

ساخت و بررسی رفتار رئولوژیکی پیشرانه ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن

علی صابری مقدم^{۱*}، نسیمه حاجیلری^۲، مرتضی محمدی^۳

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

پیشرانه‌های ژل، شکل بهبود یافته ی پیشرانه‌های مایع هستند که نسبت به پیشرانه های مایع، مزایایی چون ایمنی بالاتر، فشار بخار کمتر، قابلیت پذیرش مواد پر انرژی جامد و قابلیت انبارداری آسان تر را دارا هستند. در این مقاله با استفاده از عامل ژل کننده متیل سلولوز (MC) و در شرایط مناسب، ژل سوخت ارزشمند دی متیل هیدرازین نامتقارن (UDMH) تهیه شد و ژل های ساخته شده از نظر رئولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش ها نشان داد که ژل های ساخته شده با ۷/۵ درصد ژل کننده، رفتار رئولوژیکی بهتری را نسبت به سایرین داشتند. نتایج رئولوژیکی با مدلی تعمیم یافته از نوع "پاورلا" در دماهای مختلف، هماهنگی خوبی نشان داد. ژل های ساخته شده تحت شتاب ۵۰۰g برای مدت ۳۰ دقیقه پایداری خوبی نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: UDMH-MC، پیشرانه، ژل، رئولوژی.

۱. مقدمه

سیستم، برطرف گردد. این مزایا شامل دانسیته بالاتر نسبت به پیشرانه مایع و انرژی بالاتر (با افزودن مواد پزانرژی) نسبت به هر دو سیستم پیشرانه متعارف مایع و جامد، بهبود در ایمنی انبارداری [۱]، کاهش خطرات اشتعال، سمیت کمتر، کاهش نشتی پیشرانه در مخازن نگهدارنده [۳-۱]، رفع مشکلات تلاطمی^۴ در مخازن در هنگام مانور موشک و قابلیت مدیریت هوشمند تراست

پیشرانه های مایع، بدلیل مزایای منحصر بفردی که دارند، در سطح وسیعی در انواع موشک ها استفاده می شوند. پیشرانه های ژل، حالت بهبود یافته ی پیشرانه های مایع هستند. در پیشرانه های ژل، تلاش شده است تا مزایای هر دو سیستم پیشرانه مایع و جامد، تامین شده و تا حد زیادی نواقص هر دو

۴- sloshing

* E-mail: saberi_mog@yahoo.com

۱- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

۳- کارشناس ارشد

تحت سرعت برشی ثابت)، رفتار نازک‌شوندگی برشی^۱ (کاهش ویسکوزیته ژل با افزایش سرعت برشی) و پایداری (عدم رسوب ذرات جامد در طول انبارداری، جابجایی و با اعمال شتاب و حفظ همگنی ژل) مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های ساخته شده از نظر میزان انرژی با استفاده از کالریمتری ارزیابی شدند و ایمپالس ویژه^{۱۱} و دانسیته آنها نیز مشخص شد که خواص حاصله با خواص UDMH ژل نشده، مورد مقایسه قرار گرفته اند.

۲. روش انجام آزمایش ها

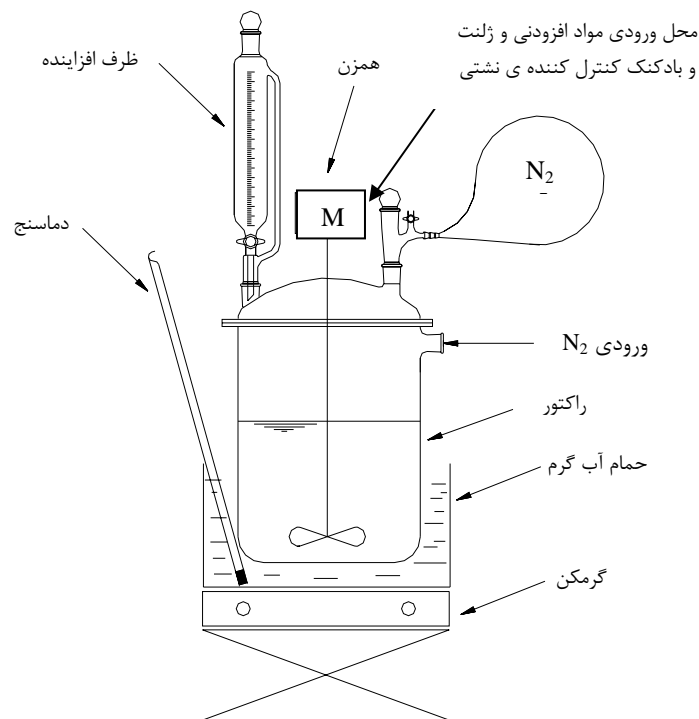
از آنجا که UDMH ماده ای سمی و خطرناک و دارای نقطه جوش نسبتاً پایین ($b.p=63^{\circ}C$) است، قبل از وارد شدن به آزمایشات اصلی، ضروری است که ابتدا سیستم آزمایشگاهی با یک سیمولنت^{۱۲} مناسب مورد ارزیابی قرار گیرد و تست‌های رئولوژیکی نیز برای آن انجام شود و پس از اطمینان از مناسب بودن سیستم آزمایشگاهی، آزمایشات برای ساخت ژل UDMH، پی گیری گردد. آزمایشات اولیه، نشان داد که سیمولنت MC-H₂O می تواند برای این منظور استفاده شود، لذا سیمولنت ژل MC-H₂O با درصدهای مختلف ژل کننده و شرایط مختلف دمایی و مکانیزم های مختلف هم زدن ساخته شد تا مناسب ترین شرایط کاری چه از نظر آزمایشات ساخت ژل و چه از نظر تست های رئولوژیکی تامین گردد [۱۷]. در انجام آزمایشات ساخت ژل UDMH، از سیستم آزمایش فوق، استفاده شد و با توجه به سمیت UDMH و فشار بخار بالایی که این مایع دارد، آزمایشات ساخت ژل UDMH در یک ظرف واکنش در بسته که مانع خروج UDMH از ظرف شده و از ورود هوا نیز به سیستم جلوگیری می کرد صورت گرفت. با توجه به تمایل شدید UDMH به جذب رطوبت و اکسیژن هوا، برای جلوگیری از اکسیداسیون، در ابتدا و انتهای عمل ژلاسیون، گاز نیتروژن اضافه شد و سیستم با آن شستشو گردید. سوخت مایع به داخل ظرف اختلاط فرستاده شد و دمای آن بین ۱۵-۲۰°C ثابت نگه داشته شد. عامل ژل کننده، به آرامی و در طی مدت ۱۰ دقیقه همراه با هم زدن به سوخت اضافه شد و عمل اختلاط به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت. مواد افزودنی (اسید استیک و روغن سیلیکونی) همراه با افزودن متناوب پودر فلزات، اضافه گردید. کل فرآیند اختلاط در یک محدوده زمانی ۴۵-۶۰ min انجام شد. سپس مواد داخل راکتور، به منظور توسعه و تکمیل عمل ژل شدن، برای مدت یک شب، دست نخورده باقی ماند.

