ‌ها در راکت‌ها و موشک‌های تاکتیکی شده است، در سال ۱۹۹۹ میلادی اولین تست پروازی موفق موشک ژلی در آمریکا صورت گرفت [۷]. پس از این موفقیت، فعالیت‌ها در زمینه سیستم پیشرانۀ ژل در آمریکا همچنان ادامه یافت. در سال ۲۰۰۸ میلادی، یک تیم متشکل از یازده محقق اصلی از پنج موسسه مختلف به سرپرستی دانشگاه پوردو<sup>۱</sup> طی قراردادی با بودجه سالانه ۱/۲۵ میلیون دلار با مرکز تحقیقات ارتش آمریکا<sup>۱</sup> مسئولیت مطالعه بر روی فرایندهای پیشرانۀ‌های ژل را بر عهده گرفتند. کشور آلمان تحقیقات بر روی پیشرانۀ‌های ژلی را در سال ۲۰۰۰ میلادی شروع کرد و در سال ۲۰۱۰ میلادی اولین تست پروازی موفق راکت ژلی را انجام داد [۹].

علی‌رغم مزایای قابل توجه پیشرانۀ‌های ژل، سیستم‌های پیشرانۀ ژل با چالش‌ها و محدودیت‌هایی مواجه هستند. مطالعات انجام شده توسط مظفری و همکاران در زمینه سیستم‌های پیشرانۀ ژل نشان می‌دهد، تغییر در رفتار رئولوژیکی پیشرانۀ ژل نسبت به پیشرانۀ مایع، مهم‌ترین بخش‌های سیستم پیشرانۀ ژل یعنی دینامیک، اتمیزاسیون<sup>۲</sup> و احتراق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، رفتار دینامیکی پیشرانۀ ژل نسبت به پیشرانۀ مایع از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند. همچنین، فرایند اتمیزاسیون و احتراق پیشرانۀ ژل (احتراق قطره<sup>۳</sup> پیشرانۀ ژل شامل ۴ مرحله می‌باشد) در مقایسه با پیشرانۀ‌های مایع با رفتار نیوتونی سخت‌تر و پیچیده‌تر است [۱۰]. از بین چالش‌های مطرح شده برای پیشرانۀ ژل، اتمیزاسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا کارایی موتور راکت‌های سوخت مایع و ژل نه تنها به نوع پیشرانۀ بلکه به کیفیت اتمیزاسیون پیشرانۀ نیز بستگی دارد. به طوری که پایداری احتراق و عملکرد موتورهای موشک سوخت مایع به شدت به فرایند اتمیزاسیون و اختلاط سوخت و

در طی چند دهه<sup>۴</sup> گذشته پیشرانۀ‌هایی که کارایی و ایمنی بالاتری داشته‌اند، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند و تقاضا برای استفاده از این پیشرانۀ‌ها در راکت‌ها و سایر کاربردهای مشابه افزایش یافته است. به نظر می‌رسد از بین پیشرانۀ‌های موجود، پیشرانۀ‌های ژلی<sup>۱</sup> قابلیت و توانایی تأمین نیازهای امروزی صنایع هوافضا را داشته باشند. علاوه بر این، با توجه به خصوصیات منحصر بفرد پیشرانۀ ژلی پیش‌بینی می‌شود که این پیشرانۀ‌ها در آینده، جایگاه ویژه‌ای در صنایع هوافضا داشته باشند [۱-۲]. پیشرانۀ ژل را می‌توان پیشرانۀ مایعی دانست که خواص رئولوژیکی آن با افزودن عامل ژل کننده<sup>۲</sup> و برخی افزودنی‌ها تغییر یافته و رفتاری با خاصیت نازک شونده برشی<sup>۳</sup> و تیکسوتروپیک<sup>۴</sup> (در تنش برشی ثابت با گذشت زمان رقیق می‌شوند) پیدا می‌کند. خاصیت رئولوژیکی پیشرانۀ‌های ژل موجب شده است که این پیشرانۀ‌ها از نظر عملکرد و قابلیت مدیریت تراست نسبت به پیشرانۀ‌های جامد و از نظر ایمنی و ذخیره‌سازی طولانی مدت نسبت به پیشرانۀ‌های مایع ارجحیت داشته باشند. پیشرانۀ‌های ژل به هنگام انبار داری مشابه مواد ویسکوالاستیک<sup>۵</sup> و به هنگام حرکت مشابه یک مایع غیرنیوتونی رفتار می‌کنند. به علت تشابه پیشرانۀ ژل با پیشرانۀ مایع، این پیشرانۀ‌ها نه تنها اکثر مزایای پیشرانۀ مایع را دارا هستند، بلکه فاقد برخی از معایب پیشرانۀ مایع نیز هستند. پیشرانۀ‌های ژل از پیشرانۀ‌های مایع ایمن‌تر هستند و کارایی و شرایط عملیاتی بهتری دارند. علاوه بر این، به علت ساختار پلیمری یا شبکه‌ای آن‌ها، امکان افزودن مواد پرانرژی مانند ذرات آلومینیوم، بریلیم، منیزیم و بور نیز با آن‌ها فراهم می‌شود که موجب افزایش دانسیته و ایمپالس ویژه<sup>۶</sup> پیشرانۀ می‌شود [۳-۵].

اولین تحقیقات در مورد پیشرانۀ‌های ژلی از سوخت‌های دوغابی<sup>۷</sup> شروع شده است. در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی، گلسمن و ساویر<sup>۸</sup> اعلام کردند که در آینده پرانرژی‌ترین پیشرانۀ‌های مایع قابل انبارداری، از میان پیشرانۀ‌هایی خواهند بود که ساختار داخلی پیشرانۀ بتواند با اضافه کردن عامل ژل کننده تغییر کند، بگونه‌ای که بتواند ذرات فلزی و یا سایر ذرات پرانرژی را به

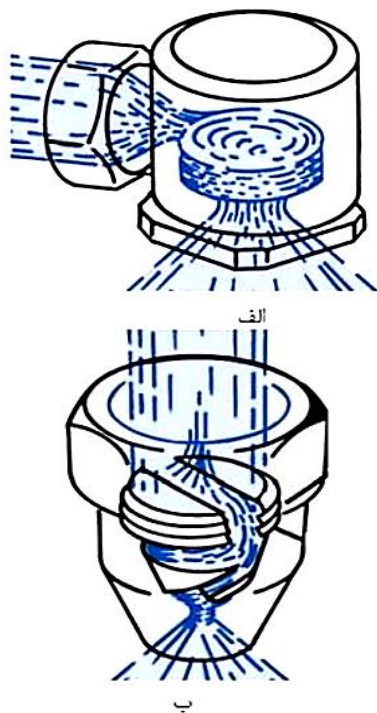
1. Gelled Propellant
2. Gellant
3. Shear-Thinning
4. Thixotropic
5. Viscoelastic
6. Specific Impulse
7. Slurry
8. Glassman and Sawyer

9. Surfactant

1 . Purdue University	0
1 . U.S. Army Research Office	1
1 . Atomization	2

چرخش سیال کوچک‌تر از قطر قطرات در انژکتورهای اوریفیسی ساده است [۱۴، ۱۱].

وجود حرکت چرخشی سیال در انژکتور پیچشی باعث می‌شود تا ناپایداری موجود در جت سیال خروجی از انژکتور پیچشی بیشتر از انژکتور اوریفیسی ساده باشد، در نتیجه با افزایش ناپایداری در جت خروجی، قطرات تولیدی در انژکتور پیچشی ریزتر از انژکتور اوریفیسی ساده هستند. حرکت چرخشی سیال (مایع) در انژکتورهای پیچشی به روش‌های مختلفی ایجاد می‌شود. روش اصلی ایجاد حرکت چرخشی یا به وسیلۀ ورودی‌های مماسی<sup>۴</sup> و یا قرار دادن بدنۀ ماریچی<sup>۵</sup> شکل در محفظۀ چرخش انژکتور می‌باشد. در انژکتور پیچشی-مماسی با عبور سیال از ورودی مماس بر دیوارۀ انژکتور که عمود بر محور انژکتور است، مومنتوم زاویه‌ای به سیال وارد و موجب حرکت چرخشی سیال می‌شود (شکل ۱-الف). در انژکتور پیچشی-ماریچی سیال به صورت محوری (موازی محور انژکتور) وارد انژکتور می‌شود اما به واسطه قرارگیری بدنه ماریچی شکل در داخل انژکتور، مومنتوم زاویه‌ای به سیال اعمال شده و موجب ایجاد حرکت چرخشی در سیال می‌شود (شکل ۱-ب) [۱۳].



