

# تأثیر دانه‌بندی آمونیوم پرکلرات بر ویژگی‌های مکانیکی پیشرانه بر پایه رزین گلسیدیل آزید پلیمر

سعید بابایی\*

مجتمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

**چکیده:** پیشرانه‌های جامد مرکب دارای ذره‌های آلومینیوم (Al)، آمونیوم پرکلرات (AP) و رزین گلسیدیل آزید پلیمر (GAP) به‌عنوان پیشرانه‌های پرنرزی در انواع گوناگون موشک‌ها و راکت‌ها به‌کار می‌روند. انتخاب اندازه ذره‌ها و نوع دانه‌بندی در فرمولاسیون پیشرانه‌ها، با تغییر در گرانش و ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر پیشران، بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی فرآورده‌ی پایانی تأثیر به‌سزایی دارد. در این مقاله افزون بر معرفی کلاس‌های گوناگون پیشرانه با دانه‌بندی‌های گوناگون، نمونه‌های پیشرانه جامد مرکب Al-AP/GAP تهیه و ضمن مقایسه ویژگی‌های آن‌ها، پیشرانه با کلاس بهینه معرفی شد. نتیجه‌ها نشان داد که بهترین ویژگی مکانیکی مربوط به پیشرانه دارای سه نوع دانه‌بندی گوناگون از AP (۲۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ میکرون) بوده است. ویژگی‌های مکانیکی این نمونه در شرایط بهینه با مدول ۱۶٫۴ یانگ ۱۶٫۴ مگاپاسکال (MP)، تنش تسلیم ۰٫۴۹ MP، کرنش تسلیم ۱۲٪، تنش در شکست ۲٫۱۰ MP، کرنش در شکست ۲۰٪، چقرمگی ۲۸٫۸ kJ/m<sup>۳</sup> و سختی Shore A ۶۴ به‌دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** پیشرانه جامد مرکب؛ آمونیوم پرکلرات؛ گلسیدیل آزید پلیمر؛ دانه‌بندی؛ ویژگی‌های مکانیکی.

**KEYWORDS:** Composite solid propellant; Ammonium perchlorate; Glycidyl azide polymer; Grading; Mechanical properties.

## مقدمه

در فرایند ساخت این پیشرانه‌ها نوع، مقدار، شکل، اندازه ذرات و دانه‌بندی سوخت فلزی و اکسیدکننده، نوع و مقدار سامانه چسباننده همراه با سایر شرایط پخت و فرایند ساخت از عامل‌های مهم تولید می‌باشند [۳]. از آنجایی که ساختار اجزای سوخت و اکسیدکننده متفاوت بوده و روی یک مولکول قرار ندارند در نتیجه بایستی توسط یک سامانه چسباننده در کنار هم نگهداری شوند. در این بین پارامترهای شکل، اندازه و دانه‌بندی ذرات اهمیت خاصی پیدا کرده که کیفیت (ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی)

پیشرانه‌های جامد مرکب<sup>(۱)</sup> (کامپوزیتی) با کاربرد گسترده در صنایع نظامی از سه جزء اصلی سوخت فلزی (۱۷-۰)، اکسیدکننده (۸۵-۶۸) و یک سامانه چسباننده<sup>(۲)</sup> (۱۶-۱۰) درصد وزنی همراه با سایر افزودنی‌هایی مانند نرم‌کننده، عامل‌های پیوندی، شبکه‌کننده، اصلاحگرهای بالستیکی، کاتالیزگرهای نرخ سوزش و غیره بسته به نوع ماموریت ساخته می‌شوند [۱، ۲]. به طور معمول پیشرانه‌های کامپوزیتی دارای مقدار بار جامد بیش از ۸۶٪ شامل ذره‌های آلومینیوم (Al) و آمونیوم پرکلرات (AP) می‌باشند.

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail:safnba@gmail.com

(۱) Composite propellants

(۲) Binder

با تولوئن دی‌ایزوسیانات پخت شده و به الاستومری با ویژگی‌های مکانیکی متوسط تبدیل می‌شود [۱۴-۱۲].