- ۱۰- Shear Thinning
- ۱۱- Specefic Impulse
- ۱۲- Simulant

می‌شود. در بین پیشرانه‌های ژل، ساخت پیشرانه ی ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن^۱ (UDMH) به دلیل I_{sp} مناسب، قابلیت آتش‌گیری خودبخود^۲ با اکسیدکننده، واکنش‌پذیری^۳ بسیار خوب و عدم نیاز به تکنولوژی خیلی پیچیده برای بکارگیری، در سطح وسیع، مورد توجه محققان و مهندسان پیشرانه بوده است. UDMH، یک سوخت مایع قابل ذخیره می‌باشد که در سال ۱۹۵۰ به عنوان نوعی سوخت مناسب برای راکت‌های مایع‌سوز انتخاب گردید و از آن تاریخ به بعد بطور وسیع در سیستم های موشکی و پرتاب ماهواره مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به قابلیت هایی که UDMH دارد در سالهای اخیر تلاش زیادی در جهت ژل سازی آن و تهیه سوخت ژل UDMH صورت گرفته است [۴-۸].

محققین از متیل سلولوز^۴ [۶، ۷، ۸، ۹]، هیدروکسی اتیل سلولوز^۵ [۱۰]، SiO₂، سیلیکای کلونییدی [۱۳-۱۴]، آگار-آگار^۶ [۵، ۶، ۷] و هیدروکسی متیل سلولوز^۷ (HMC) [۵] و سایر عوامل ژل کننده، به منظور ساخت ژل UDMH استفاده کرده‌اند [۱۶-۱۴، ۱۲]. محققین، ژل کننده متیل سلولوز را بعنوان یکی از مناسب‌ترین عوامل برای ژل سازی UDMH معرفی کرده اند [۶، ۷، ۸]. گزارش شده که این ژل کننده با درصد کمتر از بقیه عوامل ژل کننده ای که برای ژل کردن UDMH استفاده شده است، ژل‌های بسیار پایدار و خوبی ارائه داده است. همچنین ادعا شده که رفتار ژل‌های حاصل از ژل کننده MC با مدل ساده رئولوژیکی مانند پاورلا^۸ (PL) قابل تفسیر و تجزیه و تحلیل است که امتیاز بسیار مهمی از نظر مدل سازی نتایج و قابلیت پیش‌بینی رفتار ژل، محسوب می‌شود [۵]. در این تحقیق با استفاده از ژل کننده MC که دارای اندازه متوسط ذرات ۶۳ میکرون بود، ژل های UDMH با درصد های مختلف ژلنت ساخته شد و مناسب ترین درصد ژل کننده، که ژلی پایدار و با ویسکوزیته ی مناسب ارائه می داد، مشخص گردید. ژل های ساخته شده از نظر رفتار رئولوژیکی، تشکیل حلقه هیستریسیس (قابلیت بازگشت‌پذیری ژل، پس از اعمال سرعت برشی)، رفتار تیکسوتروپیک^۹ (تغییر ویسکوزیته ژل با زمان

- ۱- Unsymmetrical Di Methyl Hydrazine
- ۲- Haypergosity
- ۳- Reactivity
- ۴- Methyl Cellulose
- ۵- Hydroxy Ethyl Cellulose
- ۶- Agar-Agar
- ۷- Hydroxy Methyl Cellulose
- ۸- Power low
- ۹- Thixotropic



شکل ۱- سیستم آزمایشگاهی ساخت ژل UDMH

سطح، وسط و عمق هر بیج^۲ از ژل‌های ساخته شده و سپس توزین و مقایسه میزان درصد باقیمانده ی خشک آنها با هم، بعد از اینکه در دما، خلاء و مدت زمان مناسب خشک گردید، انجام گرفت. بررسی پایداری ژل با سانتیفریوژ کردن نمونه ها در شتاب ۵۰۰g برای مدت ۳۰ دقیقه نیز انجام شد تا از همگن بودن ژل، در نقاط مختلف توده ی ژلی، اطمینان حاصل شود. این سانتیفریوژ، ساخت شرکت Hettich آلمان و مدل EBA3S بود. برای اندازه‌گیری گرمای احتراق نمونه‌های ژل UDMH ساخته شده، از بمب کالریمتر مدل IKA-C4000A استفاده شد. به منظور پی بردن به چگونگی تشکیل ساختار و پیوندهای شبکه ژلی، از میکروسکوپ نوری استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

آزمایشات ساخت سیمولنت با آب مقطر تهیه شده در آزمایشگاه، ژل کننده متیل سلولز (MC) ساخت Aldrich به جرم مولکولی $M_w = 63000$ و ویسکوزیته ی 1500cP (محلول ۲ درصد در آب) انجام شد. آزمایشات، ابتدا با $2/5$ درصد ژل کننده انجام شد اما ژلی تشکیل نشد، لذا تصمیم به افزایش درصد عامل ژل کننده گرفته شد. نمونه (GF004) با ۱۰ درصد ژل کننده MC

به منظور جلوگیری از اکسیداسیون مواد داخل ظرف اختلاط توسط هوا، گاز نیتروژن به فازهای ابتدایی و انتهایی ژلاسیون اضافه گشت. آزمایشات رئولوژیک بر روی ژل ساخته شده یک روز بعد انجام گرفت تا از فرآیند توسعه ژل اطمینان حاصل شده باشد. نمای ظرف و سیستمی که با آن ژل‌ها ساخته شده‌اند در شکل (۱) آورده شده که در آن، حجم ظرف حدود 200 cm^3 و به شکل استوانه‌ای و به قطر ۵ cm می‌باشد.

