

## تأثیر آمونیوم پرکلرات با دو اندازه (درشت و ریز) بر گرانیوی پیشرانه جامد مرکب

سیدمهدی امینی<sup>۱</sup>، محمدحسین کشاورز<sup>۲\*</sup>، محمد قربانی فراز<sup>۳</sup>، علی موسوی آذر<sup>۴</sup>، مهدی آقاییاری<sup>۱</sup>  
۱- کارشناس ارشد ۲- استاد ۳- مربی ۴- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان  
(تاریخ وصول: ۹۳/۰۶/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۸/۲۸)

### چکیده

سوسپانسیون غلیظ بایندر در پیشرانه مرکب پدیده پیچیده‌ای را موجب می‌شود به طوری که کنترل خواص رئولوژیکی پیشرانه را به علت درصد بالای پرکننده دشوار می‌سازد. سوسپانسیون خمیری پیشرانه جامد کامپوزیتی، حاصل اختلاط اجزاء مختلف می‌باشد مانند: اکسید کننده، سوخت و بایندر. افزودن درصد بار جامد بدون افزایش گرانیوی موضوع مهمی در تولید پیشرانه جامد می‌باشد. این مشکل با استفاده از ذرات دو توزیعی قابل حل است. در این تحقیق، پنج نمونه پیشرانه جامد مرکب بر پایه آمونیوم پرکلرات (AP) و پلی‌بوتادیان خاتمه یافته با هیدروکسی (HTPB) با مقدار بار جامد ۸۵ درصد در سیستم دو سایزی تهیه شد. این پنج نمونه در میزان نسبت درشت به ریز از ۸۰ به ۲۰ تا ۶۰ به ۴۰ تفاوت داشتند. از دمای ۴۰ درجه سلسیوس به بالا شرایط نمونه‌ها برای ریختگری و اختلاط مناسب بود و بهترین نسبت برای به دست آوردن حداقل گرانیوی نسبت ۷۰ به ۳۰ (درشت به ریز) بود.

واژه‌های کلیدی: دو سایز، پیشرانه جامد مرکب، HTPB-AP، گرانیوی

## Effect of Double Sizes (Coarse/Fine) Ammonium Perchlorate on the Viscosity of Composite Solid Propellant

S. M. Amini, M. H. Keshavarz\*, M. Ghorbani faraz, A. Mousaviazar, M. Aghayari

Isfahan Malek Ashtar University  
(Received:08/28/2014, Accepted:11/19/2014)

### Abstract

Concentrated suspension of binders in composite propellant causes complex phenomena so that controlling of rheology properties is difficult due to high percentage of fillers. Composite solid propellant contains paste suspension of mixtures of different components, e.g. oxidizer, fuel and binder. Increasing the percentage of solid phase without increment of viscosity is an important subject in the production of solid propellant. This problem can be solved using two different particle sizes distribution. Five samples of composite solid propellants on the basis of hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB) with 85% of solid phase containing dual sizes of ammonium perchlorate (AP) have been prepared. These samples have different coarse/fine ratios between 80/20 to 60/40. It was found that optimum temperature for casting of propellant is greater than 40 °C. The best ratio for obtaining the least viscosity is 70/30 coarse/fine ratio.

**Keywords:** Double size, Composite Solid Propellant, HTPB-AP, Viscosity

\* Corresponding Author E-mail: keshavarz7@gmail.com

## ۱- مقدمه

قابل ملاحظه‌ای در رفتار جریان پیشرانه بازی می‌کنند. سبک و سنگین کردن بین دما و زمان فرآیندپذیری حیاتی است زیرا افزایش دمای ریخته‌گری باعث کاهش در گرانروی ولی افزایش در سرعت پخت می‌شود. بنابراین در صورت عدم وجود این داده‌ها تمایل ویژه به دمای ریخته‌گری پایین‌تر از حد مورد نیاز برای ممانعت از انجام واکنش پخت است که منجر به زمان ریخته‌گری طولی می‌شود.

رئولوژی پیشرانه‌های جامد از سیال غیر نیوتنی پیروی می‌کند یعنی شکل رئوگرام که در آن تنش برشی در برابر سرعت برشی رسم شده است به طور غیرخطی می‌باشد. هندسه گرین، رفتار گرانروی پیشرانه دوغابی و سطح خلاء همه جزء کنترل کیفیت گرین پیشرانه می‌باشد. با این حال خواص جریان پیشرانه دوغابی در داخل قالب به همان اندازه مهم است که منجر به دستیابی به گرین با کیفیت می‌شود. خصوصیات رئولوژیکی دوغاب یک نگرانی مهم در تکنولوژی فرآورش پیشرانه است [۱۷].

## ۲-۱- اثر بارگذاری جامد، اندازه ذرات اکسید کننده

اثر ذرات جامد بارگذاری شده، اندازه ذرات اکسید کننده بر رئولوژی پیشرانه HTPB حاوی ذرات آلومینیم مورد بررسی قرار گرفته و مجموعه آزمایشات زیر انجام شده است [۱۶].

