

پیشرانۀ ژل و رفتار آن در یک سیستم پیشرانیش

مهدی مظفری نوشری^۱، علی صابری مقدم^{۲*}، مجید شیخی نارانی^۳، مهدی عادلای نسب^۴

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail: mozaffari.7@gmail.com

(تاریخ وصول: ۹۰/۴/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۹)

چکیده

پیشرانۀهای ژلی مزایای قابل توجهی نسبت به پیشرانۀهای مایع دارند. برای ایجاد نیروی پیشران در محفظه تراست ابتدا پیشرانۀ در داخل محفظه تراست به قطرات بسیار ریزی تبدیل شده و سپس محترق می‌شود. خصوصیات متمایز شدن و احتراق پیشرانۀها به خواص رئولوژیکی آنها وابسته است. در این تحقیق ضمن معرفی خواص رئولوژیکی پیشرانۀ مایع و ژل، الگوی متمایز شدن و فرآیند احتراق آنها بررسی و مقایسه شده است. پیشرانۀهای ژلی، سیالهای نازک شونده برشی هستند که ویسکوزیته آنها با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. بنابراین انژکتورهایی برای متمایز کردن این پیشرانۀها مناسب هستند که بتوانند نرخ برش بالایی ایجاد کنند. هر چه قطر قطرات متمایز شده کوچک تر باشد سرعت تبخیر و احتراق آنها بیشتر شده و در طول کوتاه‌تری از محفظه تراست فرآیند احتراق کامل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پیشرانۀ ژل، ژل کننده، رئولوژی، متمایز شدن، احتراق.

۱- مقدمه

توانایی‌های عملیاتی، شبیه پیشرانۀهای مایع هستند با این تفاوت که چگالی بالاتری داشته و توانایی ذخیره شدن برای مدت زمان طولانی را دارا هستند و بنابراین برای کاربرد در سیستم‌های حجم محدود بسیار مناسبند [۲ و ۳]. سطح ژل در تماس با گازهای محیط سخت شده [۱] و بنابراین سرعت نشت آن کمتر می‌گردد. فراریت ژل‌ها نسبت به مایعات کمتر است و در موارد نشتی تبخیر کمی صورت

ژل‌ها مایعاتی هستند که خصوصیات رئولوژیکی آنها با اضافه شدن عامل ژل کننده اصلاح شده و در نتیجه همانند یک جامد رفتار می‌کنند. پیشرانۀهای ژل به هنگام انبار شدن همانند جامد ویسکو الاستیک رفتار می‌کنند و به هنگام فرآیند تغذیه همانند یک مایع، متمایز می‌شوند و می‌سوزند [۱]. پیشرانۀهای ژل از لحاظ کارایی و

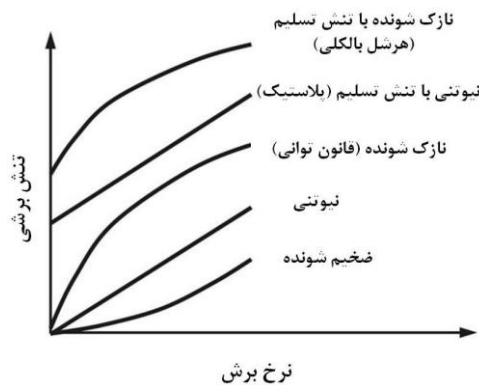
۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی

۲- دانشیار

۳- دانشیار

۴- کارشناس ارشد مهندسی شیمی

برای سیال‌های نیوتنی، خطی و برای سیال‌های غیر نیوتنی، غیر خطی است. دسته‌ای از سیال‌های غیر نیوتنی، سیال‌های نازک شونده‌ی برشی هستند که در آن‌ها با افزایش نرخ برش ویسکوزیته کاهش می‌یابد. سیال‌های غیر نیوتنی از لحاظ وابستگی به زمان به دو دسته سیال‌های تیکسوتروپیک (سیال‌هایی که در تنش برشی ثابت، ویسکوزیته آن‌ها به تدریج کاهش می‌یابد) و رئوپکتیک (سیال‌هایی که در تنش برشی ثابت، ویسکوزیته آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد) تقسیم می‌شوند [۹].