پیشرانه‌های بر پایه GAP (پرسیده با بیش از ۷۰٪ بار جامد) دارای ایمپالس ویژه بالاتری از پیشرانه‌های بر پایه رزین HTPB (پرسیده با ۸۸٪ بار جامد) می‌باشند [۱۵]. شبکه چسباننده بر پایه GAP را می‌توان با افزودن پلیمرهای خطی و انعطاف‌پذیر مانند پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌کاپرولاکتون بهبود بخشید. در این باره افزایش نرم‌کننده تأثیری بر واکنش پخت ندارد ولی دمای انتقال شیشه‌ای ( $T_g$ ) را تا ۴۷- درجه سلسیوس کاهش می‌دهد که این مقدار برای تولید یک پیشرانه غیرکشسان مناسب است [۲۱-۱۶]. در ساخت یک پیشرانه تک کلاسه تنها از یک اندازه ذره اکسیدکننده جامد (به عنوان نمونه تنها ۱۰۰ میکرون) استفاده می‌شود. پیشرانه دو کلاسه حاوی دو اندازه ذره متفاوت از اکسیدکننده و یک پیشرانه سه کلاسه شامل سه اندازه ذره گوناگون می‌باشد. در پیشرانه‌های دو کلاسه مقدار گرانیوی و دانسیته رابطه‌ی وارون دارند در حالیکه در پیشرانه‌های سه کلاسه این مقادارها به یک حالت بهینه می‌رسد [۱۶].

با کاهش اندازه ذره‌ها در پیشرانه‌های با کلاس گوناگون، رشد مساحت سطحی ذره‌ها منجر به افزایش درصد حجمی بار جامد می‌شود. بنابراین در این پیشرانه‌ها مقدار باینر کمتری برای مرطوب‌سازی پودر جامد به کار رفته و با افزایش گرانیوی مخلوط دوغابی<sup>(۶)</sup> (خمیر)، ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی فرآورده‌ی پایانی بهبود می‌یابد [۲۲]. تأثیر اندازه ذره‌ها AP در پیشرانه‌های جامد کامپوزیتی بر چگالی خمیر و پارامترهای بالستیکی نشان می‌دهد که با افزایش متوسط اندازه ذره، گرانیوی این خمیر کاهش می‌یابد [۱۸]. بنابراین ذره‌ها با متوسط اندازه ذره بزرگتر منجر به فاکتور شکل‌پذیری بالاتر، گرانیوی پایان اختلاط<sup>(۷)</sup> کم‌تر و نرخ سوزش پایین‌تری در فرآورده‌ی پایانی می‌شود. در این راستا استحکام تنشی پیشرانه کاهش و کرنش آن افزایش می‌یابد [۱۹]. در این پیشرانه‌ها دو گرید گوناگون APAPEP-1 و PCLAP-2 از آمونیوم پرکلرات کاربرد گسترده‌ای داشته که گرید دوم دارای ویژگی‌های فشرده‌سازی بهتر بوده و دانسیته، ویژگی‌های مکانیکی و نرخ سوزش را در فرآورده‌ی نهایی بهبود می‌دهد [۱۹-۱۷].

پیشرانه را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین به منظور بهبود فرایندپذیری و کیفیت فرآورده‌ی نهایی بایستی اندازه و دانه‌بندی این ذره‌ها بهینه شوند [۴-۶].

اندازه و توزیع اندازه ذره‌های ترکیب اکسیدکننده با توجه به مقدار بالای آن در پیشرانه کامپوزیتی، اثر چشمگیری بر روی کسر انباشتگی<sup>(۱)</sup> آن دارد. کسر انباشتگی میزان بار جامد است که داخل یک حجم کمینه فشرده می‌شود. در این زمینه کسر انباشتگی با تغییر فاکتورهای بلورینگی، اندازه و دانه‌بندی ذره‌ها و همچنین به‌وسیله بخش چسباننده مورد استفاده تغییر می‌کند. ویژگی‌های رئولوژیکی و ویسکوالاستیک پیشرانه نیز به کسر انباشتگی بار جامد بستگی دارد و به دنبال آن ویژگی‌های مکانیکی (مدول یانگ، استحکام کششی، کرنش، چقرمگی و سختی) آن تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ترکیب‌های با خصوصیت فشرده‌شدگی بیش‌تر دارای کسر انباشتگی بالاتر، گرانیوی پایین‌تر و سرانجام ویژگی‌های مکانیکی دلخواه‌تری می‌باشند [۸-۵].