- ۱) درصد بارگذاری جامد در ۸۶٪ ثابت نگه داشته شده ولی اندازه ذرات AP و نسبت درشت به ریز ذرات متغیر بودند.
- ۲) محتویات آلومینیم از ۰ تا ۲۲ درصد تغییر داده شده در حالی که مقدار بارگذاری جامد در ۸۶٪ ثابت باقی مانده اند.
- ۳) مقدار آلومینیم در ۱۸ درصد ثابت شده و کل بار جامد از ۸۰ تا ۸۹٪ تغییر کرده است.

بررسی پارامترهای رئولوژیکی مانند تنش تسلیم، اندیس شبه پلاستیکی، اندیس تغییر شکل پذیری، و اندیس تیکسوتروپی نشان می‌دهد که نسبت بهینه از ذرات درشت به ریز که در آن پیشرانه دوغابی برای مدت طولانی قابل ریخته‌گری می‌ماند به صورت ۳ به ۱ می‌باشد. تنش تسلیم با افزایش بارگذاری جامد افزایش می‌یابد. در میزان بارگذاری جامد ۸۶ تا ۸۸ درصد گرین عاری از نقص خواهد بود. در بارگذاری ۸۶ درصد فرآیندپذیری بهتری صورت خواهد گرفت.

در مقدار ۵ تا ۱۰ درصد آلومینیم تنش تسلیم، اندیس شکل‌پذیری، اندیس شبه پلاستیکی، و اندیس تیکسوتروپی بهترین فرآیندپذیری را نشان داده‌اند. با این حال مقدار بهینه آلومینیم بر حسب سرعت سوزش و ضربه ویژه به جای ملاحظات فرآیندی انتخاب شده است [۱۶].

تأثیر بارگذاری جامد بر رفتار رئولوژیکی پیشرانه جامد کامپوزیتی حاوی آلومینیم مورد مطالعه قرار گرفته [۱۹] و تغییر بارگذاری جامد (صفر تا ۹۰٪) با ثابت نگه داشتن مقدار آلومینیم در ۱۸٪ و اثر زمان پخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده که تا بارگذاری جامد

پیشرانه‌های جامد، شامل فلزات، پلیمرها و اکسید کننده‌های پرکلرات دارای انرژی حجمی بالا هستند بنابراین زمانی که می‌سوزند دود تیره همراه با محصولات بسیار چگال اکسیدهای فلزی تولید می‌کنند. نوع دیگری از پیشرانه‌ها که شامل فلز یا اکسید کننده در سوخت می‌باشند در سطحی پایینتر از انرژی حجمی هستند بطوری که معمولاً شامل پلیمرها و اکسید کننده‌های مانند آمونیوم پرکلرات می‌باشند.

در صورت ایجاد پیشرانه‌هایی که محصولات احتراقشان عاری از محصولات فلزی باشد انرژی حجمی آن کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. در غلظت‌های پایین ذرات پر کننده در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی، فقط اثرات ذرات و سیال را در نظر می‌گیرند اما در درصد بالای ذرات پرکننده، برخورد بین ذرات بیشتر شده تا جایی که سیستم رفتارهای پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهد. این گونه سوسپانسیون‌ها ممکن است دارای یکی از رفتارهای شبه پلاستیکی، تیکسوتروپیک، رئوپکتیک و ویسکوالاستیک باشند و یا چند رفتار را به طور هم‌زمان نشان دهند. پیشرانه جامد کامپوزیتی عمدتاً شامل سوخت بایندر پلیمری، سوخت فلزی مثل پودر آلومینیم و اکسید کننده به طور معمول آمونیوم پرکلرات است [۱۲]. پیشرانه‌های کامپوزیت AP ستون فقرات صنعت نیروی محرکه جامد از حدود ۴۰ سال گذشته بوده است [۱۳]. بایندر پلیمری پیشرانه عموماً شامل پیش پلیمر، عامل پخت، نرم کننده، بهبود دهنده بالستیکی، عامل پیوندی و آنتی‌اکسیدان است. پیشرانه‌های کامپوزیتی بر اساس رزین پلی بوتادی‌ان خاتمه یافته با هیدروکسی (HTPB) در بسیاری از موارد در پیشرانه‌های جامد برای کاربردهای موشک و پرتابه‌ها استفاده شده است [۱۴]. پیشرانه مرکب جامد شامل ۸۰ تا ۹۰ درصد اکسید کننده کریستالی مثل آمونیوم پرکلرات، ۱۰ تا ۱۵ درصد پودر فلزی مثل آلومینیم و بایندر آلی مانند HTPB، CTPB یا پلی بوتادی‌ان اکریلیک اسیداکریلونیتریل (PBAN) است که شکل گرین پیشرانه را تحت تنش و کرنش‌های شدید محیطی در طول حمل و نقل، جابجایی و ذخیره سازی حفظ می‌کند [۱۵]. در تولید پیشرانه جامد به طور کلی HTPB به عنوان بایندر پلیمری و آمونیوم پرکلرات به عنوان اکسید کننده و آلومینیم به عنوان سوخت فلزی استفاده می‌شود [۱۲].