شکل ۱- منحنی تنش بر حسب نرخ برش برای سیال‌های مختلف [۹].

قانون توانی، رابطه بین تنش برشی و نرخ برش را به صورت رابطه (۱) بیان می‌کند [۹]. به سیال‌هایی که رفتار آن‌ها به وسیله قانون توانی به خوبی مدل می‌شود، سیال‌های توانی گفته می‌شود. در رابطه (۱) اگر $n < 1$ باشد، سیال نازک شونده و اگر $n > 1$ باشد، سیال ضخیم شونده است. بدین ترتیب برای سیال‌های نازک شونده، n بین صفر و یک است، که هر چه n کمتر باشد درجه نازک شوندگی بیشتر است.

$$\tau = \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا n ویسکوزیته بر حسب (لج)، τ اندیس سازگاری بر حسب (لج)، n اندیس توانی (بی بعد) و $\dot{\gamma}$ نرخ برش بر حسب (s^{-1}) است.

سوخ‌هیدرازین (بشج) و مونو متیل هیدرازین (ثچچ) که با پلی ساکارید زل شده باشند، تنش تسلیم کمی دارند و دارای خواص نازک شونده و شبه پلاستیک هستند، بنابراین مدل قانون توانی به خوبی می‌تواند خواص رئولوژیکی آن‌ها را توصیف کند. اکسید کننده‌ی نیتریک اسید دود کننده‌ی قرمز محافظت شده

گرفته و خطر سمیت کاهش می‌یابد. ساختار جامد مانند زل‌ها امکان تعلیق ذرات جامد در آن‌ها را فراهم می‌کند که در نتیجه، ایمپالس ویژه و چگالی انرژی سوخت افزایش می‌یابد [۴]. جهت رانش زل، فشار بالادستی مورد نیاز، برای دستیابی به دبی جرمی معین، بیشتر از حالت مایع است. اتمایز شدن زل‌ها نسبت به مایعات سخت‌تر است و قطرات زلی در سرعت سوزش پایین‌تری نسبت به قطرات مایع می‌سوزند [۵ و ۴]. حضور عامل زل کننده در پیشرانه زل باقی‌مانده احتراق را افزایش داده [۶ و ۷] و کارایی را به اندازه‌ی دو تا پنج درصد کاهش می‌دهد [۸]. پیشرانه در محفظه‌ی تراست محترق شده و نیروی پیشران تولید می‌کند. برای آنکه فرآیند احتراق به صورت کامل انجام شود و راندمان احتراق محفظه تراست بالا باشد باید پیشرانه به قطرات بسیار ریز تبدیل شود. خواص رئولوژیکی سیال، تأثیر بسزایی در الگوی اتمایز شدن پیشرانه دارد و به عبارت بهتر، رئولوژی اساس اتمایز شدن و احتراق پیشرانه‌های زلی است [۲].

۲- بحث و بررسی

با توجه به نکاتی که ذکر گردید، در زیر پارامترهای موثر بر رانش، اتمایز یکن و احتراق پیشرانه‌های زل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

الف- رئولوژی پیشرانه‌های زل

رئولوژی عبارتست از ویژگی‌های رفتاری یک سیال برای جریان یافتن بر حسب تنش، کرنش و زمان. در ارتباط با سیال‌های ویسکوز، مطالعه‌ی رئولوژیکی آن‌ها به منظور کسب اطلاع از نوع رفتار آن‌ها در حالت سکون و نیز در جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجایی که پیشرانه‌های زل موادی ویسکوز هستند لذا مطالعه‌ی رئولوژی آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است [۲].