شکل (۱): شماتیک نحوه عبور سیال از، الف) انژکتور پیچشی-مماسی و ب) انژکتور پیچشی-ماریچی [۱۳].

اکسیدکننده بستگی دارد. از طرف دیگر، یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر کیفیت اتمیزاسیون، نوع انژکتور استفاده شده برای اتمیزاسیون پیشرانه است [۱۲-۱۱].

انژکتور وسیله‌ای است که سیال (پیشرانه) از طریق سیستم تغذیه (راکت) از یک طرف آن وارد و از طرف دیگر آن، با عبور از نازل انژکتور، از آن خارج می‌شود. این فرآیند خروج باید به گونه‌ای باشد که سیال خروجی به خوبی، اتمیزه شده و به قطرات ریز تبدیل شود تا بتواند بصورت بهینه محترق شود. برای احتراقی مناسب در محفظۀ احتراق کارهای باید توسط انژکتور صورت گیرد [۳] که عبارتند از:

- پاشش مناسب سوخت و اکسیدکننده به داخل محفظۀ احتراق و اتمیزاسیون مناسب آن‌ها،
- ایجاد مخلوط یکنواخت در محفظۀ احتراق و
- انتقال سوخت و اکسیدکننده با فشار و دبی بالا به محفظۀ احتراق.

با توجه به توسعه روز افزون فناوری، انواع مختلفی از انژکتورها طراحی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از بین انژکتورهای ساخته شده، انژکتورهای جریان پیچشی<sup>۱</sup> به علت سادگی در ساختار، قابل اطمینان بودن و تأثیر بهینۀ آن‌ها در اتمیزاسیون سیالات و همچنین دستیابی به چتر پاشش مناسب در صنایع مختلف از جمله موتورهای راکت‌های مایع، توربین‌های گازی، موتورهای احتراق داخلی و سایر موتورهای احتراقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱]. در انژکتورهای جریان پیچشی، ساختار (پیکربندی) هندسی این انژکتورها به نوعی است که با عبور سیال از انژکتور، مومنتوم زاویه‌ای<sup>۲</sup> به سیال اعمال می‌شود. این امر موجب می‌شود سیال سرعت چرخشی به خود گرفته و پس از آنکه سیال چرخش لازم را انجام داد از نازل انژکتور به صورت فیلم مایع و شبیه یک مخروط خارج شود. با برخورد مخروط‌های پاشش، عمل اتمیزاسیون و اختلاط صورت می‌گیرد [۱۳]. زاویۀ پاشش در انژکتورهای پیچشی بزرگتر از زاویۀ پاشش در انژکتور اوریفیسی ساده<sup>۳</sup> است. در واقع، محل برخورد مخروط‌های پاشش در فاصله کمتری از صفحه انژکتور صورت می‌گیرد، در نتیجه گازهای داغ برگشتی امکان کمتری می‌یابند تا به درون لایه مایع نفوذ کرده و برای صفحه انژکتور خطرآفرین باشند. در شرایط مساوی، یعنی قطر نازل و دبی یکسان، قطر قطرات در انژکتور پیچشی به دلیل

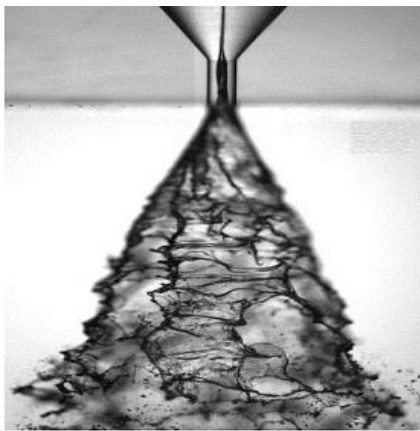
1. Swirl Injector  
 2. Angular Momentum  
 3. Plain-Orifice

4. Tangential Inlet  
 5. Screw

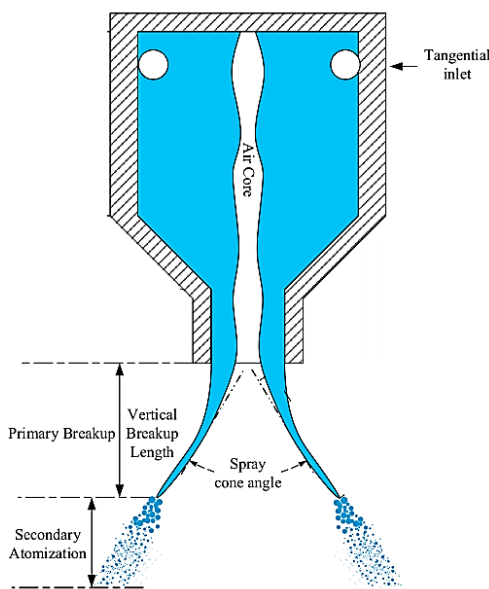
(علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

چرخش انژکتور شده و از اوریفیس خارج می‌شود. در ادامه، با توجه به شکل ۴ فرایند شکل‌گیری قطرات در اتمیزاسیون پیش‌رانه با استفاده از انژکتور جریان پیچشی به این صورت است که در لایهٔ فیلمی خروجی از نازل انژکتور به قطرات درشت شکسته می‌شود که این مرحله یعنی شکست جت یا فیلم مایع را شکست اولیه<sup>۴</sup> می‌نامند. در ادامه، قطرات درشت ایجاد شده از مرحله شکست اولیه به قطرات ریزتر تبدیل می‌شوند که به این مرحله شکست ثانویه<sup>۵</sup> می‌گویند. به منظور بررسی کیفیت اتمیزاسیون و پاشش صورت گرفته توسط انژکتور جریان پیچشی پارامترهای مختلفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.



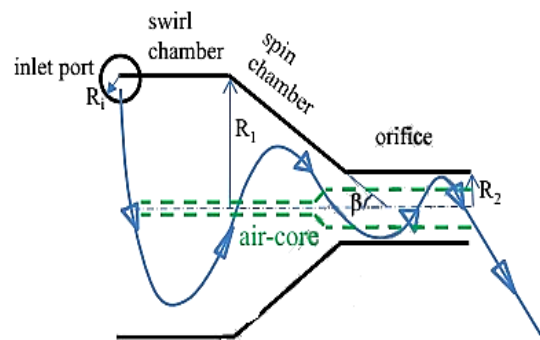
شکل (۳): شکل اتمیزاسیون در انژکتور پیچشی-مماسی [۱۵].



شکل (۴): شماتیک نواحی ارزیابی کیفیت اتمیزاسیون انژکتور جریان پیچشی [۱۱].

ساختار هندسی و پیکربندی انژکتورهای جریان پیچشی استفاده شده در موتور موشک‌های سوخت مایع به همان اندازه که باید از نظر هندسی ساده باشند، باید قابلیت اطمینان و پایداری در احتراق را با ایجاد یکنواختی در فرایند اتمیزاسیون فراهم سازند. انژکتورهای جریان پیچشی با ورودی مماسی، به دلیل پایداری احتراق بالا، هندسه ساده و ساخت آسان نسبت به مدل‌های دیگر انژکتور جریان پیچشی در موتورهای سوخت مایع بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱]. انژکتور جریان پیچشی با ورودی مماسی از چهار قسمت اصلی تشکیل می‌شود که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۵] که عبارتند از:

- ۱- ورودی مماسی،
- ۲- محفظهٔ چرخش انژکتور؛
- ۳- ناحیه یا قسمت همگرا<sup>۳</sup> و
- ۴- اوریفیس یا نازل انژکتور.



شکل (۲): شماتیک انژکتور پیچشی با ورودی مماسی [۱۵].

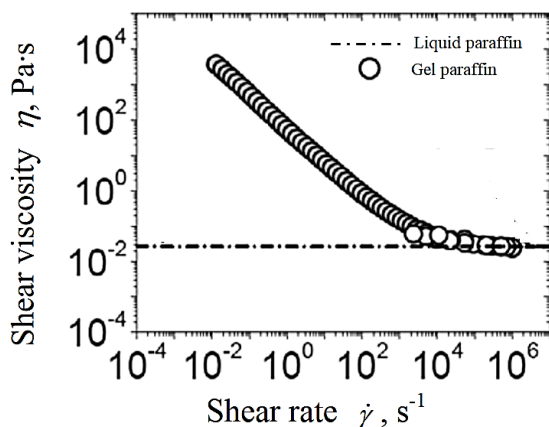
در شکل ۲ شعاع روزنهٔ ورودی مماسی با  $(R_i)$ ، شعاع محفظهٔ چرخش با  $(R_1)$ ، زاویهٔ همگرایی با  $(\beta)$  و شعاع اوریفیس انژکتور با  $(R_2)$  نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، این انژکتورها یک اسپری به صورت لایهٔ نازک سیال که به علت چرخش اولیه به صورت یک صفحهٔ مخروطی شکل تو خالی در می‌آیند، را ایجاد می‌کنند. وارد شدن سیال با سرعت بالا به درون محفظهٔ چرخش انژکتور، باعث ایجاد چرخش در آن می‌شود که در نتیجه قسمت مرکزی فضای درونی انژکتور، ناحیه‌ای عاری از سیال یا به اصطلاح حفره هوا<sup>۳</sup> به وجود می‌آید و فیلم نازک سیال به دیواره نازل انژکتور می‌چسبد [۱۵-۱۶].