## ۲- رئولوژی پیشرانه‌های کامپوزیتی

عوامل موثر بر گرانروی پیشرانه جامد کامپوزیتی به قرار زیر است: نوع توزیع مواد جامد، اندازه ذرات، شکل و اندازه، سطح بارگذاری جامد، کسر انباشتگی و نرم کننده [۱۶]. رفتار جریان پیشرانه‌های مبتنی بر HTPB اهمیت زیادی دارد زیرا دلیل اصلی در عیب‌های بزرگ بسیاری از موتورهای بزرگ است. چندین پارامتر مثل مواد خام، فرمولاسیون، دمای اختلاط، سطح خلاء، سرعت ریخته‌گری نقش

پیشراشه کامپوزیتی حاوی AP، HTPB و Al و با تغییر درصد در نرم کننده و تولوئن دی‌ایزوسیانات در دماهای مختلف تهیه شده و سپس خواص آن از جمله گرانیوی ساخت، خواص مکانیکی و بالستیکی و حساسیت مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. این تحقیق نشان داده که حضور نرم کننده در مخلوط پیشراشه باعث افزایش شکل‌پذیری و روانروی شده و دمای  $T_g$  را کاهش می‌دهد. با کاهش DOA ویسکوزیته افزایش می‌یابد و با افزایش دما گرانیوی کاهش می‌یابد در درجه حرارت بالاتر بخش‌های گره خورده از رزین HTPB جدا شده و نیروی بین بخش‌های رزین کاهش یافته و گرانیوی کاهش می‌یابد. افزایش در گرانیوی مخلوط در سطوح پایین از نرم کننده به علت عدم وجود اثر پوشش نرم کننده است. کاهش گرانیوی در دمای بالا، عمدتاً به دلیل تحریک زنجیر HTPB است بدین گونه که باعث کاهش در چسبندگی بخش‌های HTPB و کاهش سرعت واکنش بین OH و NCO می‌شود. DOA به عنوان یک نرم کننده با نفوذ بین مولکول‌های پلیمر و تضعیف نیروی چسبندگی بین آن‌ها و افزایش تحرک زنجیرهای پلیمر، باعث کاهش گرانیوی می‌شود. طبق مشاهدات انجام شده حضور نرم کننده باعث بهبود کیفیت فرآیندپذیری، افزایش طول، خواص مکانیکی و گرانیوی ساخت پیشراشه می‌شود. و نیز با افزایش DOA سرعت سوزش کاهش می‌یابد. مخلوطی که دارای صفر درصد DOA است، دارای حساسیت بالایی نسبت به ضربه و اصطکاک می‌باشد. مخلوطی که شامل ۴/۰۵ درصد DOA می‌باشد، دارای حداقل حساسیت می‌باشد.

#### ۲-۴- اثر سرعت و زمان هم زدن

اثر سرعت و زمان هم زدن نیز بر رئولوژی پیشراشه HTPB بررسی شده است [۷]. مقدار تنش تسلیم روند صعودی را در تمام سرعت‌ها و فواصل زمانی پس از افزودن عامل پخت را نشان داده است و دلایلی برای آن عنوان شده است:

الف) در سرعت‌های اختلاط بالاتر، مقدار ذرات AP خرد شده افزایش می‌یابد، تولید بیشتر و بیشتر ذرات ریز AP منجر به افزایش در گرانیوی می‌شود.

ب) در سرعت اختلاط بالاتر، احتمال جابجایی عمده دوغاب بجای عمل برش بیشتر است که منجر به افزایش گرانیوی می‌شود.

گزارش شده که با توجه به ورودی‌های رئولوژیکی، زمان اختلاط برای فرمولاسیون‌های پیشراشه HTPB می‌تواند در ۱۸۰ min در سرعت اختلاط ۲۵:۱۸ rpm ثابت نگه داشته شود و با افزایش زمان اختلاط واکنش پخت قالب می‌شود [۷].

#### ۳- بخش تجربی

سنجش رئولوژی با استفاده از دستگاه رئومتر MCR300 مربوط به شرکت Anton paar انجام گرفت. این رئومتر از گروه رئومترهای دو

۷۸٪، دوغاب رفتار نیوتنی را نشان می‌دهد و مقدار  $n$  برابر واحد است. از طرف دیگر در محدوده ۷۸٪ - ۸۶٪ بارگذاری جامد دوغاب رفتار ویسکوپلاستیک وابسته به زمان با  $n$  کوچکتر از یک داشته و مقدار محدود تنش تسلیم را نشان داده است. در مقادیر بالاتر از ۸۶٪، مشخصات تیکسوتروپی، طبیعت وابسته به زمان را نشان داده است. دوغاب تا مقدار بارگذاری جامد ۸۹٪ جریان پذیر بوده و بالاتر از آن به صورت کلوخه‌های ناهمگن و ناچسبیده دیده شده است. بهترین زمان فرآیندپذیری برای این پیشراشه ۴ تا ۵ ساعت در دمای ۴۰ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. برای پیشراشه با مقدار بارگذاری ۸۶٪، نسبت ۸۰ به ۲۰ از ذرات درشت به ریز، ذرات دو سایزی آمونیم پرکلرات مقدار مطلوبی بوده و برای ذرات سه سایزی درصد بارگذاری تا ۹۰٪ رسیده است [۹].