یک خاصیت رئولوژیکی اساسی سیال، ویسکوزیته (μ) است. بر اساس نوع وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش ($\dot{\gamma}$)، سیال‌ها به دو دسته نیوتونی و غیر نیوتونی تقسیم می‌شوند. شکل (۱) منحنی تنش در برابر نرخ برش را برای انواع مختلف سیال‌ها نشان می‌دهد. ویسکوزیته در سیال‌های نیوتونی مستقل از نرخ برش بوده و در دما و فشار معین، ثابت است. در سیال‌های غیر نیوتونی ویسکوزیته ثابت نبوده و با تغییر $\dot{\gamma}$ تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۱، نمودار تنش بر حسب نرخ برش

داریسی^۲ در جریان آرام برای سیال‌های نیوتونی با مقدار متناظر آن برای سیال‌های غیر نیوتونی برابر باشد. اعداد بی‌بعد که با این فرض محاسبه شدند دارای اندیس β به معنی عمومی^۴ هستند. بیان عدد رینولدز برای سیال‌های توانی هنگامی که سیال در داخل لوله‌ای با سطح مقطع ثابت جریان یابد به صورت زیر است [۹، ۱۴].

$$\text{د ع غ} = \frac{\rho \beta^{2-\beta}}{8^{2-\beta} \left(\frac{\beta+1}{\beta} \right)^{\beta}} \quad (۳)$$

که در آن، د ع غ عدد رینولدز سیال‌های توانی، ρ چگالی سیال بر حسب $(\text{گ/م}^۳)$ ، β قطر لوله بر حسب (م) ، β اندیس سازگاری قانون توانی بر حسب (کعخ) و β اندیس توانی قانون توانی می‌باشند.

ب- اتمایز شدن پیشرانه ژل

در فرآیند اتمی شدن، پیشرانه به قطرات کوچک تبدیل شده و سطح تماس و واکنش پذیری آن افزایش می‌یابد. فرآیند اتمایز شدن در محفظه تراست توسط انژکتور انجام می‌شود و انژکتورهای متنوعی برای این کار طراحی شده‌اند. ویسکوزیته پیشرانه از مهم‌ترین پارامترها در این فرآیند می‌باشد. مشاهدات نشان داده که اندازه‌ی قطرات اسپری در یک سیال با ویسکوزیته بیشتر، بزرگ‌تر از سیالی با ویسکوزیته پایین‌تر است [۱۵]. پیشرانه‌های ژل، سیال‌های نازک شونده برشی هستند که هر چند در حالت سکون ویسکوزیته بالایی دارند ولی با جریان یافتن و اعمال نرخ برش به آن‌ها دچار کاهش ویسکوزیته می‌شوند. بنابراین برای اتمی کردن پیشرانه‌های ژلی باید انژکتورهایی به کار برده شوند که بدون ایجاد نقطه سکون، نرخ برش بالایی ایجاد کنند. در انژکتورهای برخوردی^۵، در قسمت مخروطی نوک انژکتور و همچنین در نقطه‌ی برخورد جت‌ها، نرخ برش بالایی تولید می‌شود که می‌تواند سبب کاهش ویسکوزیته پیشرانه ژل حتی تا حد ویسکوزیته مایع شود. بنابراین برای اتمایز کردن سوخت‌های ژلی معمولاً از انژکتورهای برخوردی استفاده می‌شود [۱۵].

(β ح ت د) و هیدروژن پر اکسید β که به وسیله‌ی سیلیکا، ژل شده باشند سیال‌هایی تیکسوتروپیک اند که تنش تسلیم بزرگی دارند. مقدار تنش تسلیم محاسبه شده برای سوخت‌های ژلی هیدرازین در حدود β ۲۰ و برای اکسیدکننده‌های β ح ت د و β در حدود ۵۰۰ تا β ۱۰۰۰ است [۱۰]. در ژلهایی که حاوی ذرات فلزی هستند، مقدار تنش تسلیم بزرگ‌تر است.