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شد در انژکتور پیچشی مماسی، سیال از طریق ورودی مماسی وارد محفظهٔ

1. Swirl Chamber
2. Spin Chamber (convergent section)
3. Air Core

4. Primary Breakup
5. Secondary Breakup

خاصیت نازک‌شوندگی برشی نیز هستند، یعنی با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته پیشرانۀ کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل (همان ویسکوزیته پیشرانۀ ژل در نرخ‌های برش بسیار پایین) در مقایسه با ویسکوزیته پیشرانۀ پایه مایع بیشتر است. اما خواص رئولوژی ژل باعث می‌شود، پیشرانۀ ژل بعد از عبور از خطوط لوله و انژکتور اگر به اندازه کافی تحت نیروهای برشی قرار گیرد، ویسکوزیته آن به ویسکوزیته پیشرانۀ مایع نزدیک شود [۱۸-۲۱].



شکل (۵): منحنی تغییرات ویسکوزیته ژل پارافین/تیکساترول با افزایش نرخ برش [۱۸].

تحقیقات نشان می‌دهد با افزایش ترکیب درصد عامل ژل‌کننده و یا مواد پرانرژی فلزی، ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ یا سوخت ژل افزایش پیدا می‌کند [۲۲، ۱۹]. شکل ۶ نمودار تغییرات ویسکوزیته ظاهری ژل تهیه شده از اتانول با ژل‌کننده متیل سلولز<sup>۶</sup> و افزودنی نانوذرات پرانرژی آلومینیوم را با نرخ برش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد متیل سلولز از ۸ درصد به ۹ درصد ویسکوزیته اولیه ژل افزایش یافته است. حتی در برخی از پیشرانه‌های ژل افزودن عامل ژل‌کننده موجب ایجاد تنش تسلیم می‌شود. علاوه بر این، با افزایش درصد نانوذرات آلومینیوم از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد ویسکوزیته ژل به شدت افزایش یافته است [۲۲]. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ و تغییر ویسکوزیته پیشرانۀ ژل با اعمال نرخ برش در ادامه به بررسی تأثیر ویسکوزیته روی پارامترهای مهمی اشاره شده در انتهای مقدمه پرداخته می‌شود.

با توجه به کارایی مناسب انژکتورهای جریان پیچشی در اتمیزاسیون پیشرانه‌های مایع، مطالعات زیادی در خصوص نحوه عملکرد و تأثیر ساختار هندسی انژکتور بر روند اتمیزاسیون و پاشش پیشرانه‌های مایع در این انژکتورها صورت گرفته است [۱۷-۱۶]. با این وجود، مطالعات تجربی کمی در مورد نحوه اتمیزاسیون پیشرانه‌های ژلی توسط انژکتور جریان پیچشی مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این مقاله با مرور کارهای انجام شده در خصوص اتمیزاسیون پیشرانه‌های ژل با انژکتور جریان پیچشی، به تأثیر خواص رئولوژیکی ژل‌ها روی مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت پاشش در انژکتور جریان پیچشی یعنی، دبی جرمی و ضریب تخلیه انژکتور در قسمت نازل انژکتور، طول شکست<sup>۲</sup> و زاویه مخروط پاشش<sup>۳</sup> در ناحیه شکست اولیه<sup>۱</sup> جت و قطر قطرات در ناحیه شکست ثانویه [۱۱] پرداخته شده است و الزاماتی طراحی انژکتور جریان پیچشی برای پیشرانه‌های ژل جهت تشابه اتمیزاسیون این پیشرانه‌ها با اتمیزاسیون پیشرانه‌های مایع آورده شده است.

## ۲- تأثیر رئولوژی پیشرانۀ ژل بر مشخصه‌های اتمیزاسیون انژکتور پیچشی

نکته مهم در استفاده از انژکتورهای جریان پیچشی برای اتمیزاسیون پیشرانه‌های ژلی آن است که خصوصیات رئولوژیکی این پیشرانه‌ها با پیشرانه‌های مایع متفاوت است. یک خاصیت رئولوژیکی اساسی سیال ویسکوزیته است. سیالات براساس نوع وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش<sup>۴</sup> به دو دسته نیوتونی و غیر نیوتونی تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین، سیالات غیر نیوتونی به دو دسته سیالات غیر نیوتونی مستقل از زمان و وابسته به زمان تقسیم می‌شوند. از نقطه نظر دینامیکی، ژل‌ها سیالاتی غیر نیوتونی هستند که رفتاری وابسته به زمان دارند و عموماً جزء سیالات تیکسوتروپ محسوب می‌شوند. تیکسوتروپی پدیده‌ای رئولوژیکی و وابسته به زمان است. بدین صورت که ویسکوزیته پیشرانۀ ژل در یک نرخ برش ثابت، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. علاوه بر این، پیشرانه‌های ژل دارای

1. Discharge Coefficient
2. Breakup Length
3. Spray Cone Angle
4. Shear Rate

5. Thixatrol/Paraffin  
6. Methyl Cellulose (MC)

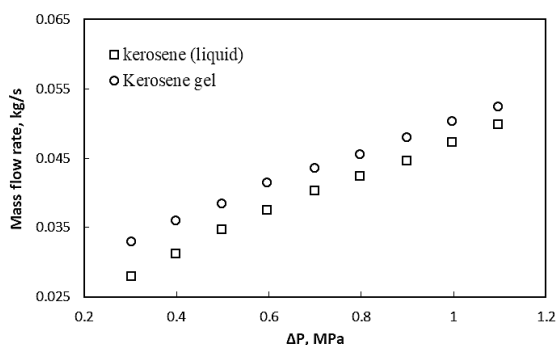
## (علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

در مقابل فشار تزریق برای دو پیشرانۀ کروسین مایع و کروسین ژل در یک نمونه انژکتور جریان پیچشی را نشان می‌دهد. در نگاه اول مشخص می‌باشد که در تمامی فشارهای تزریق دبی جرمی خروجی از انژکتور در حالت کروسین مایع کمتر از دبی خروجی کروسین در حالت ژل است [۲۴]. اما با توجه به معادلۀ (۲) دبی جرمی انژکتور با ضریب تخلیه نسبت مستقیم دارد. یعنی با افزایش ضریب تخلیه، دبی جرمی انژکتور افزایش می‌یابد.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (2)$$

در معادلۀ (۲)،  $A$  سطح مقطع نازل انژکتور،  $\rho$  دانسیته سیال،  $\Delta p$  اختلاف فشار دو سر انژکتور،  $C_d$  ضریب تخلیه و  $\dot{m}$  دبی جرمی انژکتور است. با توجه به معادلۀ (۲)، شکل ۷ و مقادیر دانسیته کروسین مایع و ژل که در جدول ۲ آورده شده است، می‌توان نشان داد تأثیرپذیری دبی جرمی نسبت به افزایش دانسیته در یک اختلاف فشار یکسان کم بوده و عامل اصلی افزایش دبی جرمی انژکتور افزایش ضریب تخلیه به خاطر افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل است.

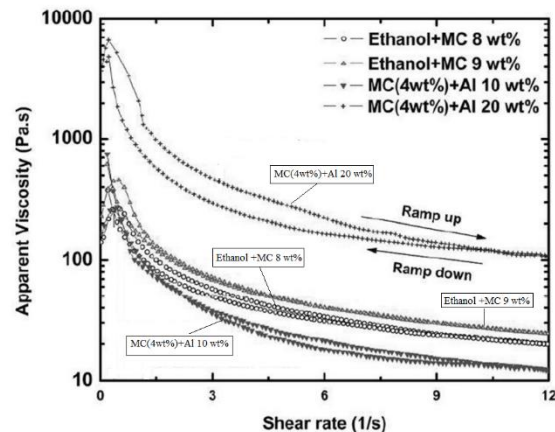


شکل (۷): دبی جرمی خروجی از انژکتور در فشارهای عملیاتی مختلف با سوخت کروسین مایع و ژل [۲۴].

جدول (۲): دانسیته کروسین مایع و ژل [۲۴].