برای انجام تست های رئولوژی، از دستگاه ویسکومتر Brookfield مدل LV DV-II + Pro که دارای ۴ نوع اسپیندل^۱ از نوع LV با شماره‌های ۱ الی ۴ بود استفاده شد. آزمایشات رئولوژیکی، با استفاده از دستگاه فوق و انتخاب اسپیندل مناسب انجام شد. ویسکوزیته سیال در سرعت‌های برشی مختلف و پس از دادن زمان کافی به دستگاه و پایدار شدن آن، گزارش گردیده است. در مطالعه ی اثر سرعت برشی بر ویسکوزیته، سرعت برشی از سرعت پایین به بالا (یک تا ۷۰ rpm) تغییر داده شد. به منظور بررسی قابلیت بازگشت پذیری ژل (تشکیل حلقه هیستریسیس) در دماهای مشخص، سرعت چرخش اسپیندل از یک تا ۷۰ rpm و سپس برعکس، تغییر داده شد. همگن بودن و یکنواخت بودن ژل در نقاط مختلف توده ژل ساخته شده، با نمونه برداری از

۲- Batch

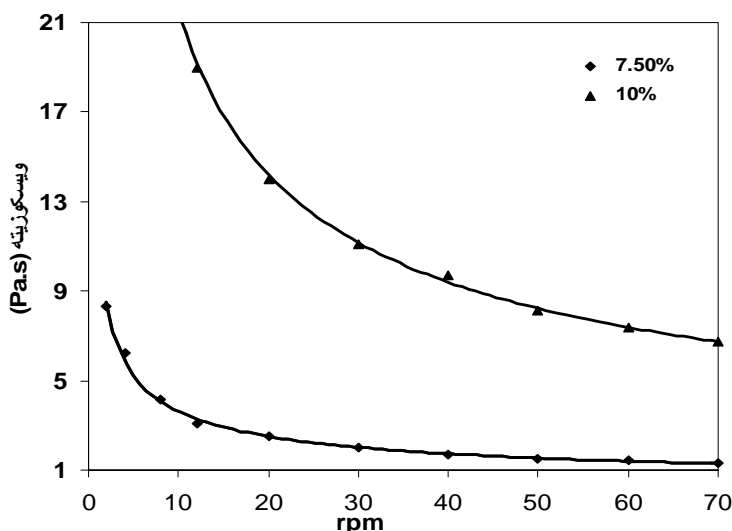
۱- Spindle

ژلی با ویسکوزیته ی بسیار بالا ایجاد خواهد شد. درصد بهینه ی ژل کننده، ۷/۵ درصد بود که ژلی با کیفیت رئولوژیک مناسب ایجاد می کرد. از آنجا که خواص رئولوژیکی پیشرانه های ژل، به ترکیب درصد مواد تشکیل دهنده ی آنها، دما و مقدار نیروی برشی اعمال شده وابسته است، لذا مطالعات رئولوژیک در محدوده ی وسیعی از دما، ترکیب درصد های مختلف و نیروهای برشی متنوع انجام شد.

شکل های (۲) و (۳) روند تغییرات ویسکوزیته را در دو دمای ثابت در درصد های مختلف ژل کننده نشان می دهند. همانطور که مشخص است، با افزایش مقدار ژل کننده، ویسکوزیته به میزان زیادی افزایش یافته است. جدول (۱) ترکیب درصد ژل های مورد بررسی را نشان می دهد.

و ۹۰ درصد آب انجام گرفت که در نتیجه ژلی با کیفیت مطلوب ساخته شد. سیمولنت ساخته شده، رفتار رئولوژیکی مناسبی را در همه دماهای مورد بررسی نشان داد. نتایج این بررسی، توسط صابری مقدم و همکاران [۱۷] به تفصیل بیان شده است.

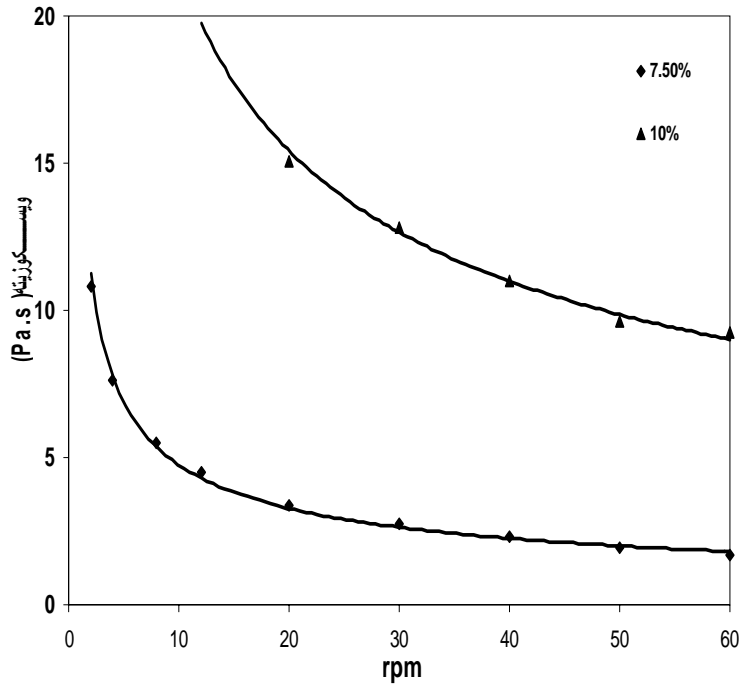
آزمایشات ساخت ژل دی متیل هیدرازین نامتقارن، با استفاده از UDMH (خلوص ۹۸٪ و دانسیته 0.79 g/cm^3)، MC (ساخت شرکت Aldrich با ویسکوزیته ی ۱۵۰۰ cP) و اسید استیک گلاسیال انجام گرفت. آزمایشات اولیه نشان داد که با ۲/۵ و ۴/۵ درصد وزنی ژل کننده، ژلی تشکیل نشد. آزمایشات با ۶، ۷/۵ و ۱۰ درصد ژل کننده، موجب تشکیل ساختار ژلی شد. نتایج آزمایشات رئولوژیکی مشخص کرد که با حداقل ۶ درصد ژل کننده، ژل تشکیل خواهد شد و وقتی که از ۱۰ درصد ژل کننده یا بیشتر استفاده شود