برای پیشرانه‌های ژلی، رابطه قانون توانی در نرخ‌های برشی متوسط برقرار است. در نرخ‌های برشی پایین و بالا این قانون نمی‌تواند رفتار پیشرانه‌های ژل را به خوبی توصیف کند [۱۱]. ژل‌ها، سیال‌هایی نازک شونده و تیکسوتروپیک هستند [۱]. بنابراین ویسکوزیته آن‌ها با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. در برخی گزارشات، نشان داده شده که در صورت جریان یافتن سیال توانی در داخل لوله‌ای با سطح مقطع به تدریج کم شونده، ویسکوزیته در اثر افزایش نرخ برش، به سرعت کاهش می‌یابد [۱۲]. خصوصیات رئولوژیکی ژل‌ها با دما تغییر می‌کند و در حالت کلی ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می‌یابد. در گزارش دیگری نشان داده شده که در مورد ژل β چ پ ز در دماهای بین ۵ تا β ۳۰، اندیس توانی در رابطه قانون توانی از ۰/۶۵۵ تا ۰/۸۹۷ افزایش می‌یابد و اندیس سازگاری β (ج) از ۲۲/۷ تا β ۳ کاهش می‌یابد [۱۳]. در واترژل‌ها هر دو مقدار β و β با افزایش دما کاهش می‌یابند [۲]. برای سیال‌های نیوتونی هنگامی که جریان در داخل لوله کاملاً توسعه یافته باشد رابطه‌ی رینولدز به صورت زیر است [۹]:

$$\text{د ع غ} = \frac{\rho \beta n}{\beta} \quad (۲)$$

که در آن، ρ چگالی بر حسب $(\text{گ/م}^۳)$ ، n سرعت متوسط در داخل لوله بر حسب (لک) ، β قطر لوله بر حسب (م) و β ویسکوزیته دینامیکی سیال بر حسب (کعخ) است. چون ویسکوزیته سیال‌های غیر نیوتونی به نرخ برش وابسته است لذا رابطه فوق نمی‌تواند برای سیال‌های غیر نیوتونی به کار رود. متزنر و رید^۲ برای بیان اعداد بی‌بعد در سیال‌های غیر نیوتونی فرض کردند که مقدار فاکتور اصطکاک

گم ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د
گم ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د
گم ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د

کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د
کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د
کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د ع غ کعخ ح ت د

اثر اغتشاش نیز در انژکتور توسط این محققین بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش اغتشاش در مسیر جریان سوخت، پچد کاهش می‌یابد [۱۸]. اسپری انژکتور برخوردی دوتایی با برخورد اجزای همنام، در رینولدزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش رینولدز، اسپری سیال‌های غیر نیوتنی بهتر می‌شود [۱۹] و با افزایش عدد رینولدز تا یک حد معین، اسپری سیال‌های غیر نیوتنی از الگوی اسپری سیال‌های نیوتنی تبعیت می‌کند. این حد معین از عدد رینولدز، رینولدز انتقال نام گرفته و رابطه‌ی آن، به صورت زیر ارائه شده است [۲۰].

$$\rho \frac{1}{1-\epsilon} \left(0.75 + \frac{0.25}{\epsilon} \right)^{\frac{5}{1-\epsilon}} \epsilon^2 = \frac{8\eta_{\infty}^{(2-\epsilon)/(1-\epsilon)}}{\eta_{\infty}^{(2-\epsilon)/(1-\epsilon)}} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا ϵ اندیس رفتار جریان در رابطه‌ی توانی، η_{∞} اندیس سازگاری در رابطه‌ی توانی، ϵ قطر اریفیس، ρ چگالی سیال جاری در اریفیس و η_{∞} ویسکوزیته‌ی سیال در نرخ برش بی‌نهایت می‌باشند. اثر ذرات آلومینیوم بر روی خصوصیات اسپری نیز توسط کمپن و همکاران بررسی شد. در این تحقیق برای اتمایز شدن سوخت ژل جت‌های α از انژکتور برخوردی دوتایی استفاده شد [۲۱]. جت‌های سوخت و اکسید کننده در سرعت‌های مختلفی در انژکتور جریان یافتند و از مجموع تست‌های انجام شده، سه حالت برای الگوی اسپری مشاهده شد که عبارتند از (الف) الگوی شعاعی، (ب) الگوی پیوندی و (پ) الگوی کاملاً توسعه یافته (شکل ۲).