برای اولین بار در سال ۱۹۳۷ میلادی مالینا<sup>(۲)</sup> از دانشگاه صنعتی کالیفرنیا پژوهش‌های خود را بر روی روش‌های ساخت و با هدف بهبود عملکرد پیشرانه‌های موشکی آغاز نمود [۹]. در سال ۱۹۶۰ میلادی مانجاری<sup>(۳)</sup> از مرکز فضایی هند برای اولین بار مطالعات بر روی یکپارچگی<sup>(۴)</sup> فرمولاسیون پیشرانه‌های پلی‌یورتان را انجام داد [۱۰]. وی در سال ۱۹۹۳ میلادی ویژگی‌های مکانیکی پیشرانه‌های کامپوزیتی را بررسی نمود و سرانجام به این نتیجه رسید که ویژگی‌های مکانیکی دلخواه برای پیشرانه‌های پلی‌یورتانی ریخته‌گری به‌صورت استحکام کششی برابر با ۷-۸ kgf/cm<sup>2</sup>، میزان کشیدگی ۵۰-۴۰ درصد و مدول اولیه ۴۰-۵۰ kgf/cm<sup>2</sup> می‌باشد [۱۱].

رزین گلیسیدیل آزید پلیمر (GAP) برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط وان دنبرگ<sup>(۵)</sup> از واکنش سدیم آزید با پلی‌ایپیکلوهیدرین در دی‌متیل فرمامید تری‌ال تهیه شد (شکل ۱). GAP به دلیل داشتن گروه‌های انرژی‌زای آزیدی در مقایسه با دیگر رزین‌ها مانند پلی‌بوتادی‌ان با هیدروکسیل انتهایی (HTPB) دارای دانسیته بیش‌تر و گرمای تشکیل مثبت بزرگ‌تری است. این ترکیب با وزن مولکولی متوسط ۲۰۰۰ g/mol در بازه‌ی گسترده‌ای از دما مایع بوده و به سادگی در دمای ۵۵-۵۰ درجه سلسیوس

(۱) Packing fraction

(۲) Malina

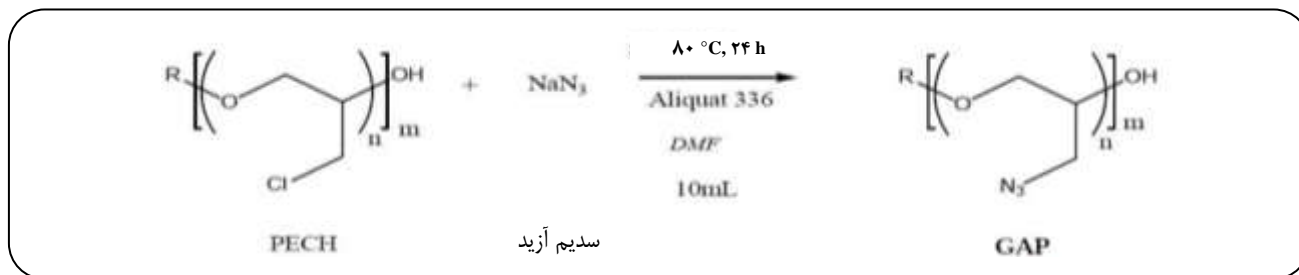
(۳) Manjari

(۴) Tailoring

(۵) Van denberg

(۶) Slurry

(۷) End of mixture



شکل ۱- سنتز شماتیک رزین GAP [۱۴].

متیل‌آزبریدین فسفین اکسید (MAPO) فراورده‌ی دانشگاه صنعتی مالک اشتر استفاده شد. نرم‌کننده دی‌اکتیل آدیپات (DOA)، عامل پخت تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI)، کاتالیست پخت دی‌بوتیلن تین دی‌لاورات (DBTDL) و تری‌فنیل بیسموت (TPB)، گستراننده زنجیر دی‌اتیلن گلیکول (DEG)، شبکه‌کننده تری‌متیلول پروپان (TMP)، سوخت فلزی آلومینیوم (Al) و اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات (AP) از شرکت مرک (Merck) خریداری شدند.

#### تجهیزات

تهیه نمونه (به شکل دمبل) و آزمون کشش توسط سامانه ZWICK-Z050 آلمان بر مبنای استاندارد NATO [۲۴] با سرعت ۳ mm/min انجام شد. برای انجام آزمون سختی از دستگاه دیورومتر مدل OS-2 مطابق استاندارد ASTM D2240 استفاده شد. برای مخلوط کردن اجزاء اولیه از یک هم‌زن مکانیکی Heidolph-RZR2041 همراه با راکتور تحت خلاء شیشه‌ای (فراورده‌ی کارگاه شیشه‌گری دانشگاه صنعتی مالک اشتر) استفاده شد. برای رطوبت‌گیری مواد از آون Memmert-UNB500. برای گرمادهی در خلاء از آون خلاء Heraeus مدل RVT-360، برای خلاء کردن در حین اختلاط از پمپ خلاء Platinum JB-285N و برای گرمادهی از گرم‌کن Heidolph-MR3004 استفاده شد. توزین مواد نیز با استفاده از ترازوی Mettler-PE6000 با دقت ۰/۱ گرم و ترازوی تجزیه‌ای Sartorius- MP6E با دقت ۰/۱ میلی‌گرم انجام شد.