نوع سوخت	دانسیته (Kg/m <sup>3</sup> )
کروسین مایع	۸۰۰
کروسین ژل	۸۱۴/۱

علاوه بر موضوعات اشاره شده با بررسی دقیق‌تر شکل ۷ می‌توان گفت که اختلاف دبی دو پیشرانۀ ژل و مایع در فشار تزریق پایین بیشتر از فشار تزریق بالا است. زیرا با افزایش فشار تزریق، نرخ برش بیشتری به پیشرانۀ اعمال می‌شود. بنابراین، با توجه به رفتار نازک‌شونده برشی پیشرانۀ ژل اعمال نرخ بیشتر موجب می‌شود پیشرانۀ ژل از نظر خواص به پیشرانۀ مایع مادر نزدیک شود. از این‌رو، همین امر موجب می‌شود دبی پیشرانۀ مایع و ژل در فشارهای تزریق بالا نزدیک به هم باشد [۲۴، ۱۲].



شکل (۶): نمودار تغییرات ویسکوزیته سوخت ژل با افزایش درصد عامل ژل‌کننده (متیل سلولوز با وزن مولکولی ۴۰,۰۰۰) و نانوذرات آلومینیوم (متوسط اندازه ذرات ۵۰ نانومتر) با تغییر نرخ برش [۲۲].

## ۲-۱- تأثیر خواص رئولوژیکی پیشرانۀ ژل بر دبی جرمی و ضریب تخلیه انژکتور جریان پیچشی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی انژکتورها ضریب تخلیه است. این ضریب که نقش اصلی را در تعیین دبی جرمی ایفا می‌کند، از نسبت دبی جرمی واقعی به دبی جرمی در حالت ایده‌آل به دست می‌آید که در معادلۀ (۱) نشان داده شده است. به عبارت دیگر، ضریب تخلیه معیاری برای سنجش میزان دبی جرمی واقعی نسبت به دبی جرمی تئوری خروجی از انژکتور است [۱۴].

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (1)$$

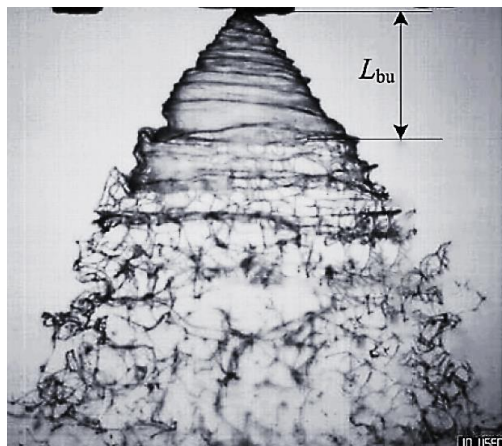
با توجه به اهمیت ضریب تخلیه و به منظور بررسی تأثیر خواص پیشرانۀ ژل بر آن، جدول ۱ مقادیر ضریب تخلیه و دبی جرمی خروجی برای پیشرانۀ‌های اتانول مایع و ژل در یک انژکتور جریان پیچشی با فشار تزریق یکسان را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۱ مشخص است که ضریب تخلیه و دبی جرمی اتانول ژل از اتانول مایع بیشتر است [۲۳].

جدول (۱): ضریب تخلیه و دبی جرمی دو پیشرانۀ اتانول مایع و ژل در انژکتور جریان پیچشی [۲۳].

انژکتور ژل	انژکتور مایع	نوع پیشرانۀ مشخصه پیشرانۀ
۰/۲۵	۰/۲۵	اختلاف فشار دو سر انژکتور (MPa)
۸۵۵	۸۰۹	دانسیته (Kg/m <sup>3</sup> )
۰/۳۰۶	۰/۲۶۴	ضریب تخلیه
۱۳/۸۳	۱۱/۹۲	دبی جرمی (g/s)

جهت بررسی هر چه بهتر تأثیر خواص رئولوژیکی پیشرانۀ بر کیفیت اتمیزاسیون سوخت ژل، شکل ۷ روند تغییرات دبی خروجی

شکافنده<sup>۳</sup> بر نیروهای نگه‌دارنده<sup>۴</sup> غلبه کند، شکست مایع اتفاق می‌افتد. بنابراین، فاصله<sup>۵</sup> بین خروجی نازل انژکتور تا تشکیل اولین لیگامنت<sup>۵</sup> و یا نقطه فروپاشی پیوستگی صفحه مایع<sup>۶</sup> را طول شکست می‌گویند [۲۶، ۲]. در شکل ۸ طول شکست<sup>۷</sup> با نماد  $L_{bu}$  نشان داده شده است.



شکل (۸): طول شکست مایع در یک نمونه انژکتور جریان پیچشی [۲].

در طراحی محفظه احتراق راکت موتورهای سوخت مایع، طول شکست یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی است. طول شکست در موتورهای احتراقی به منظور دستیابی به بالاترین بازده احتراق و کنترل دقیق ناپایداری احتراق مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد [۲۷]. از طرف دیگر، یکی از پارامترهای ارزیابی کیفیت اتمیزاسیون، طول شکست صفحات مایع است. در حالت کلی، طول شکست کوتاه‌تر نشان از ناپایداری بیشتری در ورق‌های مایع است که همین امر باعث می‌شود، پروسه تشکیل لیگامنت‌ها و تبدیل آن‌ها به قطره سریعتر اتفاق افتد که منجر به انجام احتراق کامل در طول محفظه می‌شود. همچنین، این امر باعث کاهش طول محفظه احتراق و در نتیجه کاهش وزن کلی موتور می‌شود [۲۸-۲۹]. بنابراین، لازم است در پیشرانه‌های ژل نیز طول شکست صفحات مایع در فرایند اتمیزاسیون مورد مطالعه قرار گیرد.

شکل ۹ روند تغییرات طول شکست ژل ADN را در ۵ و ۱۰ درصد وزنی عامل ژل کننده، در فشارهای تزریق مختلف در یک انژکتور جریان پیچشی نشان می‌دهد. برداشت اولیه از شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش درصد عامل ژل کننده از ۵ درصد به ۱۰

در حالت کلی، علت اختلاف در دبی و ضریب تخلیه این دو پیشرانه را باید در فیزیک جریان درون انژکتور جستجو کرد. به علت سرعت چرخشی بالای سیال، حفره<sup>۱</sup> هوایی در درون نازل‌هایی که دارای ورودی مماسی هستند شکل می‌گیرد. در انژکتورهای جریان پیچشی به علت نازک بودن ضخامت لایه<sup>۱</sup> مرزی و وجود جریان پتانسیل در بخش اعظم محفظه<sup>۲</sup> چرخش، سرعت مماسی<sup>۱</sup> (چرخشی) دارای پروفیل چرخش آزاد<sup>۲</sup> بوده و مقدار آن با نزدیک شدن به محور انژکتور افزایش می‌یابد. با توجه به حاکم بودن معادله برنولی در جریان پتانسیل و افزایش مقدار سرعت در مرکز انژکتور، مقدار فشار در مرکز انژکتور به شدت کاهش می‌یابد. وقتی فشار در مرکز انژکتور به کمتر از فشار محیط می‌رسد هوای محیط به درون انژکتور مکیده و حفره<sup>۳</sup> هوا تشکیل می‌شود. در عمل هسته هوا وقتی شکل می‌گیرد که نیروی گریز از مرکز به نیروی ویسکوز مایع غلبه کند، بنابراین ویسکوزیته مایع و هندسه<sup>۴</sup> انژکتور بیشترین تأثیر را بر روی شکل‌گیری حفره هوا دارند [۱۴-۱۵]. ویسکوزیته مایع باعث کاهش سرعت چرخشی جریان می‌شود و با کاهش سرعت چرخشی، نیروی گریز از مرکز طبق معادله<sup>۳</sup> کاهش می‌یابد.

$$F = m \frac{V^2}{r} \quad (۳)$$

در معادله<sup>۳</sup>،  $F$  نیروی گریز از مرکز،  $V$  سرعت چرخشی،  $m$  جرم سیال در حال حرکت و  $r$  شعاع چرخش است. با کاهش نیروی گریز از مرکز ضخامت لایه<sup>۱</sup> سیال شکل گرفته در قسمت اوربیس انژکتور بیشتر می‌شود و به دنبال افزایش ضخامت سیال، ضریب تخلیه<sup>۱</sup> انژکتور افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش ویسکوزیته<sup>۱</sup> اولیه<sup>۲</sup> پیشرانۀ ژل به علت کاهش سرعت چرخش، قطر حفره<sup>۳</sup> هوا در اوربیس انژکتور کاهش یافته و ضریب تخلیه افزایش پیدا می‌کند [۲۵].