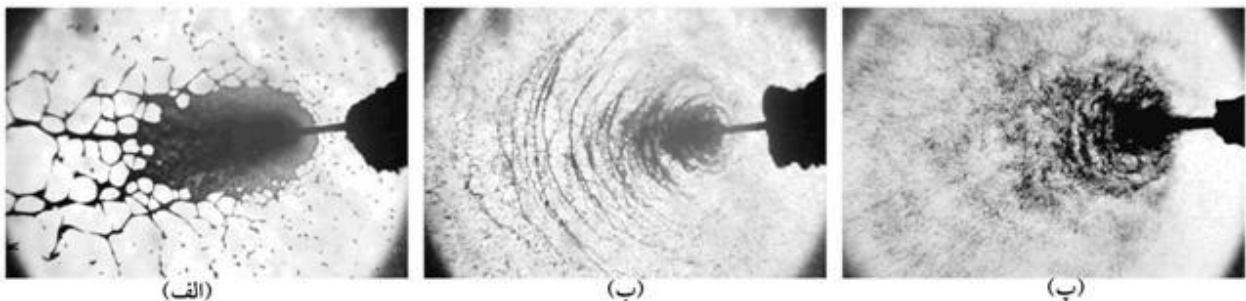
الگوی اتمایز شدن سیال‌های ژلی در انژکتور برخوردی و نیز انژکتور هم محور مقایسه شده و مشاهدات نشان داده که پاشش انژکتور برخوردی مناسب‌تر است [۱۶]. از طرف دیگر، مقایسه اسپری انژکتور برخوردی و انژکتور هم محور نشان داده که انژکتور برخوردی در نسبت سوخت به اکسید کننده کمتر، بهتر اتمایز می‌شود [۱۷]. در برخی گزارشات نیز به منظور سادگی در سیستم رانش، اتمایز شدن خوب و اخذ خصوصیات اختلاط مناسب، از انژکتورهای برخوردی برای اتمایز کردن پیشراشه‌های ژلی استفاده شده است [۱۱].

کارایی انژکتور توسط پارامتری به نام میانگین اندازه قطرات (پچد) ارزیابی می‌شود. این پارامتر توسط دستگاه مالورن مستر سایزر ایکس^۲ اندازه‌گیری می‌شود. هر چه این کمیت کوچک‌تر باشد بدان معنی است که انژکتور توانایی مناسب‌تری در اتمایز کردن سیال دارد. در گزارشی، برای انژکتور برخوردی سه تایی که در آن پیشراشه ژلی با وزش باد اتمایز شده^۳، رابطه‌ی پچد به صورت زیر به نسبت هوا به سوخت (دج) مرتبط شده است [۳].

$$\left(1 + \frac{1}{\text{دج}} \right)^{\epsilon} \quad (4)$$

در رابطه‌ی بالا، پارامتر ϵ اثر مقدار ژل کننده و هندسه‌ی انژکتور را وارد می‌کند. پس از انجام آزمایشات متعدد مشاهده شد که در این نوع انژکتورها، اندازه‌ی پچد با دبی جرمی گاز و دبی جرمی ژل و ویسکوزیته‌ی ژل به صورت زیر مربوط است [۳]:

$$\text{دج} = 0.92 \times \eta_{\infty}^{-0.34} \times \rho^{-0.8} \times \epsilon^{0.8} \quad (5)$$



شکل ۲- عکس‌های شادوگراف از الگوی اسپری حاصل از انژکتور [۲۱].

لاغ کعب کعب دلاغ مع د- ۱
سلاغ-لاغ مع د کلاغ مع د- ۲
ملاغ مع د- ۳

جوش رسیده و به سرعت تبخیر می‌شود. با سرعت یافتن تبخیر در قطره مایع فرآیند احتراق به طور کامل انجام می‌شود. در موتورهای سوخت مایع زمان تبخیر قطرات با مساحت سطح قطره (مربع قطر قطره) متناسب است [۲۵]. این بدان معنی است که هر چه قطره کوچک تر باشد زمان تبخیر قطرات کمتر است. این وابستگی، به قانون ۴ معروف است.