#### ساخت نمونه‌های پیشرانه

ابتدا برای حذف حباب در پیشرانه‌های تولیدی، اجزای به‌کار رفته شامل جامدها و مایع‌ها پیش از اختلاط به‌وسیله آون خلاء رطوبت‌زدایی شدند. سپس اختلاط مواد در داخل یک ظرف هم‌زن

مطالعه‌ها بر روی شکل ذره‌های AP در این پیشرانه‌ها نشان می‌دهد که ذره‌های کروی نسبت به ذره‌های غیرکروی قابلیت فشرده‌شدگی بیشتر، گرانیوی پایین‌تر و زمان ریخته‌گری<sup>(۱)</sup> بیشتر داشته که منجر به بهبود ویژگی‌های مکانیکی در پیشرانه می‌شود. زمان ریخته‌گری مدت زمان در دسترس برای ریخته‌گری خمیر پیشران تا پیش از فرایند پخت می‌باشد [۲۰]. در این رابطه، ارتباط گرانیوی خمیرهای گوناگون با زمان ریخته‌گری نسبت به اشکال گوناگون AP نشان می‌دهد که در گرانیوی‌های بیش از ۲۰۰ پواز، زمان ریخته‌گری برای شکل کروی افزایش منظمی دارد. بنابراین این افزایش زمان ریخته‌گری منجر به افزایش زمان پخت، همگنی بیشتر و بهبود ویژگی‌های مکانیکی در مقایسه با ذره‌های غیرکروی AP می‌شود [۱۸].

در ارزیابی دانه‌بندی ذره‌های AP، سرعت سوزش به اندازه ذرها و همچنین به دانسیته‌ی فشرده‌شدگی بستگی دارد. در این رابطه دانسیته بیش از ۱/۷ g/cm<sup>3</sup> و گرانیوی کم‌تر از ۹۰۰ پواز مناسب می‌باشند. کم‌ترین سرعت سوزش مربوط به به‌کارگیری ذره‌های درشت در فرمولاسیون و بیش‌ترین آن مربوط به دانه‌بندی متوسط - ریز با نسبت ۱:۱ گزارش شده است. نمودارهای تنش - کرنش برای یک پیشرانه با اندازه ذره‌های بزرگ‌تر، ویژگی مکانیکی ضعیف و نقاط تسلیم مشخص‌تری را نشان می‌دهد [۲۳-۲۱].

در این پژوهش نمونه‌های پیشرانه جامد مرکب AI-AP/GAP با اختلاط‌های گوناگونی از AP (با متوسط اندازه ذرها ۲۰،۱۰۰ و ۲۵۰ میکرون) تهیه و پس از ارزیابی و مقایسه ویژگی‌های مکانیکی، پیشرانه با کلاس بهینه معرفی می‌شود.

#### بخش تجربی

##### مواد شیمیایی

از رزین GAP (جرم مولکولی ۲۰۰۰ g/mol) و عامل پیوندی

(۱) Pot Life

جدول ۱- نمونه‌های پیشرانهای با دانه‌بندی‌های گوناگون.

کد نمونه	اندازه دانه‌بندی AP (میکرون)	ترکیب درصد
GAP <sub>1</sub>	۱۰۰	۱۰۰
GAP <sub>2</sub>	۹۰	۱۰۰
GAP <sub>3</sub>	۲۵۰ و ۱۰۰	۵۰-۵۰
GAP <sub>4</sub>	۲۵۰ و ۱۰۰ و ۲۰	۳۶-۱۴-۵۰

دانه‌بندی‌های متفاوت معمول و ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی در پیشرانهای به دست آمده و سرانجام انتخاب پیشرانه بهینه می‌باشد. نمودارهای تنش- کرنش با استفاده از داده‌های سامانه تنش - کشش در شکل ۲ آورده شده است.