#### ۲-۲- اثر دما

اثر دما نیز بر روی خواص رئولوژیکی پیشراشه کامپوزیتی بررسی شده است [۱۰]. افزایش دما دو نتیجه زیر را بر گرانیوی نشان می‌دهد:

۱) افزایش حجم آزاد که باعث افزایش جهش فعال رشته‌های کوچک در حالت تعادلی شده که باعث کاهش در گرانیوی می‌شود.

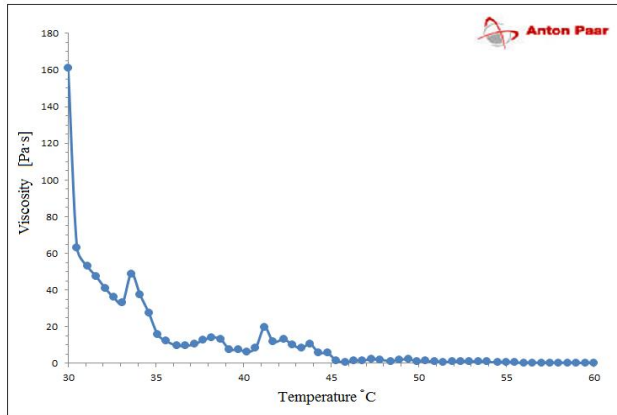
۲) شتاب دادن به واکنش پخت و در نتیجه ایجاد پیوندهای عرضی در زنجیرهای مولکولی که باعث ایجاد ساختار سه بعدی شده که در نتیجه باعث افزایش گرانیوی می‌شود.

پیشراشه دوغابی HTPB بعد از افزودن عامل پخت در بازه دمایی ۴۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، تقریباً رفتار غیر نیوتنی داشته و جاری شدن بیشتر وابسته به زمان بوده است. اندیس تیکسوتروپی می‌تواند به عنوان یک پارامتر به نمایندگی از وابستگی زمانی مطرح شود. دوغاب یک مقدار بازده معین در تمام دماها را نشان داده است. بعد از افزودن عامل پخت روانروی دوغاب با دما افزایش یافته اما بعد به علت انجام واکنش پخت کاهش می‌یابد. دوغاب بعد از افزودن عامل پخت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تا ۵ ساعت جریان پذیر است که دمای بهینه فرآیندپذیری دوغاب می‌باشد. مقدار تنش تسلیم و گرانیوی در هر زمان شامل ترکیب اصلی بدون واکنش پخت و ترکیب حاوی عامل پخت است. این مؤلفه‌ها به وسیله روش برون‌یابی محاسبه شده است.

وابستگی دمای سرعت واکنش پخت نیز مورد مطالعه قرار گرفته و محاسبه انرژی فعال‌سازی پخت برای یک دوره ۶ ساعته با فاصله یک ساعته نشان داده که انرژی فعال‌سازی با زمان پخت تا ۳ ساعت افزایش می‌یابد و بعد از آن به یک مقدار تقریبی می‌رسد. آزمایشات ثابت سرعت برشی در پیشراشه دوغابی HTPB نیز انجام شده و رفتار نوسانی از خود نشان داده و دلیل آن به وسیله پخت و تخریب ساختار سه بعدی توسط برش تشخیص داده شده است. با این حال اثر کلی، افزایش تنش برشی و یا گرانیوی با گذشت زمان گزارش شده است [۱۰].

#### ۲-۳- اثر نرم کننده

میزان انتخاب شده و سرعت برشی باید کمتر از میزان انتخاب شده باشد.



شکل ۱- تغییرات گرانی بر حسب دما برای نمونه دوم به منظور تعیین بهترین فاصله بین صفحات دستگاه رئومتر.

سرعت برشی برای هماهنگی بیشتر با سرعت اختلاط پیشران به میزان ۲۴ دور بر دقیقه یا به عبارتی  $0.4S^{-1}$  انتخاب شد و نیز فاصله بین صفحات به دو میلی متر افزایش یافت بطوری که نتایج به دست آمده از این تغییرات به صورت مطلوب و قابل استناد بودند. نمونه‌های تهیه شده در سرعت برشی  $0.4S^{-1}$ ، فاصله بین صفحات ۲ میلی متر و مدت زمان ۳۰ دقیقه در بازه دمایی ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش رئومتری قرار گرفتند. لازم به ذکر است که تغییرات دمایی به صورت خطی بوده که در هر ۳۰ ثانیه دستگاه رئومتر یک نقطه در رئوگرام ثبت می‌کرد. سیستم سنجش در کل نمونه‌ها PP 25 d=READ می‌باشد. مشخصات پنج نمونه تهیه شده به شرح جدول ۱ می‌باشد:

جدول ۱- مشخصات پنج نمونه پیشران مرکب.

نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	اجزاء پیشران
نمونه پنجم	نمونه چهارم	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	فاز بایندری
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	AP درشت (400:m)
۵۱	۵۵/۲۵	۵۹/۵۰	۶۳/۷۵	۶۸	AP ریز (20:m)
۳۴	۲۹/۷۵	۲۵/۵۰	۲۱/۲۵	۱۷	

#### ۴- نتایج و بحث

نتایج بررسی تنش برشی و گرانی برای نمونه‌ها بر حسب تغییرات دما به شرح زیر می‌باشد.

**نمونه اول:** در این نمونه نسبت اندازه ذرات درشت به ریز ۸۰ به ۲۰ می‌باشد. تنش برشی بین ۳۱۷۰-۲۱۵ پاسکال متغیر بود. گرانی برای این نمونه بین بازه ۶۹۸۰-۵۴۹ پاسکال ثانیه با تغییرات دما متغیر بود. گرانی شروع برابر ۶۹۸۰ پاسکال ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس

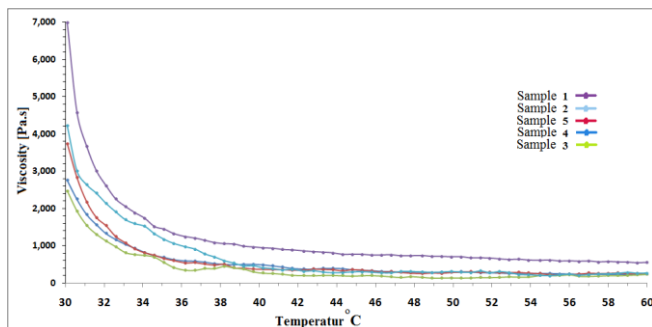
صفحه موازی و نوع چرخشی می‌باشد. این دستگاه شامل دو صفحه موازی هم محور به جنس استیل زنگ نزن می‌باشد که با تعیین فاصله مناسب با توجه به نوع نمونه نسبت به هم قرار می‌گیرند. صفحه زیرین ثابت بوده و صفحه بالا متحرک می‌باشد که با انتخاب میزان سرعت گردش بر حسب دور بر دقیقه با توجه به نوع نمونه می‌توان آن را مورد آزمایش قرار داد. این دستگاه قادر به ثبت گرانی، تنش برشی و گشتاور چرخشی همراه با تغییرات دما به صورت خطی می‌باشد. بارگذاری نمونه در این دستگاه توسط یک کاردک مناسب انجام شده و پس از قرار گرفتن نمونه بر روی فک پایین، صفحه بالا آرام در موقعیت از پیش تعیین شده قرار می‌گیرد و با رسیدن به یک حالت پایدار و دمای مورد نظر با دستور اپراتور شروع به کار می‌کند. پیشران مورد بررسی از نوع مرکب بر پایه HTPB (۱۵٪) و شامل اکسید کننده دو سائیزی AP (۸۵٪) بود.

در این پروژه از هم زن خورشیدی با تیغه‌های عمودی با سرعت اختلاط ۱۲ تا ۲۴ دور بر دقیقه استفاده شده است. پارامترهای دیگر موثر بر خواص رئولوژیکی که در بالا به آن‌ها اشاره شد در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. اندازه ذرات در اینجا ثابت بوده و فقط نسبت ذرات درشت به ریز مورد بررسی قرار گرفته است که برای ذرات ریز از ۲۰ میکرومتر و ذرات درشت از اندازه ۴۰۰ میکرومتر استفاده شده است. در این راستا با ثابت نگه داشتن درصد اجزا و پارامترهای مختلف، به جز نسبت اندازه ذرات، ۵ نمونه از این پیشران برای انجام آزمایش رئومتری تهیه شد. این نمونه‌ها در شرایط یکسان در آزمایشگاه پلیمر پژوهشکده رنگ توسط دستگاه رئومتری مورد سنجش قرار گرفت. برای تعیین سرعت برشی و فاصله بین صفحات مناسب در ابتدا فاصله بین دو صفحه دستگاه که مسطح و موازی هستند به میزان یک میلی متر و سرعت برشی به میزان  $10S^{-1}$  قرار گرفت و نمونه دوم مورد سنجش واقع شد.