احتراق پیشبرانه‌های ژلی سه مرحله دارد [۱]. در مرحله اول حجم قطره ژلی با تبخیر مایع فرار در اطراف قطره کاهش می‌یابد. در مرحله دوم حجم قطره ثابت باقی می‌ماند و فشار داخلی قطره، به خاطر تبخیر مایع فرار داخل قطره، به سرعت افزایش می‌یابد. در مرحله سوم اسکلت (پوسته) اطراف قطره توانایی تحمل فشار داخل قطره را از دست داده و متمایز شدن ثانویه اتفاق می‌افتد. افزایش میزان متمایز شدن ثانویه موجب افزایش راندمان احتراق خواهد شد. افزایش مواد فرار یا سورفاکتانت‌ها در ساختار پیشبرانه، میزان متمایز شدن ثانویه را افزایش می‌دهد. احتراق پیشبرانه‌های ژل فلزی همانند احتراق پیشبرانه‌های ژل غیر فلزی است با این تفاوت که در پیشبرانه‌های فلزی تأخیر در احتراق ذرات فلزی سبب تأخیر سوختن نسبت به پیشبرانه‌های غیر فلزی می‌شود. افزایش فشار محفظه، کاهش مقدار ژل کننده در پیشبرانه و افزایش جزء جرمی اکسیژن محیط نیز سبب کاهش زمان سوختن خواهد شد و در احتراق کنترل شده‌ی نفوذی، قانون ۴ برقرار خواهد بود [۴].

احتراق سوخت ژل **۸خ** با ژل کننده آلی نشان داد که در هر دو نوع سوخت ژلی با ژل کننده آلی حاوی ذرات فلزی و ژل بدون ذرات فلزی به هنگام احتراق در اطراف قطره، یک لایه الاستیک تشکیل می‌شود که از تبخیر سوخت جلوگیری می‌کند [۲۶]. تبخیر سوخت سبب متورم شدن قطره گشته و در نهایت لایه‌ی الاستیک نازک شده و تخریب می‌شود و بخار سوخت به بیرون از قطره فرار می‌کند. این فرآیند به صورت مرحله‌ای تکرار می‌شود تا تمام ماده‌ی قابل احتراق سوخت مصرف شود. این لایه‌ی الاستیکی اطراف قطره عمدتاً از ژل کننده تشکیل شده است. در گزارش دیگری مشخص شده که لایه‌ی الاستیک در اطراف قطره به خاطر اختلاف در دمای جوش و ویسکوزیته‌ی اجزای تشکیل دهنده‌ی قطره‌ی ژل تشکیل می‌شود [۲۷] و آزمایشات نشان داد که حلالیت نسبی اجزاء روی مکانیزم تشکیل لایه تأثیر می‌گذارد.

رینولدز بحرانی با توجه به وابستگی ویسکوزیته سیال‌های غیر نیوتنی به نرخ برش، به اندیس رفتار جریان رابطه‌ی توانی بستگی دارد. در این تحقیق، مشاهده شد که اگر رینولدز جریان ژل از رینولدز بحرانی بزرگ‌تر باشد الگوی اسپری حاصل پیوندی خواهد بود. در رینولدزهای خیلی بزرگ‌تر از رینولدز بحرانی، الگوی اسپری به حالت کاملاً توسعه یافته نزدیک‌تر می‌شود. عدد رینولدز بحرانی استفاده شده در محاسبات به صورت زیر است [۲۱].

$$Re_{crit} = 885 \frac{8n}{(1 + 3n)^n} (2 + n)^{\frac{2+n}{1+n}} \quad (7)$$

که در رابطه بالا n اندیس رفتار جریان در رابطه‌ی توانی است. در تحقیق دیگری مشخص شد که فاصله‌ی برخورد از صفحه‌ی انژکتور دارای کم‌ترین تأثیر در متمایز شدن می‌باشد و در انژکتور برخوردی دوتایی افزایش زاویه‌ی برخورد تا ۷۰ درجه سبب کاهش اندازه قطرات اسپری می‌شود [۲۲]. انژکتورهای میله‌ای نوعی انژکتورهای هم مرکز هستند که در اواسط دهه‌ی ۱۹۵۰ ابداع شد و اخیراً به طور گسترده‌ای در موتورهای راکت به کار گرفته شده است. تاکنون هیچ گونه ناپایداری احتراقی به هنگام استفاده از این انژکتورها دیده نشده است [۲۳]. این نوع انژکتورها با توجه به قابلیت تغییر تراست، متوقف کردن جریان خوراک و همچنین متمایز کردن خوب گزینه مناسبی برای کاربرد در سیستم‌های با پیشبرانه‌های ژلی هستند. در سال ۱۹۹۹ تست گرم موشک تاو انجام شد که سوخت آن منو متیل هیدرازین ژلی (**۳چ**) و اکسید کننده‌ی آن نیتریک اسید دود کننده‌ی قرمز محافظت شده (**۳د**) ژلی بود. انژکتور به کار رفته در این موتور از نوع میله‌ای ژلی بود [۲۴].