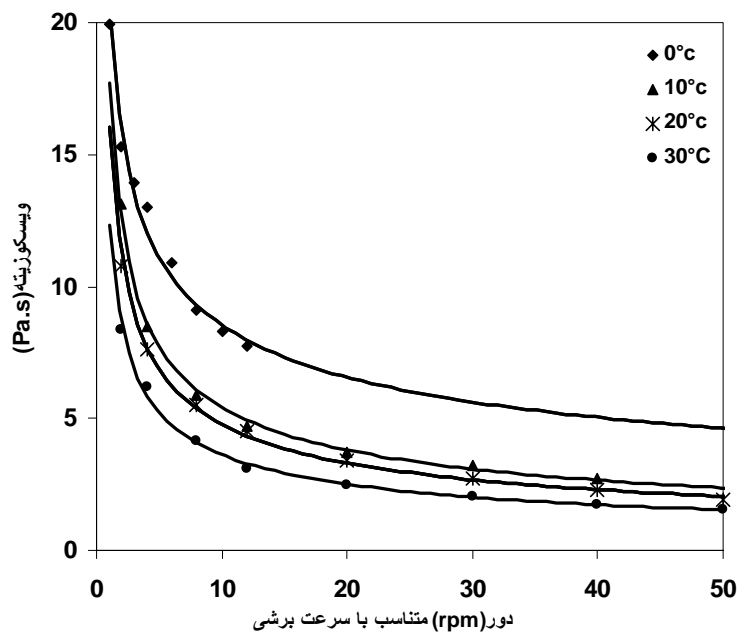
شکل ۲- تغییرات ویسکوزیته ی پیشرانه ی ژل UDMH با سرعت برشی (rpm)، در دمای 30°C ، با ۷/۵ و ۱۰ درصد ژلنت

جدول ۱- ترکیب درصد اجزا در پیشرانه های ژل ساخته شده

نمونه	درصد UDMH	درصد MC	درصد اسید استیک گلاسیال
GFU001	۱۰۰	۰	۰
GFU004	۹۲/۲	۷/۸	۰
GFU005	۹۱/۷	۷/۵	۰/۵
GFU006	۹۳/۵	۶	۰/۵
GFU007	۹۰	۱۰	۰
GFU008	۸۹/۵	۱۰	۰/۵



شکل ۳- تغییرات ویسکوزیته ی پیشرانه ژل UDMH با سرعت برشی (rpm) در دمای ۲۰°C، با ۷/۵ و ۱۰ درصد ژلنت

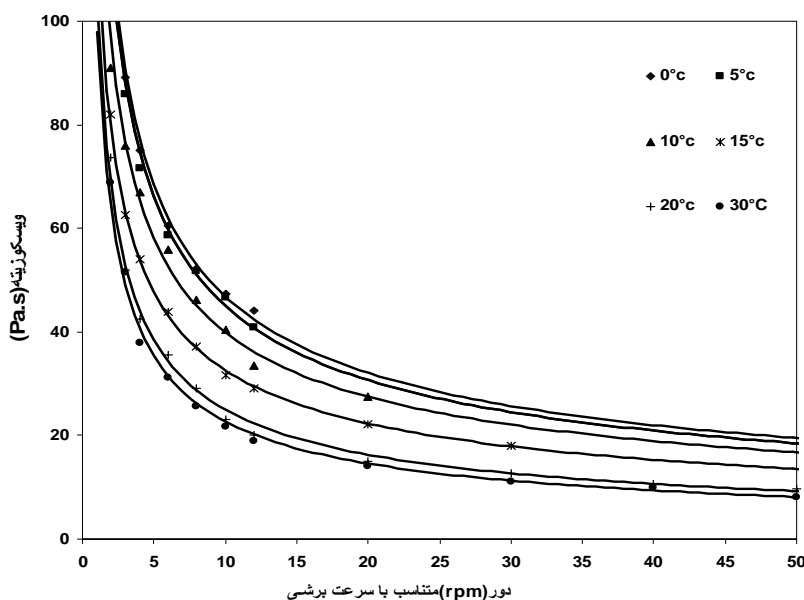


شکل ۴- تغییرات ویسکوزیته ی ژل UDMH با ۷/۵ درصد ژلنت با سرعت برشی در دماهای مختلف

پراکنده تصادفی، تشکیل شبکه می‌دهند که فاز مایع را بوسیله ی تشکیل میسل‌ها^۱ بخود جذب می‌کنند [۳].

نتایج وابستگی ویسکوزیته به سرعت برشی (متناسب با rpm) برای ۷/۵ و ۱۰ درصد ژلنت در دماهای مختلف از صفر تا ۳۰°C در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. در این تحقیق، کاهش ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی در همه ی دماها تایید شد. می‌دانیم که زنجیره‌های MC به صورت

۱- Micelle



شکل ۵- تغییرات ویسکوزیته ژل UDMH با ۱۰ درصد ژلنت با سرعت برشی در دماهای مختلف

شده توسط سایر محققین است [۱۳،۱۰،۷،۶]. مقادیر n و K که از شکل (۶) بدست آمده اند در جدول (۲) آورده شده است.

به نظر می رسد که با افزایش دما، K کاهش می یابد، در حالیکه n با افزایش دما تغییرات بسیار کمی دارد. این مسئله را می توان بدین صورت توجیه کرد که ژل در دماهای پایین تر، بیشتر حالت شبه پلاستیسیته^۲ دارد و با افزایش دما ویژگی های نیوتنی بیشتری از خود نشان می دهد و n کمتر به تغییر دما حساس است. این نتایج، هماهنگ با کارهای انجام شده توسط سایر محققین است [۵] و [۷].