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که بلافاصله پس از شروع آزمایش در ۳۰ ثانیه اول افت شدیدی در گرانی نمونه حاصل می‌شود و نیز در دماهای بالای ۴۵ درجه، طبق نمودار ۱، گرانی نمونه به صفر میل می‌کند که نتیجه‌ای غیر واقعی است. به دلیل کم بودن فاصله بین صفحات رئومتر فضای کافی جهت لغزش ذرات بر روی همدیگر وجود نداشته به همین دلیل چند پیک اتفاقی در نمودار ظاهر می‌شود.

پس از اتمام تست و پس از جدا کردن صفحه متحرک از روی نمونه، مشاهده شد که ذرات درشت به اطراف و خارج از محدوده آزمایش به علت نیروی گریز از مرکز بالا و فاصله کم بین صفحات رانده شده بودند. وقتی فاصله بین صفحات کم باشد به ذرات پراکنده اجازه لغزش بر روی یکدیگر داده نمی‌شود و نیز نیروی گریز از مرکز بالا باعث می‌شود ذرات سنگین به طرف بیرون حرکت کرده و از محدوده مورد نظر خارج شوند. پس با توجه به این که اندازه ذرات پراکنده در این نمونه‌ها بزرگ می‌باشد، نتیجه گرفته شد که فاصله بین صفحات باید بزرگ‌تر از

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات گرانشی هر پنج نمونه با دما می‌باشد. مشاهده می‌شود که گرانشی نمونه‌ها با افزایش دما از ۳۰ درجه سلسیوس تا حدود ۴۰ درجه سلسیوس رو به کاهش با شیب قابل ملاحظه‌ای می‌باشد، ولی از حدود دمای ۴۰ درجه سلسیوس به بالا، نمودار گرانشی - دما با یک شیب بسیار کندی در حال کاهش است. با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص این مبحث و داده‌های مربوط به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که بهترین دمای اختلاط و ریختگری دمای ۴۰ درجه سلسیوس می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه تغییرات گرانشی نمونه‌های مختلف با دما.

برای رسیدن به اختلاط مناسب در پیش‌رانه، دانستن تنش برشی آغازی برای اختلاط مورد نیاز است و نیز سیر تغییرات گرانشی متناسب با تنش برشی می‌باشد. شکل‌های ۳ و ۴ بیانگر میزان گرانشی آغازی و نیز تنش برشی اعمال شده برای شروع اختلاط در پنج نمونه مورد مقایسه هستند. مشاهده می‌شود که گرانشی و تنش برشی آغازی مربوط به نمونه شماره ۳ که دارای نسبت توزیع ذرات درشت به ریز با مقدار ۷۰ به ۳۰ می‌باشد، دارای کم‌ترین مقدار است.

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که نمونه شماره ۱ دارای بیشترین گرانشی در بازه دمایی مورد سنجش بوده و حاوی ۸۰ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات درشت می‌باشد. نمونه‌های شماره ۲ با ۷۵ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات درشت، شماره ۵ با ۶۰ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات درشت و شماره ۴ با ۶۵ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات درشت به ترتیب دارای گرانشی کمتری نسبت به نمونه قبلی می‌باشند. در نهایت، نمونه شماره ۳ دارای کم‌ترین گرانشی در تمام بازه دمایی (۶۰-۳۰ درجه سلسیوس) است. این نمونه دارای ۳۰ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات ریز (۲۰ میکرومتر) و ۷۰ درصد وزنی آمونیوم پرکلرات درشت (۴۰۰ میکرومتر) می‌باشد.

با مقایسه سیر تحولات انجام گرفته شده مشاهده می‌شود که هرچه میزان ترکیب درصد ذرات درشت نسبت به ریز از مقدار ۷۰ به ۳۰ فاصله می‌گیرد، مقدار گرانشی نسبت به نمونه شماره ۳ افزایش می‌یابد. این افزایش در گرانشی تأثیر منفی بر روی کیفیت، اختلاط و ریختگری پیش‌رانه خواهد داشت.

بود که پس از طی زمان این مقدار به حدود ۸۰۰ پاسکال ثانیه در دمای بین ۴۵ - ۴۰ درجه سلسیوس رسید و پس از آن با افزایش دما تغییرات کوچکی در گرانشی، به صورت نوسانی صورت گرفت.

**نمونه دوم:** در این نمونه نسبت اندازه ذرات درشت به ریز ۷۵ به ۲۵ بود. تنش برشی بین ۱۷۸۰ - ۷۸/۳ پاسکال به طور تقریبی متغیر بود. گرانشی این نمونه نیز بین بازه ۴۲۲۰ - ۱۹۶ پاسکال ثانیه با تغییرات دما متغیر بود. گرانشی شروع برابر ۴۲۲۰ پاسکال ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس است که پس از طی زمانی این مقدار به حدود ۳۰۰ پاسکال ثانیه در دمای بین ۴۵ - ۴۰ درجه سلسیوس رسید و پس از آن با افزایش دما تغییرات کوچکی در گرانشی صورت گرفت.