## ۲-۲- تأثیر خواص پیشرانۀ ژل بر طول شکست انژکتور جریان پیچشی

به طور کلی فرآیند اتمیزاسیون دو مرحله کلی دارد. در مرحله<sup>۱</sup> اول یا اتمیزاسیون اولیه<sup>۱</sup> جریان مایع به نوارهای باریک، رشته‌های کوتاه یا بلند و یا به قطرات درشت تبدیل می‌شود و در مرحله<sup>۲</sup> دوم یا اتمیزاسیون ثانویه<sup>۲</sup> قطرات درشت حاصل از اتمیزاسیون اولیه به قطرات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. در واقع، فرآیند اتمیزاسیون به پروسه<sup>۳</sup> تبدیل جت و فیلم مایع پیوسته به قطرات ریز گفته می‌شود. در اتمیزاسیون، زمانی که نیروهای

3. Disruptive  
4. Consolidating  
5. Ligament  
6. Liquid Sheet  
7. Liquid break-up (Lbu)

1. Tangential (Swirl) Velocity  
2. Free Vortex

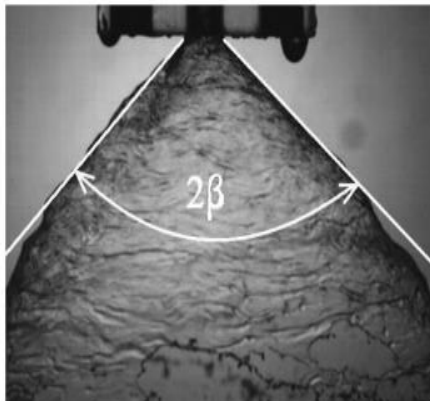
## (علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

ثابت و جامدگونه بوده و هنگام حرکت رفتاری مشابه سیالات غیرنیوتونی دارند. بنابراین، نیروهای جاذبه بین مولکولی پیشرانۀ ژل بیشتر از نیروی بین مولکولی پیشرانۀ مایع است. با توجه به اینکه ویسکوزیته سیال مایع ناشی از نیروی جاذبه بین مولکولی است، بنابراین ویسکوزیته پیشرانۀ ژل به خصوص در نرخهای برش پایین بیشتر از ویسکوزیته پیشرانۀ مایع مادر است. از این رو، پیشرانۀ ژل مقاومت بیشتری در برابر نیروهای وارد بر آن (نیروهای آبرودینامیکی، نیروی گریز از مرکز و نیروی اینرسی) دارد و مانع از رشد موجهای سطحی<sup>۱</sup> در ورق مایع می شود. در واقع، مقاومت ورق مایع پیشرانۀ ژل در برابر انرژی جنبشی بیشتر و مانع از پراکندگی و تغییر شکل مایع خروجی از انژکتور شده و باعث کاهش ناپایداری در فیلم مایع می شود که این امر موجب افزایش طول شکست صفحه مایع می شود [۳۱-۳۳].

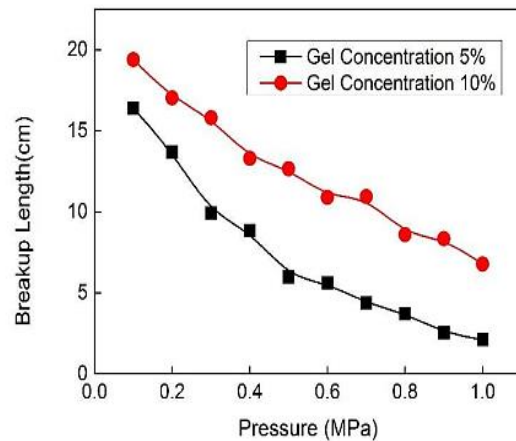
### ۳-۲- تأثیر خواص پیشرانۀ ژل بر زاویۀ پاشش در انژکتور جریان پیچشی

نحوۀ اسپری پیشرانۀ در محفظۀ احتراق بر چگونگی آزادسازی انرژی آن تأثیر می گذارد. یکی از پارامترهای مهم تعیین کننده رفتار اسپری، زاویۀ پاشش آن است. زاویۀ اسپری در سیستمهای احتراقی اهمیت ویژه ای دارد. این پارامتر تأثیر زیادی بر کارایی اشتعال محدوده خاموشی شعله و انتشار مواد سوخته نشده و دود دارد. همچنین، اطلاع از زاویۀ چتر پاشش، با توجه به اثری که در اختلاط سوخت و اکسید با هم و اختلاط با چتر اسپری انژکتورهای مجاور در صفحه انژکتور دارد، حائز اهمیت است. همچنین، زاویۀ پاشش تأثیر زیادی روی توزیع فضای پاشش و شکست مخروط اولیه دارد [۱۱، ۳۴].

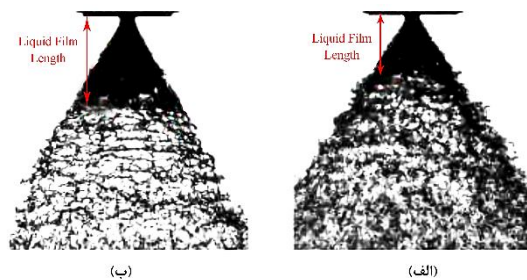


شکل (۱۱): تعریف زاویۀ پاشش [۱۱].

درصد وزنی طول شکست افزایش یافته است [۳۱]. اما با نگاهی دقیق تر به روند تغییرات طول شکست مشخص می شود که اختلاف طول شکست با افزایش فشار تزریق افزایش می یابد. زیرا در فشارهای تزریق پایین ساختار شبکه ای ژل در هر دو مقدار ۵ و ۱۰ درصد وزنی می تواند در برابر نیروی برشی اعمال شده مقاومت خوبی نشان دهد. اما با افزایش فشار تزریق و به دنبال آن افزایش نیروی برشی شبکه های مولکولی ژل حاوی ۵ درصد ژلنت نسبت به ۱۰ درصد وزنی ژلنت سریعتر شکسته می شود و این امر موجب افزایش اختلاف طول شکست می شود [۳۰-۳۲]. شکل ۱۰ تمیزاسیون کروسین مایع و کروسین ژل را با استفاده از انژکتور جریان پیچشی نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است طول شکست کروسین ژل بزرگتر از طول شکست کروسین مایع است، زیرا ویسکوزیته اولیه کروسین ژل بیشتر از کروسین مایع است [۲۴].



شکل (۹): تغییرات طول شکست ژل ADN با فشار تزریق برای ژل های حاوی ۵ و ۱۰ درصد وزنی عامل ژل کننده [۳۰].



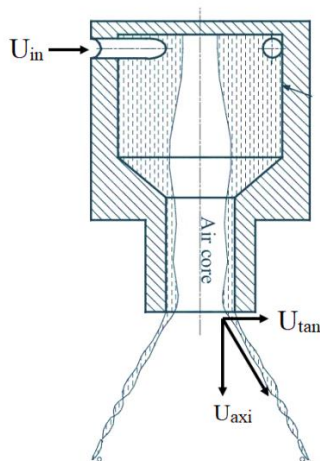
شکل (۱۰): طول شکست (الف) کروسین مایع و (ب) کروسین ژل در یک نمونه انژکتور جریان پیچشی [۲۴].

در حالت کلی، چون ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل در مقایسه با ویسکوزیته پیشرانۀ پایه همان سوخت و یا اکسید بیشتر است، بنابراین طول شکست پیشرانۀ ژل بزرگتر از طول شکست پیشرانۀ پایه آن است [۲۷]. علت این امر را باید در ساختار داخلی ژل جستجو کرد. ژل ها از میزان قابل توجهی پیوندها و اتصالات عرضی تشکیل شده اند که در حالت پایدار

جریان پیچشی دارای دو نوع سرعت است: سرعت چرخشی (مماسی) و سرعت محوری.

جدول (۳): مقادیر زاویۀ پاشش برای سیال گلیسیرین-آب با تغییر ویسکوزیته سیال [۳۱].

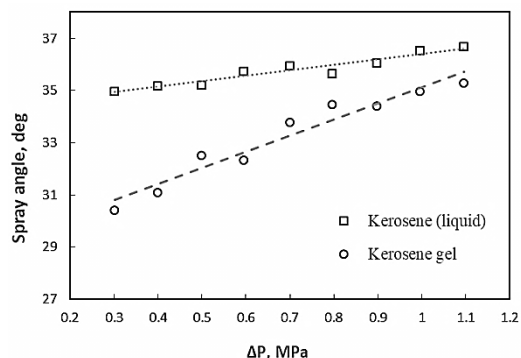
زاویه پاشش	ویسکوزیته	گلیسیرین / آب
درجه	mPa.s	درصد گلیسیرین
۵۹/۶۷	۰/۹۳۷	۰
۵۶/۳۹	۱/۳۱۰	۱۰
۵۵/۷۰	۱/۸۸۸	۲۰
۵۴/۳۵	۴/۵۳۳	۴۰
۳۵/۵۷	۷۹/۴۸۸	۸۰



شکل (۱۳): جهت بردارهای سرعت در ورودی و خروجی انژکتور جریان پیچشی [۱۴].