با استفاده از نرم افزار data-fit تلاش شد تا معادله ی نسبتاً دقیق از ارتباط سرعت برشی، دما و تنش برشی بدست بیاید. در این تطابق، بیش از ۳۰۰ داده ی دما، ویسکوزیته و سرعت برشی حاصل از آزمایشات وارد شد. بررسی ها نشان داد که معادله ای بصورت معادله ی (۳)، هماهنگی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. در واقع معادله ی (۳) از نوع معادله ی (۱) (پاورلا) است که در آن پارامترهای مربوطه مشخص شده اند. در معادله ی (۳)، K با توان $-۶/۸۱$ ، با دما تغییر می کند و n تقریباً ثابت است. در بررسی های بیشتر، مشخص شد که n با درصد ژلنت تغییر می کند. در شکل (۷)، نمودار حاصل از این معادله ۳ پارامتری مشاهده می شود.

$$\mu = 6.88 \times 10^{21} \times T^{-6.81} \times \gamma^{-0.57} \quad (3)$$

γ : سرعت برشی

T : دما

μ : ویسکوزیته

تحت نیروی برشی، ساختار ژلی شکسته می شود که جریان را روان تر می کند. این پدیده، تاییدی بر وجود خاصیت نازک شونده گی برشی است. نکته ای دیگر که در این نمودارها مشهود است، این است که با افزایش دما، میزان ویسکوزیته کاهش می یابد. این اتفاق ممکن است بدین صورت توجیه شود که با افزایش دما، انرژی جنبشی و حرارتی مولکول ها به شکست ساختار ژلی کمک می کند، که منجر به کاهش ویسکوزیته می شود.

یکی از معادلاتی که می تواند رفتار سیالات غیر نیوتنی را تفسیر نماید از نوع پاورلا (PL) می باشد [۱۷-۲].

$$\tau = K \gamma^n \quad (1)$$

τ ، K ، γ و n به ترتیب تنش برشی، ضریب ویسکوزیته، سرعت برشی و ضریب شبه پلاستیسیته هستند.

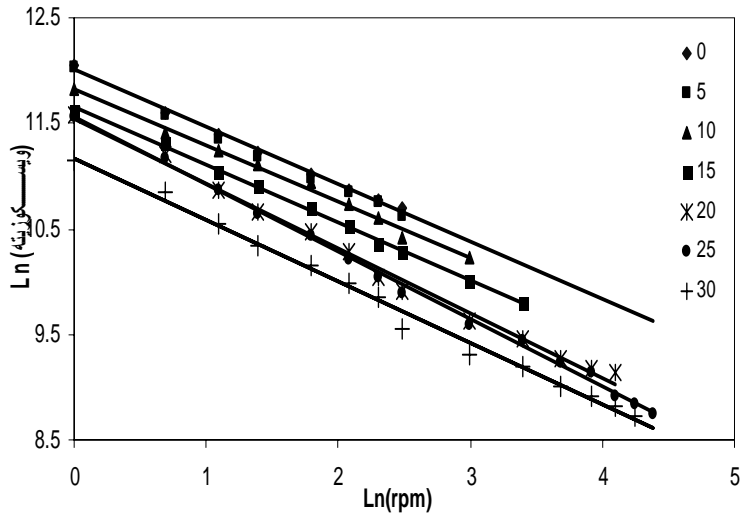
طبق معادله ی پاورلا (معادله (۱))، ویسکوزیته ی ظاهری^۱ با تنش برشی، ارتباط دارد:

$$\mu = K \gamma^{n-1} \quad 0 < n < 1 \quad (2)$$

در تمامی دماها، تغییرات ویسکوزیته ی ژل ساخته شده از قانون پاورلا تبعیت کرد ($R^2 > 99\%$). یک نمودار لگاریتمی از ویسکوزیته و سرعت برشی، برای ژل UDMH با ۷/۵ درصد ژل کننده، در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که در همه ی دماها نمودار لگاریتمی ویسکوزیته ظاهری (اندازه گیری شده با دستگاه ویسکومتر) در مقابل سرعت برشی (rpm) بصورت خط مستقیم است. این نتیجه هماهنگ با رفتار رئولوژیکی توصیف

۲- Pseudoplasticity

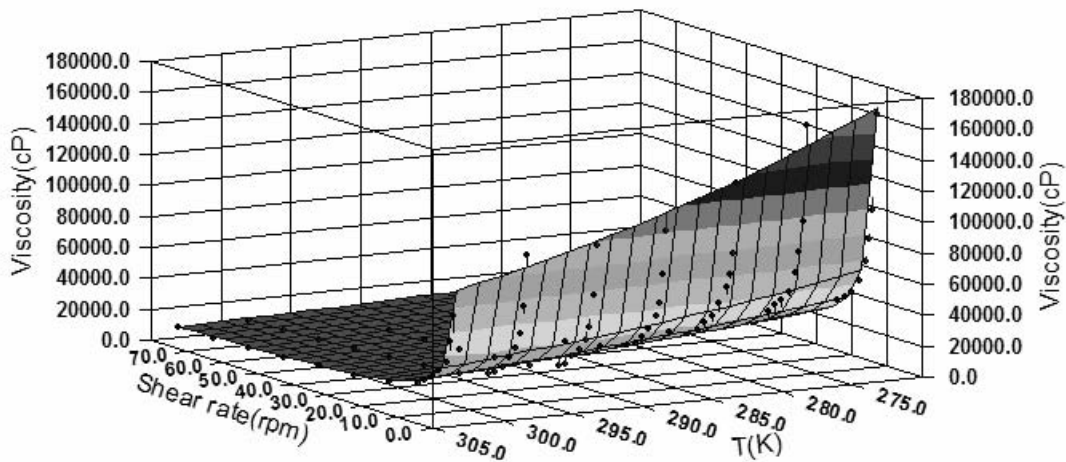
۱- Apparent viscosity



شکل ۶- نمودار رفتار توانی ژل UDMH-MC با ۱۰ درصد ژلنت MC در دماهای مختلف

جدول ۲- وابستگی درجه شبه پلاستیسیته و شاخص تطابق برای ژل UDMH-MC

K	n	دما (°C)
۱۹/۳۲	۰/۶۶	صفر
۱۶/۳۷	۰/۵۱	۱۰
۱۴/۸۶	۰/۵۳	۱۵
۱۱/۳۹	۰/۵۳	۲۰
۱۰/۹۷	۰/۵۰	۳۰



شکل ۷- اثر دما و سرعت برشی، بر تغییرات ویسکوزیته ی ژل UDMH-MC

شدند. سپس نمونه‌های خشک شده توزین گردیدند. بررسی‌ها نشان داد که باقیمانده ی خشک، از همه ی مقاطع سطح، وسط و عمق تقریباً یکسان بود که حاکی از آن است که این ژل‌ها حتی پس از تحمل شتاب $500g$ هنوز پایدار باقی مانده‌اند.