**نمونه سوم:** در این نمونه نسبت اندازه ذرات درشت به ریز ۷۰ به ۳۰ بود. تنش برشی جهت انجام آزمایش بین ۱۰۰۰ - ۵۴/۶ پاسکال به طور تقریبی متغیر بود. گرانشی این نمونه نیز بین بازه ۲۴۷۰ - ۱۳۷ پاسکال ثانیه با تغییرات دما متغیر می‌گردد. گرانشی شروع برابر ۲۴۷۰ پاسکال ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس بود که پس از طی زمانی این مقدار به حدود ۲۰۰ پاسکال ثانیه در دمای بین ۴۵ - ۴۰ درجه سلسیوس رسید و پس از آن با افزایش دما تغییرات کوچکی در گرانشی، به صورت نوسانی صورت گرفت.

**نمونه چهارم:** در این نمونه نسبت اندازه ذرات درشت به ریز ۶۵ به ۳۵ بود. تنش برشی بین ۱۱۲۰ - ۹۳/۳ پاسکال به طور تقریبی متغیر بود. گرانشی این نمونه نیز بین بازه ۲۷۶۰ - ۲۳۳ پاسکال ثانیه با تغییرات دما متغیر می‌گردد. گرانشی شروع برابر ۲۷۶۰ پاسکال ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس بود که پس از طی زمانی این مقدار به حدود ۳۵۰ پاسکال ثانیه در دمای بین ۴۵ - ۴۰ درجه سلسیوس رسید و پس از آن با افزایش دما تغییرات کوچکی در گرانشی صورت گرفت.

**نمونه پنجم:** در این نمونه نسبت اندازه ذرات درشت به ریز ۶۰ به ۴۰ بود. تنش برشی بین ۱۵۴۰ - ۸۷/۹ پاسکال به طور تقریبی متغیر بود. گرانشی این نمونه نیز بین بازه ۳۷۴۰ - ۲۲۰ پاسکال ثانیه با تغییرات دما متغیر می‌گردد. گرانشی شروع برابر ۳۷۴۰ پاسکال ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس بود که پس از طی زمانی این مقدار به حدود ۳۷۰ پاسکال ثانیه در دمای بین ۴۵ - ۴۰ درجه سلسیوس رسید و پس از آن با افزایش دما تغییرات کوچکی در گرانشی صورت گرفت.

در تمام نمونه‌ها، در شروع به علت گرانشی بالا، تنش وارد شده بیشتر بود ولی پس از گذشت زمان از مقدار آن کاسته شد، که امری بدیهی است.

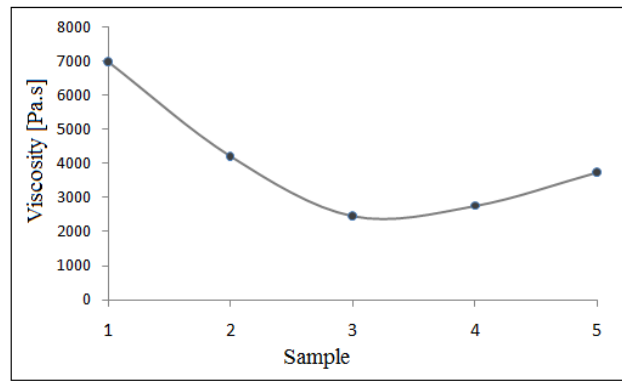
با افزایش دما، گرانشی کاهش می‌یابد ولی ایجاد تغییر دما در نمونه‌هایی با مقادیر بزرگ‌تر بسیار مشکل بوده و هزینه و زمان زیادی را می‌طلبد. از طرف دیگر، افزایش زمان ریختگری به همراه افزایش دما باعث کاهش فرآیندپذیری پیش‌رانه شده و در نتیجه باعث کاهش طول عمر پیش‌رانه می‌شود. ولی رسیدن به دمای حدود ۴۰ درجه سلسیوس کار چندان دشواری نمی‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