وجود سرعت چرخشی در سیال باعث شکل‌گیری مخروط پاشش در انژکتور جریان پیچشی می‌شود. بنابراین، با افزایش سرعت چرخشی زاویۀ پاشش نیز افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر، افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل باعث افزایش مقاومت سیال در برابر حرکت می‌شود. در نتیجه، پیشرانۀ ژل افت انرژی بیشتری نسبت به پیشرانۀ پایه در حین عبور از انژکتور خواهد داشت. بنابراین، مومنتوم زاویه‌ای ورودی بیشتر از مومنتوم زاویه‌ای خروجی می‌باشد. به همین علت سرعت چرخشی در اوریفیس انژکتور با افزایش ویسکوزیته کاهش می‌یابد و به دنبال آن زاویۀ پاشش نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، هر چقدر نسبت سرعت چرخشی به سرعت محوری کاهش یابد زاویۀ چتر پاشش در انژکتور جریان پیچشی کاهش خواهد یافت. دقیقاً به همین علت است که با افزایش فشار تزریق به علت افزایش سرعت چرخشی سیال در انژکتور جریان پیچشی، زاویۀ پاشش افزایش پیدا می‌کند [۱۵-۱۴].

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری زاویۀ مخروط پاشش، با تکنیک پردازش تصاویر گرفته شده از پاشش در آزمایشات، وجود دارد. با توجه به شکل ۱۱ معمولاً خطوط مستقیمی از کناره‌های پاشش رسم می‌شود و زاویۀ بین این خطوط زاویۀ پاشش تعریف می‌شود [۱۱]. شکل ۱۲ روند تغییرات زاویۀ پاشش کروسین مایع و ژل را در فشارهای تزریق مختلف را در یک نمونه انژکتور جریان پیچشی نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ مقدار زاویۀ پاشش برابر نیم زاویۀ نشان داده شده در شکل ۱۱ است.



شکل (۱۲): تغییرات زاویۀ پاشش با فشار تزریق برای کروسین مایع و ژل [۲۴].

با توجه به شکل ۱۲ زاویۀ پاشش کروسین مایع در مقایسه با کروسین ژل بزرگتر است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد افزودن عامل ژل‌کننده باعث افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل می‌شود و در یک پیشرانۀ هر چه ترکیب درصد عامل ژل‌کننده افزایش یابد ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ نیز افزایش می‌یابد. اما نکته قابل توجه در شکل ۱۲ این است که شیب تغییرات زاویۀ پاشش کروسین ژل بیشتر از کروسین مایع است. دلیل این امر رفتار نازک شونده برشی و کاهش ویسکوزیته کروسین ژل با افزایش فشار تزریق است که باعث می‌شود خواص رئولوژیکی کروسین ژل در فشارهای بالاتر به خواص رئولوژیکی کروسین مایع نزدیک شود و در فشارهای تزریق بالا به زاویۀ پاشش مایع بسیار نزدیک شود [۲۲، ۲۴]. جدول ۳ مقادیر زاویۀ پاشش به دست آمده از اتمیزاسیون مخلوط آب و گلیسیرین را که از نظر رفتار دینامیکی جز سیالات نازک شونده برشی بوده و رفتاری مشابه پیشرانۀ ژل دارد با بهره‌گیری از انژکتور پیچشی مماسی نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ویسکوزیته و زاویۀ پاشش کاملاً واضح است با افزایش ویسکوزیته زاویۀ پاشش کاهش پیدا می‌کند [۳۱]. علت کاهش زاویۀ پاشش با افزایش ویسکوزیته به نحوه خروج سیال از انژکتور جریان پیچشی ارتباط دارد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، سیال هنگام خروج از اوریفیس انژکتور

## (علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

## ۲-۴- تأثیر خواص پیشرانۀ ژل بر قطر قطرات در انژکتور جریان پیچشی

هدف از امتیازسیون ترکیبات پیشرانه در محفظه احتراق، تبدیل آن‌ها به قطرات بسیار ریز برای افزایش سطح تبخیر و سپس ترکیب سوخت و اکسید در حالت بخار است. در فرآیند امتیازسیون باید تلاش نمود که قطر قطرات به حداقل مقدار کاهش یابد، چون هر چقدر اندازه ذرات کوچک‌تر باشد، سرعت تبخیر آنها افزایش یافته و موجب کاهش زمان احتراق سوخت در محفظه می‌شود [۱۳، ۲۶].

قطر متوسط قطره یا ساتر (اس-ام-دی) به عنوان یکی از پارامترهای پرکاربرد در تعیین قطر ذرات پاشش شده است که به صورت نسبت حجم ذرات پاشش شده به مساحت سطح آن‌ها تعریف می‌شود. اس-ام-دی را می‌توان با روش‌هایی مانند پراکندگی می<sup>۲</sup>، دستگاه پی دی ای<sup>۳</sup>، هولوگرافی لیزری<sup>۴</sup> و پردازش تصاویر اسپری اندازه‌گیری کرد. البته معادله‌های تئوری و تجربی نیز به منظور تخمین و پیش‌بینی اس-ام-دی ارائه شده است [۱۱].

شکل ۱۴ روند امتیازسیون آب و سیمولنت‌های ژل تهیه شده با آب و عامل ژل‌کننده کربوپیل با ۰/۱۵ و ۰/۳۵ درصد وزنی از ژلنت را در فشارهای تزریق مختلف با انژکتور جریان پیچشی نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد با افزایش درصد عامل ژل‌کننده، ویسکوزیته اولیه سیمولنت ژل افزایش می‌یابد. تصاویر گرفته شده از این فرآیند امتیازسیون، نشان از افزایش اندازه قطر قطرات تولید شده با افزایش ویسکوزیته اولیه سیمولنت ژل دارد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است اسپری تولید شده در امتیازسیون آب از نظر یکنواختی بهتر و قطر قطرات تولید شده در امتیازسیون آب کوچک‌تر از اندازه قطر قطرات سیمولنت ژل است [۳۵].

برای درک بهتر تأثیر درصد عامل‌کننده و افزایش ویسکوزیته اولیه در فرآیند امتیازسیون، حالت‌های مختلفی از روند فرآیند امتیازسیون با توجه به مقدار افت فشار دو سر انژکتور جریان پیچشی معرفی می‌شود. با توجه به شکل ۱۵ این حالت‌ها به این صورت نام‌گذاری می‌شوند، حالت قطره چکانی<sup>۵</sup>، حالت مدادی بهم ریخته<sup>۶</sup>، حالت پیازی<sup>۷</sup>، حالت لاله‌گون<sup>۸</sup> و حالت امتیازسیون توسعه یافته<sup>۹</sup> در حالت کلی، به ترتیب با افزایش افت فشار در دو سر

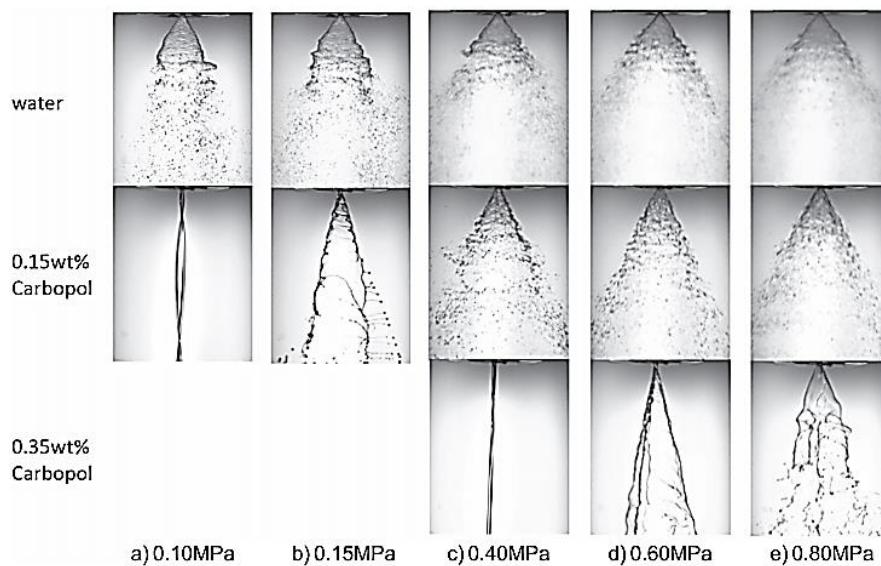
1. Sauter Mean Diameter (SMD)
2. Mie Scattering
3. Phase Doppler Anemometry (PDA)
4. Laser Holography
5. Dribble
6. Distorted Pencil
7. Onion
8. Tulip
9. Fully Developed Spray

انژکتور جریان پیچشی از فشارهای کم تا فشارهای زیاد این حالات قابل مشاهده است [۲۶]. با مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ این نکته قابل استنباط است که حالت امتیازسیون توسعه یافته برای سیال آب در اختلاف فشارهای پایین رخ می‌دهد در حالی که در همان اختلاف فشار سیمولنت ژل به مرحله امتیازسیون توسعه یافته نرسیده است.