۲-۳-۲- دانسیته

اندازه گیری دانسیته نیز در دمای $20^{\circ}C$ با روش نسبت جرم به حجم انجام شد که نتایج آن در جدول (۳) آمده است.

۳-۳-۳- تست کالریمتری

به منظور مطالعه ی گرمای احتراق نمونه‌های ژلی ساخته شده (کالریمتری)، گرمای احتراق نمونه‌های ژل ساخته شده، ابتدا بصورت نظری و بطور تقریبی محاسبه گردید و سپس توسط کالریمتری اندازه گیری شد. جدول (۴) نتایج کالریمتری سوخت های ژل UDMH را نشان می دهد. جدول، نشان می دهد که گرمای احتراق محاسبه شده، با نتایج حاصل از کالریمتری، هماهنگی خوبی دارد.

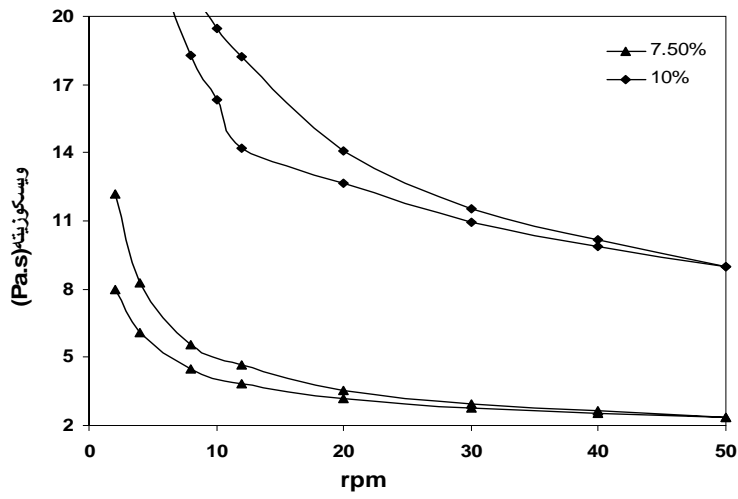
ضمناً در این بررسی با بهره‌گیری از نرم‌افزار Gas Dynamic Lab-Propep مقدار I_{sp} نمونه‌های مختلف ژل با اکسیدکننده N_2O_4 در نسبت بهینه محاسبه شد که در جدول (۵) آورده شده است. در این محاسبات، فشار محفظه احتراق 70 bar ، فشار خروجی 1 bar و دمای پیشرانه 298 K قرار داده شد. نتایج جدول (۵)، نشان می دهد که افزودن ژل کننده به میزان ۸ درصد به UDMH، تنها حدود ۲ واحد I_{sp} ژل را کاهش می‌دهد. این امر با توجه به مزایای زیادی که پیشرانه ژل در مقایسه با پیشرانه مایع می‌تواند داشته باشد قابل توجه نیست (نمونه‌های GFU004 و GFU005). با توجه به اینکه با ژل‌سازی پیشرانه‌ها، آنها قابلیت بارگذاری پیدا می‌کنند، لذا به این ژل می‌توان پودرهای فلزی افزود که در این صورت نه تنها ایمپالس ویژه بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد (و نقیصه ی فوق الذکر رفع می گردد) بلکه دانسیته ی پیشرانه نیز بخوبی ترقی می کند و این امر بطور موثری پارامتر مهم $p.I_{sp}$ را افزایش می‌دهد. جدول (۵) حدود دانسیته پیشرانه‌های نمونه و نیز حاصل ضرب $p.I_{sp}$ که پارامتر مهمی در ارزیابی پیشرانه‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد. با ژل کردن پیشرانه، این پارامتر افزایش یافته که با افزودن پودر فلزی، این افزایش بسیار چشمگیر تر خواهد بود.

مقدار ویسکوزیته با افزایش سرعت برشی (رفت) و سپس کاهش سرعت برشی (برگشت) در یک دمای ثابت برای ژل های مختلف ثبت گردید (شکل (۸)). دو منحنی، هیچ برخوردی با یکدیگر نداشتند و یک ناحیه بین دو منحنی تشکیل می شود که به آن حلقه هیستریسیس می‌گویند [۵]، [۷]، [۱۷]. مساحت حلقه، بسته به سرعت شکستن پیوندهای بین مولکول‌های ژلی و دوباره تشکیل شدن آن ها تغییر می‌کند، که نمودارهای حاصله به خوبی برگشت‌پذیر بودن ژل تشکیل شده را نشان می‌دهند.

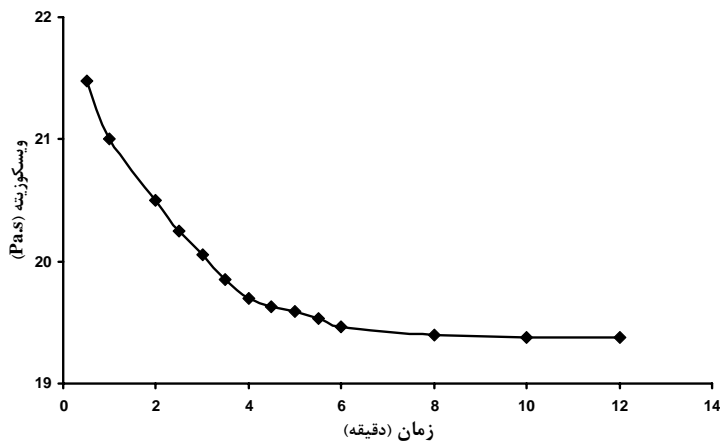
نتایج تغییرات ویسکوزیته ی ژل با زمان، در سرعت برشی مشخص در شکل (۹) نشان داده شده است. مشخص شد که با گذشت زمان در سرعت برشی ثابت و دمای ثابت، ویسکوزیته کاهش می یابد که تاییدی بر خاصیت تیکسوتروپیک ژل های ساخته شده است. تغییرات ویسکوزیته در زمان های اولیه ی حرکت ژل، زیاد است و به مرور با گذشت زمان این تغییرات، کاهش یافته و در زمان های طولانی، ویسکوزیته ی ژل ثابت می ماند.