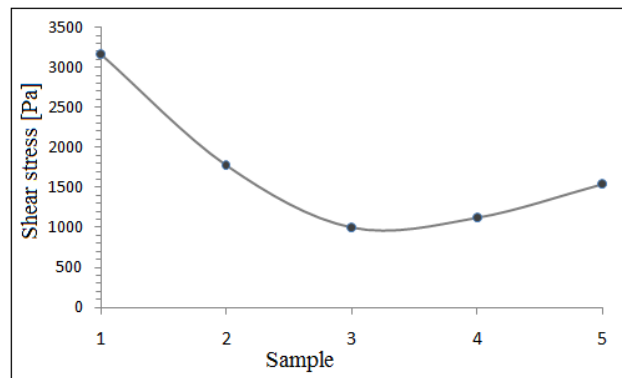
با توجه به هدف مبنی بر رسیدن به میزان بارگذاری ۸۵ درصدی پیشرانه جامد مرکب، و نیز رسیدن به مقدار گرانیوی، سیستم دو سایی مورد بررسی قرار گرفت و ایجاد تغییراتی پیرامون میزان نسبت ذرات درشت به ریز و با بررسی پنج نمونه پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB و AP دو سایی (۸۵٪) برای رسیدن به نمونه‌ای مناسب از جهت رئولوژی، ریختگری و دمای اختلاط به نتایج زیر رسیدیم. برای رسیدن به یک نتیجه مناسب برای دمای اختلاط در مرحله عملیاتی در مقادیر زیاد، مناسب‌ترین دما، دمایی است که از یک طرف رسیدن به آن در مقادیر زیاد سهل و ممکن باشد و از طرف دیگر، خواص رئولوژیکی پیشرانه در دمای منتخب مناسب باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات مربوط به هر پنج نمونه، در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به بالا، شرایط نمونه برای ریختگری و اختلاط مناسب می‌باشد. افزایش مقدار بار درشت ذرات پرکننده از ۶۰ تا نسبت ۷۰ و کاهش مقدار بار درشت ذرات پرکننده از ۸۰ تا ۷۰ مقدار گرانیوی کاهش می‌یابد و کم‌ترین گرانیوی مربوط به میزان نسبت ۷۰ به ۳۰ می‌باشد.

## مراجع

- [1] Hope, L.; Baumann, R. P. "High Volumetric Energy Smokeless Solid Rocket Propellant"; US Patent 3,943,209, 1976.
- [2] Erisken, C.; Goomez, A.; Yilmazer, U.; Pekel, F.; Ozkar, S. "Modeling and Rheology of HTPB Based Composite Solid Propellant"; Polym. Compos. 1998, 4, 19.
- [3] Taylor, R. H.; Harvest, Jr. "Controlled Burn Rate, Reduced Smoke, Solid Propellant Formulation"; US Patent 5,334,270, 1994
- [4] Mahanta, A. K.; Dharmasakti, I.; Pattmayak, P. K. "Rheological Behavior of HTPB-based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate"; Defence Sci. J. 2007, 4, 435-442.
- [5] Bandgar, B. M.; Krishnamurthy, V. N.; Mukundan, T.; Sharma, K. C. "Mathematical Modeling of Rheological Properties of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Binder and DioctylAdipate Plasticizer"; J. Appl. Polym. Sci, 2002, 85, 1002-1007 .
- [6] Muthiah, R. M.; Krishnamurthy, V. N.; Gupta, B. R. "Rheology of HTPB Propellant. 1. Effect of Solid Loading, Oxidizer Particle Size, and Aluminum Content"; J. Appl. Polym. Sci. 1992, 44, 2043-2052.
- [7] Muthiah, R. M.; Manjari, R.; Krishnamurthy, V. N.; Gupta, B. R. "Rheology of HTPB Propellant: Effect of Mixing Speed and Mixing Time"; Defence Sci. J. 1993, 2, 167-172.
- [8] Muthiah, R. M.; Krishnamurthy, V. N.; Gupta, B. R. "Rheology of HTPB Propellant: Development of Generalized Correlation and Evaluation of Pot Life"; Propellants, Explos., Pyrotech. 1996, 21, 186-192.
- [9] Muthiah, R. M.; Manjari, R.; Kyrishnamurth, V. N.; Gupta, B. R. "Effect of Temperature on the Rheological Behavior of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Propellant Slurry"; Polymer Engineering and Science 1991, 2, 31.
- [10] Jawalkar, S. N.; Ramesh, K.; Radhakrishnan, K. K.; Bhattacharya, B. "Studies on the Effect of Plasticizer and Addition of Toluene Diisocyanate at Different Temperatures in Composite Propellant Formulations"; J. Hazard. Mater. 2009, 164, 549-554.

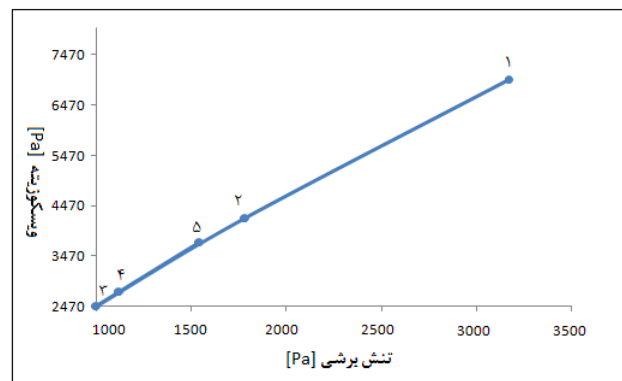


شکل ۳- مقایسه گرانیوی شروع اختلاط نمونه‌ها.



شکل ۴- مقایسه تنش برشی شروع اختلاط نمونه‌ها.

تغییرات تنش برشی آغازین بر گرانیوی آغازین مربوط به پنج نمونه نشان می‌دهد که تغییرات مربوط به این دو مولفه در نمونه‌ها بصورت خطی می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- تغییرات تنش برشی آغازین بر گرانیوی آغازین.