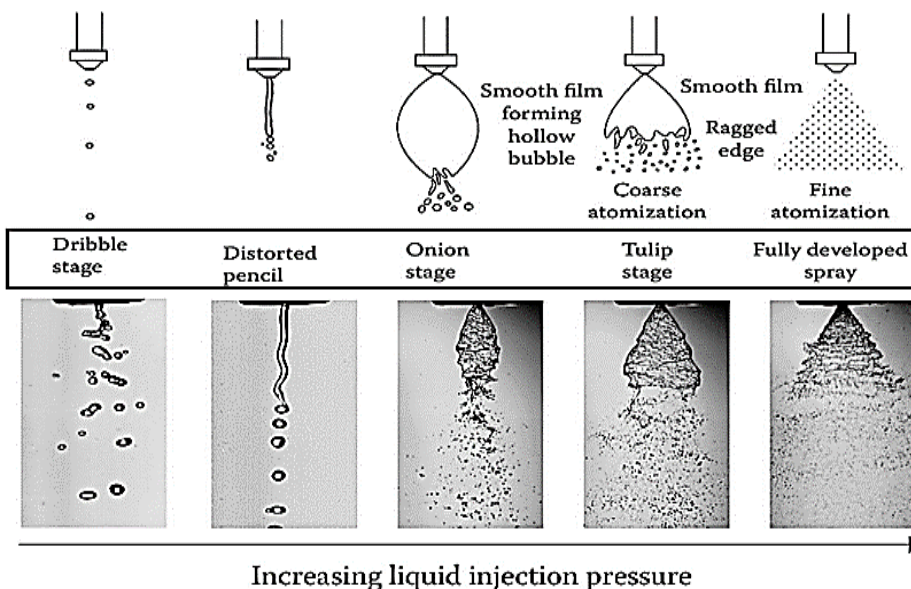
شکل ۱۶ نشان می‌دهد که اندازه اس-ام-دی قطرات تولید شده از امتیازسیون آب و سیمولنت ژل کربوپیل ۰/۱۵ درصد در فاصله‌های مختلف (به سمت پایین دست جریان) از محور انژکتور (Z)، با وجود فشار تزریق دو برابر سیمولنت ژل نسبت به فشار تزریق آب، اندازه اس-ام-دی تولید شده در امتیازسیون آب کوچک‌تر از اس-ام-دی سیمولنت ژل است. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ویسکوزیته اولیه سیمولنت ژل، اس-ام-دی قطرات تولیدی بزرگ‌تر می‌شوند [۳۵].

در جدول ۴ اس-ام-دی قطرات حاصل از اسپری آب و سیمولنت ژل حاوی ۰/۱۵ درصد وزنی کربوپیل آورده شده است. با توجه به این جدول محدوده اس-ام-دی قطرات تولید شده برای سیال آب با اینکه فشار تزریق سیمولنت ژل دو برابر آب است، کوچکتر از سیمولنت ژل است. همچنین، داده‌های این جدول نشان می‌دهد برای تولید اس-ام-دی قطرات یکسان از آب و سیمولنت ژل، فشار تزریق سیمولنت ژل به علت بیشتر بودن ویسکوزیته اولیه آن باید بیشتر از دو برابر فشار تزریق آب باشد تا بتواند قطراتی در اندازه قطرات آب ایجاد شود.

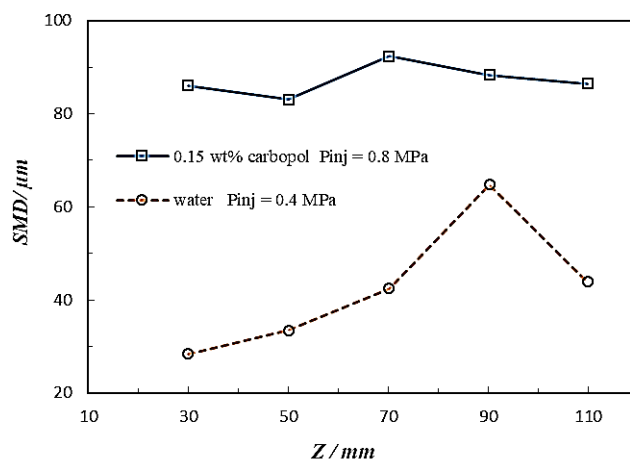
با توجه به نکات ذکر شده مشخص است که با افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل اندازه قطرات ایجاد شده در امتیازسیون آن بزرگ‌تر خواهد بود. علت این افزایش را می‌توان در روند شکل‌گیری قطره از ورق مایع خروجی انژکتور جریان پیچشی جستجو کرد. با افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل ضخامت لایه چسبیده به دیواره نازل انژکتور به علت مقاومت در برابر چرخش سیال و کاهش نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه چسبیده به دیواره، ضخامت صفحات خروجی از انژکتور نیز بیشتر می‌شود. قطر لیگامنت‌ها تابع ضخامت ورق مایع خروجی از انژکتور است و از طرف دیگر قطر اولین قطرات تشکیل شده در مرحله امتیازسیون ثانویه ارتباط مستقیم با قطر لیگامنت دارد. بنابراین، در ابتدای مرحله امتیازسیون ثانویه پیشرانۀ ژل به علت افزایش ضخامت ورق مایع قطرات درشت‌تری ایجاد می‌شود که برای شکست این قطرات به قطرات کوچک‌تر باید نیروی بیشتری به قطره وارد شود [۱۳، ۲۵].



شکل (۱۴): مقایسه اسپری و اندازه قطر قطرات ایجاد شده از اتمیزاسیون آب و سیمولنت ژل کربوپل با درصدهای مختلف از عامل ژل کننده [۳۵].



شکل (۱۵): تأثیر فشار تزریق سیال بر الگوی اتمیزاسیون در انژکتور جریان پیچشی [۲۶].



شکل (۱۶): مقایسه اس-ام-دی قطرات تولیدی در اتمیزاسیون آب و سیمولنت ژل حاوی ۰/۱۵ درصد وزنی کربوپل [۳۵].

## (علمی-ترویجی)

علی صابری مقدم، فرهاد منصوری زاده و اسماعیل ولی زاده

## ۳- نتیجه گیری

خواص رئولوژیکی پیشرانۀ ژل در فرایند اتمیزاسیون و پایداری احتراق نقش بسیار مهمی دارد. بنابراین در این مقاله، به تأثیر افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل نسبت به پیشرانۀ مایع مادر بر فاکتورهای مهم ارزیابی کیفیت اتمیزاسیون انژکتور جریان پیچشی مماسی یعنی ضریب تخلیه، طول شکست صفحات مایع، زاویۀ پاشش و قطر قطرات پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان دادند، با افزایش ویسکوزیته اولیه پیشرانۀ ژل نسبت به پیشرانۀ مادر در انژکتورهای پیچشی مماسی، ضریب تخلیه انژکتور، طول شکست صفحات مایع و اس-ام-دی قطرات تولیدی به علت افزایش نیروهای بین مولکولی و مقاومت در برابر فروپاشی افزایش می‌یابد. زاویۀ پاشش انژکتور به علت کاهش سرعت چرخشی در اوریفیس خروجی کاهش می‌یابد. همچنین، براساس اولویت بندی انجام شده، اندازه قطر قطرات نسبت به دیگر پارامترها تأثیر بیشتری روی عملکرد سیستم پیشرانۀ ژل دارد. بررسی‌ها نشان دادند برای بهبود کیفیت پاشش پیشرانۀ‌های ژل توسط انژکتور جریان پیچشی، با توجه به رفتار نازک شونده برشی پیشرانۀ‌های ژل لازم است انژکتور جریان پیچشی از نظر هندسی به گونه‌ای طراحی شود که نیروی گریز از مرکز و نرخ برش بیشتری به سیال اعمال کند و یا به علت رفتار تیکسوتروپیک پیشرانۀ‌های ژل زمان ماند پیشرانۀ در انژکتور بیشتر از پیشرانۀ مایع مادر باشد تا بر نیروهای بین مولکولی (نیروهای ویسکوز) پیشرانۀ ژل غلبه کند تا قطره‌سازی پیشرانۀ راحت‌تر انجام شود.