مطابق شکل ۲، نمونه اول از دید طول (کرنش) خیلی زیادی را نشان می‌دهد. این اثر به دلیل حضور AP با دانه‌بندی ۱۰۰ میکرون با کسر انباشتگی پایین می‌باشد که منجر به سطح تماس کم‌تر با عامل‌های پیوندی و ساختمان سیستم چسباننده شده و در نتیجه تنش تسلیم و مدول پایینی به همراه دارد. نمونه دوم به دلیل ریزتر بودن ذره‌های AP دارای کسر انباشتگی بیش‌تر بوده که با افزایش سطح تماس سامانه چسباننده موجب تنش تسلیم بیشتر، مدول بالاتر و کرنش تسلیم کم‌تری نسبت به نمونه اول شده است. نمونه سوم دارای دو دانه‌بندی گوناگون از AP نسبت به دو نمونه پیش، تنش تسلیم بالاتر و ازدیاد طول متعادل‌تری را به دست آورده است. این بدان معنی است که اختلاط دانه‌بندی‌های گوناگون از AP در نمونه پیشرانه منجر به افزایش کسر انباشتگی ذره‌ها شده و در نتیجه استحکام مکانیکی این نمونه نسبت به نمونه‌های اول و دوم بهبود یافته است. سرانجام نمونه چهارم پیشرانه در حضور سه دانه‌بندی گوناگون از AP نسبت به نمونه‌های دیگر تنش تسلیم بالاتر و ازدیاد طول منطقی‌تری داشته است. بنابراین با افزایش تعداد کلاس در نمونه و افزایش کسر انباشتگی، استحکام مکانیکی این نمونه نسبت به نمونه‌های دیگر بهبود یافته است. به منظور ارزیابی عددی و انتخاب پیشرانه برتر، ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از نمودارهای تنش - کرنش محاسبه و نتیجه‌های مربوطه در جدول ۲ آورده لیست شده‌اند.

نتیجه‌های مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهد با توجه به افزایش کلاس AP در پیشرانهای AI-AP/GAP پارامترهای مدول یانگ، تنش تسلیم و چقرمگی در حال افزایش بوده

در خلاء انجام گرفت. برای این منظور، مقدار ۱/۰ گرم رزین GAP در دمای ۵۰ °C روی گرم کن گرما داده شد و در ادامه ۰/۰۱۷ گرم TMP به آن اضافه تا به طور کامل همگن شود. سپس مقدار ۰/۳۶ گرم از DOA به ظرف اختلاط افزوده و به مدت ۱۰ دقیقه به وسیله همزن مکانیکی هم‌زده شد و پس از حباب‌گیری توسط پمپ خلاء، مقدار ۰/۰۳ گرم DEG و ۰/۰۱۴ گرم MAPO افزوده شده و هم‌زدن به مدت ۵ دقیقه دیگر ادامه یافت. در ادامه ۰/۹ گرم AI افزوده شد و پس از هم‌زدن به مدت ۱۵ دقیقه، عمل حباب‌گیری تکرار شد. مقدار ۳/۶ گرم ترکیب AP در سه مرحله (در مرحله اول ۵۰٪ و در دو مرحله بعد هر کدام ۲۵٪ وزنی) افزوده و مخلوط به دست آمده در هر مرحله ۵ دقیقه هم‌زده شد. سرانجام عامل پخت TDI (به مقدار ۰/۱۴۷ گرم) اضافه و پس از حباب‌گیری دوباره، خمیر پیشران به‌طور پیوسته داخل قالب دمبلی شکل ریخته‌گری شد. نمونه به مدت ۷ روز در دمای ۴۰ °C داخل آون قرار داده شد تا پخت آن کامل شود. این آزمایش برای ساخت ۴ نمونه پیشرانه با دانه‌بندی‌های گوناگون AP مطابق جدول ۱ انجام شد.

### آزمون‌های کشش و سختی

هر یک از نمونه‌های پیشرانه در دو فک دستگاه قرار گرفت و با سرعت کشش<sup>(۱)</sup> ثابت تا نقطه پاره شدن کشیده شد. با ثبت داده‌ها (میزان نیروی لازم برای کشش و درصد ازدیاد طول) نمودارهای تنش - کرنش برای هر نمونه رسم و سپس پارامترهای گوناگون ویژگی‌های مکانیکی مانند مدول یانگ (E)، تنش تسلیم (σm)، کرنش تسلیم (εm)، تنش در شکست (σb)، کرنش در شکست (εb) و چقرمگی محاسبه شد.