ج- احتراق پیشبرانه ژل

پس از متمایز شدن پیشبرانه در داخل محفظه تراست، فرآیند احتراق انجام می‌شود. برای احتراق، در ابتدا پیشبرانه به فاز بخار تبدیل شده و سپس فرآیند احتراق در فاز بخار انجام می‌شود. فرآیند احتراق پیشبرانه‌های ژلی با پیشبرانه‌های مایع متفاوت است. در ارتباط با پیشبرانه مایع، با افزایش دمای قطره مایع بر اثر تبخیر سطحی حجم قطره کاهش می‌یابد. بخارهای تولید شده پس از شرکت در فرآیند احتراق موجب تولید گرمای بیشتر می‌شوند و قطره با دریافت این گرما به دمای

اطراف قطره‌ی مایع **قا** را می‌پوشاند. حال احتراق به یکی از دو روش زیر ممکن است انجام بگیرد:

(۱) اکسید آلومینیوم جامد به اکسیژن اجازه دهد تا به داخل قطره نفوذ کند و با **قا** واکنش بدهد و (۲) گازهای به دام افتاده در داخل قطره موجب افزایش فشار داخل قطره شوند تا حدی که انفجار اتفاق بیافتد و **قا** خالص در معرض گاز اکسیژن قرار بگیرد.

۳- نتیجه گیری

پیشراشه‌های ژل نسبت به پیشراشه‌های متعارف جامد و مایع مزیت‌های مهمی دارند و به همین دلیل در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که ویسکوزیته‌ی ژل مهم‌ترین خاصیت تأثیرگذار بر رفتار آن در سیستم پیشراشه از لحاظ رانش، اتمایزیشن و احتراق است. در پیشراشه‌های ژل ویسکوزیته به نرخ برش وابسته است، به نحوی که با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته به سرعت کاهش می‌یابد. مدل ریاضی قانون توانی در نرخ‌های برش متوسط به خوبی رفتار پیشراشه‌های ژل را پیش بینی می‌کند.

علیرغم مزایای قابل توجه پیشراشه‌های ژل نسبت به پیشراشه‌های مایع و جامد، اتمایزیشن و احتراق این پیشراشه‌ها نسبت به پیشراشه‌های مایع سخت‌تر است.

انژکتورهای برخوردی به خاطر ایجاد نرخ برش بالا در گذرگاه‌های انژکتور و همچنین در نقطه‌ی برخورد جت‌های سوخت و اکسید کننده، گزینه‌ی مناسبی برای اتمایز کردن پیشراشه‌های ژل هستند. با افزایش سرعت جریان ژل در اریفیس‌های انژکتور، الگوی اسپری تولید شده بهتر می‌شود به نحوی که در سرعت‌های بالا، الگوی اسپری تولید شده همانند مایع می‌گردد.

فرآیند احتراق قطره پیشراشه ژل چهار مرحله دارد که عبارتند از: تشکیل لایه الاستیک در اطراف قطره ژل؛ تشکیل حباب گاز در داخل قطره‌ی ژل با افزایش دما؛ افزایش حجم حباب گاز و در نتیجه افزایش فشار در داخل قطره؛ پاره شدن لایه الاستیک و فرار کردن حباب گاز و محترق شدن آن، این فرآیند هم چنان ادامه می‌یابد تا قطره‌ی ژل به صورت کامل بسوزد.