۳-۱-۱- تست پایداری

از آنجا که پیشرانه ژل باید برای مدت نسبتاً طولانی پایدار بماند، تست پایداری، اهمیت ویژه ای دارد. ناپایداری ژل ها ممکن است به دو صورت اتفاق بیافتد، یکی جدا شدن مایع (پیشرانه) از توده ژلی که به عرق کردن معروف است و دیگری تغییر ترکیب درصد مواد در مقاطع مختلف ژل که موجب ناهمگنی در توده ژلی می گردد. به منظور بررسی پایداری ژل های ساخته شده، آنها برای مدت ۳۰ دقیقه در سانتریفیوژ تحت شتاب $500g$ ($2800-3000\text{ rpm}$) قرار گرفتند که پدیده عرق کردن در ژل‌های ساخته شده وجود نداشت و هیچ مایعی در سطح نمونه‌ها پس از سانتریفیوژ مشاهده نشد و مقدار از دست رفتن UDMH در آزمایش فوق در اثر تبخیر، کمتر از زیر ۱۰ درصد بود که با توجه به فراریت بالای UDMH و اینکه تست‌های فوق، با ظروف در باز در سانتریفیوژ صورت گرفته، امری عادی و قابل قبول است و با تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین هماهنگی دارد [۷]. به منظور مطالعه دقیق تر پایدار بودن ژل‌های ساخته شده، پس از عمل سانتریفیوژ از ظروف نمونه هر ژل از سه مقطع سطح، وسط و عمق آنها نمونه‌برداری شد و نمونه‌ها توزین شده و به مدت یک شب و در دمای حدود $50^{\circ}C$ و خلأ حدود 500 mbar خشک



شکل ۸- برگشت پذیری ژل های UDMH (تشکیل حلقه هیستریسیس) در دمای ۱۵ °C در درصدهای مختلف ژل کننده



شکل ۹- نمودار تغییرات ویسکوزیته ژل UDMH حاوی ۱۰ درصد زلنت با زمان (اثر تیکسوتروپیک) در ۱۵ °C و ۲۰ rpm

جدول ۳- دانسیته تئوری (محاسباتی) و تجربی نمونه های ژل UDMH ساخته شده در دمای ۲۰ °C

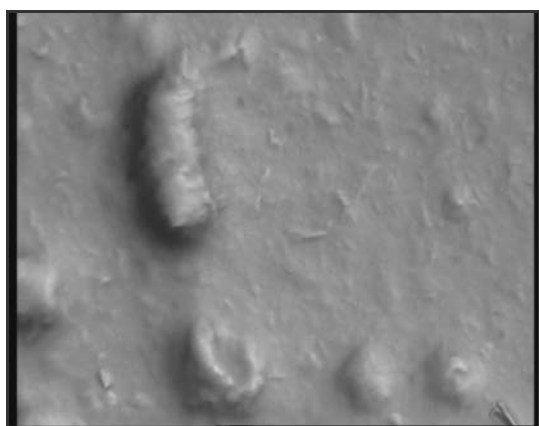
نمونه	جرم نمونه (gr)	حجم (cm ³)	چگالی تجربی (gr. cm ⁻³)	چگالی تئوری (gr. cm ⁻³)
GFU004	۹/۶۰۱۶	۱۱/۶	۰/۸۲۷	۰/۸۲۹
GFU005	۱۰/۱۸۲۱	۱۱/۹	۰/۸۵۵	۰/۸۳۱

جدول ۴- مقایسه گرمای احتراق محاسباتی و گرمای احتراق حاصل از بمب کالریمتری

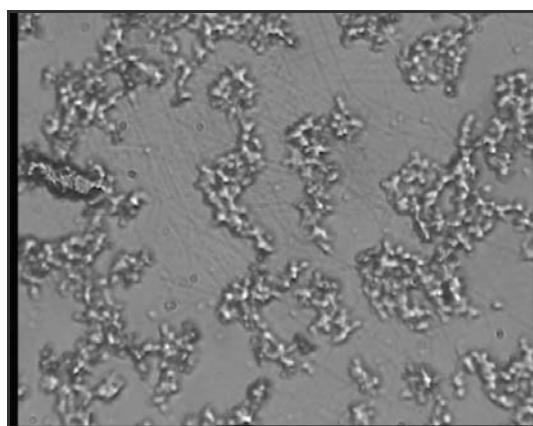
نمونه	آنتالپی تجربی (ژول بر گرم)	آنتالپی تئوری (ژول بر گرم)	درصد اختلاف
GFU001	۳۰۰۹۲	۳۲۳۹۹/۷	+۷
GFU004	۳۱۹۶۳	۳۱۳۳۲	-۲
GFU005	۳۱۵۸۸	۳۱۳۷۰/۲	-۰/۷

جدول ۵- مقادیر I_{SP} محاسبه شده با نرم افزار Propep در مقدار بهینه ی اکسیدکننده N_2O_4 .

نمونه	گرم N_2O_4	I_{SP} (s)	ρ (gr. cm^{-3})	$\rho.I_{SP}$
GFU001	۲۱۰	۲۷۷/۶	۰/۷۹	۲۱۹/۳۰
GFU004	۲۱۰	۲۷۵/۶	۰/۸۲۷	۲۲۷/۹۲
GFU005	۲۰۰	۲۷۵/۵	۰/۸۵۵	۲۳۵/۵۵



(a)



(b)

شکل ۱۰- عکس برداری از نمونه GFU005 با استفاده از میکروسکوپ نوری (a- با بزرگنمایی ۱۰۰ و b- با بزرگنمایی ۴۰۰)

نرخ تا دمای محیط گرم گردید. در این فرایند هیچگونه تغییری که نشان دهنده T_g باشد، مشاهده نگردید.