جدول (۴): اس-ام-دی قطرات حاصل از اسپری آب و سیمولنت ژل [۳۵].

SMD	فشار تزریق	نوع سیال
	MPa	
$\mu\text{m}$	۰/۴	آب
۶۰-۳۰	۰/۸	سیمولنت ژل (کربویل ۰/۱۵ درصد وزنی)

فرآیند اتمیزاسیون به هر چهار عامل ضریب تخلیه و دبی جرمی، طول شکست، زاویۀ پاشش و قطر قطرات بستگی دارد. به عبارت دیگر، چهار عامل بررسی شده به یکدیگر وابسته می‌باشند. اما براساس میزان تأثیرگذاری در عملکرد سیستم پیشرانۀ ژل می‌توان گفت قطر قطرات پیشرانۀ ژل به علت تأثیرگذاری در اختلاط و احتراق پیشرانۀ از اهمیت بیشتری برخوردار است. سایر پارامترهای گفته شده را می‌توان با توجه به میزان اثرگذاری در اندازه قطرات به صورت جدول ۵ اولویت بندی کرد.

جدول (۵): اولویت بندی پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد سیستم پیشرانۀ ژل.

اولویت اثرگذاری پارامتر روی عملکرد سیستم پیشرانۀ ژل	پارامتر
۴	ضریب تخلیه و دبی جرمی
۲	طول شکست
۳	زاویۀ پاشش
۱	قطر قطرات

## ۸- مراجع

- [1] National Research Council, Board on Army Science, Strategic Technologies for the Army of the Twenty-First Century, National Academies, 1993.
- [2] [2] Yang, L., Fu, Q., Qu, Y., Zhang, W., Du, M., and Xu, B., "Spray Characteristics of Gelled Propellants in Swirl Injectors", *Fuel*, Vol. 97, No.1, pp. 253-261, 2012.
- [3] [3] Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 8rd Ed, John Wiley & Sons, 2016.
- [4] Mozafari, M., Saberi Moghadam, A., Sheikhi Narani, M., and Adelinasab, M. "Gelled Propellant and Its Behavior in a Propulsion System", *Research and Development of Energetic Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 55-62, 2011 (In Persian).
- [5] Ghobadi, N., Saberi Moghadam, A., Sheikhi Narani, M., and Shafiqzade, H. "Preparation of UDMH Gel Fuel Containing Aluminum Nano Particles and Study of its Rheological Properties", *Energetic Materials*, Vol. 6, No.3, pp. 55-62, 2011 (In Persian).
- [6] Glassman, I. and Sawyer, R.F., *The Performance of Chemical Propellants*, Technivision Services, England, 1970.
- [7] Hodge, K., Crofoot, T., and Nelson, S., "Gelled Propellants for Tactical Missile Applications", *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, USA, 1999.
- [8] Hajilari, N. and Saberi Moghadam, A., "Gelled Propellant", *Research and Development of Energetic Materials*, Vol. 4, No. 1, pp. 14-23, 2008 (In Persian).
- [9] Rezaee, M. and Saberi Moghadam, "Theoretical and Experimental Study of Transfer Phenomena in the Combustion Chamber of the Gel Propulsion System", *Ph.D. Dissertaion*, School of Chemistry and Chemical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, 2019 (In Persian).
- [10] Mozafari, M., Saberi Moghadam, A., Sheikhi Narani, M., and Adelinasab, M. "Gelled Propellant and Its Behavior in a Propulsion System", *Energetic Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 55-62, 2011 (In Persian).
- [11] Kang, Z., Wang, Z.-g., Li, Q., and Cheng, P., "Review on Pressure Swirl Injector in Liquid Rocket Engine", *Acta Astronautica*, Vol. 145, pp. 174-198, 2018.
- [12] Yoon, C., Heister, S., Xia, G., and Merkle, C., "Simulation of Injection of Shear-Thinning Gel Propellants Through Plain-orifice Atomizer", *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Nashville, USA, 2010.
- [13] Ashgriz, N., *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications*, Springer Science & Business Media, New York, USA, 2011.
- [14] Ommi, F., *Engine and Space Propulsion*, Besat, Tehran, Iran, 2011 (In Persian).
- [15] Amini, G., "Liquid Flow in a Simplex Swirl Nozzle", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 79, No. 1, pp. 225-235, 2016.
- [16] Hosseinalipour, S.M., Karimaei, H., and Ommi, F., "Experimental Analysis of the Spray Characteristics of a Swirl Injector", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 75-69, 2017 (In Persian).
- [17] Hosseinalipour, S.M., Ghorbani, R., and Karimaei, H., "Effect of Liquid Sheet and Gas Streams Characteristics on the Instability of a Hollow Cone Spray Using an Improved Linear Instability Analysis", *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 24-33, 2016.
- [18] Madlener, K. and Ciezki, H., "Some Aspects of Rheological and Flow Characteristics of Gel Fuels with Regard to Propulsion Application", *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE*, Denver, Colorado, USA, 2009.
- [19] Jyoti, B.V. and Baek, S.W., "Rheological Characterization of Ethanolamine Gel Propellants", *Journal of Energetic Materials*, Vol. 34, No. 3, pp. 260-278, 2016.
- [20] Yang, L., Fu, Q., Zhang, W., Du, M., and Tong, M., "Atomization of Gelled Propellants from Swirl Injectors with Leaf Spring in Swirl Chamber", *Fuel*, Vol. 21, No. 11, pp. 185-197, 2011.
- [21] White, F.M. and Corfield, I., *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill, New York, USA, 2006.
- [22] Jyoti, B.V. and Baek, S.W., "Rheological Characterization of Metalized and NonMetalized Ethanol Gel Propellants", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 39, pp. 866-873, 2014.
- [23] Fischer, G.A.A., Andrade, J.C.D. and Costa, F.D.S., "Spray Cone Angles by A Pressure Swirl Injector for Atomization of Gelled Ethanol", *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Brazil, 2017.
- [24] Kim, H., Ko, T., Kim, S., and Yoon, W., "Spray Characteristics of Aluminized-Gel Fuels Sprayed Using Pressure-Swirl Atomizer", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 249, pp. 36-47, 2017.
- [25] Wimmer, E. and G. Brenn, "Viscous Flow Through the Swirl Chamber of a Pressure-swirl Atomizer", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 53, pp. 100-113, 2013.
- [26] Lefebvre, A.H. and McDonell, V.G., *Atomization and Sprays*, CRC Press, Florida, USA, 2017.
- [27] Lee, I. and Koo, J. "Break-up Characteristics of Gelled Propellant Simulants with Various Gelling Agent Contents", *Journal of Thermal Science*, Vol. 19, No. 6, pp. 545-552, 2010.
- [28] Londerville, S. and Baukal Jr, C.E., *The Coen & Hamworthy Combustion Handbook: Fundamentals for Power, Marine & Industrial Applications*, CRC Press, Florida, USA, 2013.
- [29] Mehrabi, A. and Ommi, F., "Satellite Adaptive Attitude Control Based on Decentralized Minimal Control in the Presence of Reaction Wheel Accurate Model", *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 59-72, 2016 (In Persian).
- [30] Guan, H.-S., Li, G.-X., and Zhang, N.-Y., "Experimental Investigation of Atomization Characteristics of Swirling Spray by ADN Gelled Propellant", *Acta Astronautica*, Vol. 144, pp. 119-125, 2018.
- [31] Yao, S., Zhang, J., and Fang, T., "Effect of Viscosities on Structure and Instability of Sprays from a Swirl Atomizer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 39, pp. 158-166, 2012.
- [32] Tokita, M. and Nishinari, K., "Gels: Structures, Properties, and Functions", *Surface and Colloid Scienc*, Vol. 129, pp. 95-104, 2004.

- [33] Streeter, V.L., Wylie, E.B., and Bedford, K.W., *Fluid Mechanics*, WCB, McGraw-Hill, New York, USA, 1998.
- [34] Raju, V. and Rao, S.S., "Effect of Fuel Injection Pressure and Spray Cone Angle in DI Diesel Engine using Convergetm CFD Code", *Procedia Engineering*, Vol. 127, pp. 295-300, 2015.
- [35] Bai, F., Chang, Q., Chen, S., Guo, J., Jiao, K., and Du, Q., "Experimental Investigation on the Spray Characteristics of Power-law Fluid in a Swirl Injector", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 49, p. 035508, 2017.