در گزارش دیگری، مشخص شد که با افزایش فشار به بالای 10^2 (فشار بحرانی سوخت ژل) رژیم احتراق تغییر می‌کند [۲۸]. نتایج نشان داد که احتراق قطرات ژل در فشار زیر بحرانی از قانون $1/2$ تبعیت می‌کند اما در فشار فوق بحرانی چنین رابطه‌ای وجود ندارد. در رژیم فشار زیر بحرانی ضریب سرعت سوزش با افزایش جزء جرمی اکسیژن محیط افزایش می‌یابد، اما این پدیده در نقطه‌ی بحرانی متوقف می‌شود و در بالای نقطه‌ی بحرانی ضریب سرعت سوزش از جزء جرمی اکسیژن محیط مستقل می‌گردد. در واقع، در فشار زیر بحرانی جزء جرمی اکسیژن محیط نقش مهمی در مکانیزم سوزش ایفا می‌نماید.

تأخیر سوختن **ث** **چپز** ژلی با اکسید کننده **د** مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده که در یک نسبت **د/د** بحرانی (نسبت دبی اکسید کننده به سوخت) زمان سوختن کم‌ترین مقدار است [۲۹]. در این بررسی، نسبت **د/د** بحرانی با افزایش مقدار بارگذاری فلز کاهش یافته و نشان داده شده که نسبت **د/د** بحرانی از نسبت **د/د** استوکیومتری کمتر است و زمان سوزش با معکوس ایمپالس ویژه متناسب می‌باشد و در جایی که ایمپالس ویژه ماکزیمم است زمان سوزش کم‌ترین مقدار را دارد. بدین ترتیب ادعا شد که اگر سوخت و اکسیدکننده هر دو ژل باشند، مقدار زمان سوزش در همه‌ی نسبت‌های **د/د** بیشتر خواهد گردید. در این بررسی، روابط مربوط به محاسبه‌ی گرمای احتراق سوخت ژل **ث** **چپز** محتوی ذرات فلزی (**قا**) به صورت زیر ارائه شده است [۲۹]:

$$\Delta H = 5.72 \times 10^{-2} M + 8.922 \frac{\text{kcal}}{\text{g}} \quad (8)$$

که در آن **چ** درصد فلز موجود در سوخت ژل می‌باشد. محققین احتراق ژل فلزی **قا** / **خج** را نیز بررسی کردند. نتایج نشان داد که در یک قطره منفرد، چندین ذره‌ی **قا** به وسیله‌ی **خج** مایع احاطه شده‌اند [۳۱ و ۳۰]. با گرم شدن قطره، سوخت مایع به محیط غنی از اکسیژن تبخیر شده و ذرات جامد **قا** به صورت توده‌ای جمع شده و داغ می‌شوند. با افزایش دما توده‌ی فلز **قا** به حالت مذاب تغییر فاز می‌دهد. در این حالت لایه‌ی از **۳** **د** **قا** جامد

۸-۲۰۱۱، اذنگتکفءکب هتفلاولاع گمذ عکع ح مدمع لغ م ع د هتک کلاهمع گتلاب قع ت قع عتک گم م ع قع ن قع مکتف لایع گ و ب کع م ع ح ب وک لایع ب هض اض
۴۸۷۴.

تک قع لک م ع ع ف ع کذ- کع م له ذ م کتف ع کتلاب ا ح ت د ت چ ب ز هتق قع م ع چ گ لایع ف ع م گ م ام ع ک ب ب ع کتف ک عت . چ ع لایع ژ- ج ب د ع م گ م هض اض
۱۳-۲۱، ۶، ۹۹۹، ۱۹۹۹ عتف عتف قق لایع م ع چ و ک لایع عتف ک ب

۵۴، ۱۹۸۷، عع ر ع کتف عذ م ام ع ک ب- لایع لایع کتف عتف ل ل ل م قذ ع لایع ک کتف م ق ا ت ک م ام ع ک ب ب . ب ع ع د- ب ذ و ع کس- د ذ و کلا م و ض اض

۵۲، ۱۹۸۷، عع ر ع کتف عذ م ام ع ک ب ب ل م ع گتلاب ل ل م قذ ک کتف م ق ا ت ک کتف ک عت . د ذ و کلا م ر- ب ذ و ع کس و ض اض

Archive of SID