۴. نتیجه گیری

ساخت ژل سوخت موشکی UDMH، با استفاده از ژل کننده MC انجام شد. مناسب ترین درصد ژل کننده برای ساخت ژل، ۷/۵ درصد بود. ژل های ساخته شده رفتار نازک شوندگی برشی و تیکسوتروپیک داشتند و توانایی بازگشت به حالت قبلی را پس از اعمال سرعت برشی بخوبی نشان می دادند (تشکیل حلقه هیسترسیس). نتایج رئولوژیکی ژل های ساخته شده در دماها و سرعت های برشی مختلف با مدلی از نوع پاورلا هماهنگی خوبی نشان می داد. گرچه شاخص تطابق (K) تا حدی با دما در سرعت های برشی مختلف تغییر می کرد، با این وجود، ضریب شبه پلاستیسیته (n) تغییرات چندانی با دما نداشت و در محدوده ی دمایی صفر تا $30^{\circ}C$ از ۰/۶۶ به ۰/۵ کاهش می یافت.

۳-۴- میکروسکوپ نوری

به منظور بررسی ساختار ژلی و بطور کلی مشاهده اینکه آیا ژل، تشکیل شده است یا نه، از نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری، عکس برداری صورت گرفت. شکل (۱۰) عکس نمونه GFU005 را برای دو بزرگنمایی مختلف نشان می دهد.

شکل (۱۰-a) نشان می دهد که، ذرات MC، UDMH را جذب کرده اند و متورم شده اند و UDMH مایع را در خود گیر انداخته اند. در شکل (۱۰-b)، زنجیره های متورم تشکیل شده توسط MC مشاهده می شود که زنجیره های کوچک تر نیز به آنها متصل هستند.

۳-۵- تست DSC

رفتار ژل ساخته شده (GFU005) با استفاده از سیستم DSC از دمای محیط تا $45^{\circ}C$ مورد بررسی قرار گرفت. نمونه با نرخ ۳ درجه سانتی گراد بر دقیقه از دمای محیط تا دمای ۴۵- درجه سانتی گراد سرد شد و مجدداً با همین

- [7]. Varghese, T.L., Gaidhar, S.C., John D., Josekutty J., Muthiah, Rm., Rao, S.S., Ninan, K.N. and Krishnamurthy, V.N., "Developmental Studies on metallized UDMH and Kerosene Gels," Defense Science Journal, Vol. 45, No. 1, pp.25-30, January (1995).
- [8]. Allan, B.D., "Gelled Monomethyl Hydrazine Thixotropic Fuel," U.S. Patent 4,039,360, Aug.,(1977).
- [9]. Varghase, T.L., Prabhakaran, N., Thanki, K.P., Subramanian, S., Rao, S.S., Ninan, K.N. and Krishnamurthy, V.N., "Performance Evaluation and Experimental Studies on Metallised Gel Propellant", Defense Science Journal, Vol. 49, No. 1, pp.71-78, January (1999).
- [10]. Rahimi, S., Hasan, D., Peretz, A., "Development of Laboratory-Scale Gel-Propulsion Technology", J. of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 1, pp. 93-99,(2004).
- [11]. Sippel, N.J., "Hydrazine Gel Composition," U.S. Patent 3,821,043, June,(1974).
- [12]. Thompson, D.M., "Amine Azides Used as Monopropellants," U.S. Patent No. 6,299,654, Oct.,(2001).
- [13]. Varghase, T.L., Prabhakaran, N., Thanki, K.P., Subramanian, S., Rao, S.S., Ninan, K.N. and Krishnamurthy, V.N., "Performance Evaluation and Experimental Studies on Metallised Gel Propellant", Defense Science Journal, Vol. 49, No. 1, pp.71-78, January (1999).
- [14]. Muller, K.F. and Cziesla, M.J., "Monopropellant Composition Including Hydroxylamine Perchlorate," U.S. Patent 3,730,789, May,(1973).
- [15]. Trannenbaum, S., "Heterogeneous Monopropellant Compositions and THRUST Producing Method," U.S. Patent 3, 921, 394, Nov., (1975).
- [16]. Barry, Allan, D., "Thixotropic IRFNA Gel", U.S. Patent 6, 165, 23, May (2000).

[17]. صابری مقدم، علی؛ اکبر آبادی، مرتضی؛ روش های ساخت پیشرانه های دوتایی ژل و بررسی رفتار ژل سیمولنت MC-H₂O، مجله علمی - پژوهشی مواد پراثری سال دوم، شماره ۱، (بهار و تابستان ۸۶).

۵. فهرست علائم

K	ضریب ویسکوزیته
MC	متیل سلولز
n	ضریب شبه پلاستیسیته
PL	مدل رئولوژیکی پاورلا
rpm	دور بر دقیقه
T	دما
UDMH	دی متیل هیدرازین نامتقارن
γ	سرعت برشی
τ	تنش برشی

۶. مراجع

- [۱]. صابری مقدم، علی؛ اکبر آبادی، مرتضی؛ "مستندات پروژه ی پیشرانه های ژل، جلد اول: پیشرانه های ژل"، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۵.
- [2]. Natan, B., and Rahimi, S., "The status of Gel Propellants in Year 2000", in K. K. Kuo and L. deluca (ed), Combustion of Energetic Materials, pp. 172-194, Begell House, Boca Raton,(2002).
- [3]. Sutton. P., "Rocket Propulsion Elements" John Wiley & Sons, New York, 7th ed.,(2001).
- [4]. Coguill, S. L., "Synthesis of Highly Loaded Gelled Proplants, "http://www.resodyn.com/whatsNew/files/35_MicrosoftWord20-AICHEResodyn Final Draft. PDF.(2003).
- [5]. Gupta, B.L., Varma, M. and Munjal, N. L., "Rheological Studies on Virgin and Metallized Unsymmetrical Dimethyl Hydrazine," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 11, No. 2, pp. 45-52, (1986).
- [6]. Munjal, N.L., Gupta, B.L. and Varma, M., "Preparative and Mechanistic Studies on Unsymmetrical Dimethyl Hydrazine - Red Fuming Nitric Acid Liquid Propellant Gels," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 10, No. 4, pp. 111-117, (1985).