در آزمون سختی، هر نمونه پیشرانه با کم‌ترین ضخامت ۶ میلی‌متر در محل ویژه سختی‌سنج قرار گرفته و سوزن فرورونده دستگاه در نمونه وارد شد. سپس میانگین مقاومت نمونه‌ها در برابر این فرورفتگی با واحد Shore A ثبت شد.

### نتیجه‌ها و بحث

#### نمودارهای تنش-کرنش

در این پژوهش پیشرانهای کامپوزیتی بر پایه AP دارای رزین GAP تهیه شدند. اکسیدکننده AP با دانه‌بندی‌های متفاوت ۲۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ میکرون در کلاس‌های گوناگون ۱، ۲ و ۳ مطابق جدول ۱ استفاده شد. علت این انتخاب، استفاده از

(۱) Strain rate

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی \* نمونه‌های پیشرانه AI-AP/GAP با دانه‌بندی‌های گوناگون.

کد نمونه	دانه‌بندی (میکرون)	مدول (MPa)	کرنش تسلیم (%)	تنش تسلیم (MPa)	کرنش در شکست (%)	تنش در شکست (MPa)	چقرمگی (kJ/m <sup>3</sup> )
GAP <sub>1</sub>	۱۰۰	۰٫۵	۴۰	۰٫۲۱	۵۵	۰٫۳	۴٫۵۹
GAP <sub>2</sub>	۹۰	۱٫۱	۲۰	۰٫۲۲	۲۷	۰٫۶	۹٫۶
GAP <sub>3</sub>	۲۵۰ و ۱۰۰	۱٫۵	۲۱	۰٫۳۱	۲۷	۰٫۲	۱۰٫۸
GAP <sub>4</sub>	۲۵۰ و ۱۰۰، ۲۰	۴٫۱۶	۱۲	۰٫۴۹	۲۰	۰٫۲	۲۸٫۸

\* میانگین نتیجه‌ها با ۲ بار تکرار (n = ۲)

جدول ۳- نتیجه‌های به دست آمده از آزمون سختی برای نمونه‌های گوناگون پیشرانه‌ای.

کد نمونه	سختی * (Shore A)
GAP <sub>1</sub>	۵۵
GAP <sub>2</sub>	۵۶
GAP <sub>3</sub>	۶۱
GAP <sub>4</sub>	۶۴

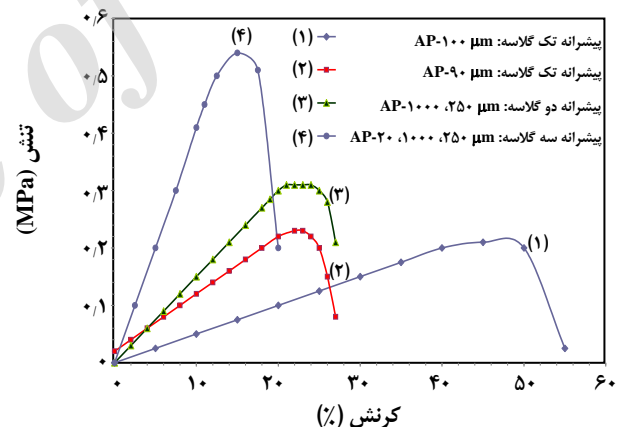
\* میانگین نتیجه‌ها با ۳ بار تکرار (n = ۳)

با افزایش کلاس دانه‌بندی AP، مقاومت بیشتری نسبت به نفوذ جسم فروشونده از خود نشان داده و سیر افزایشی دارد. دلیل این افزایش، بالا رفتن کسر انباشتگی و دانسیته نمونه‌ها با به‌کارگیری دانه‌بندی بیشتر AP در فرمولاسیون بوده است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ساخت پیشرانه‌های کامپوزیتی بر پایه رزین پرانژری گلیسیدیل آزید پلیمر، از اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات با دانه‌بندی‌های متفاوت ۲۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ در کلاس‌های گوناگون ۱، ۲ و ۳ مطابق جدول ۱ استفاده شد. نسبت فاز جامد به سامانه چسباننده ۷۵ به ۲۵ در نظر گرفته شد و به منظور انتخاب پیشرانه با استحکام بهینه، ویژگی‌های مکانیکی گوناگون نمونه‌ها ارزیابی و مقایسه شد.

نمودارهای تنش - کرنش به دست آمده نشان داد که تنش تسلیم و کرنش تسلیم این پیشرانه‌ها ارتباط زیادی به دانه‌بندی AP به‌کار رفته در فرمولاسیون و همچنین کلاس پیشرانه دارد. در این زمینه با افزایش کلاس پیشرانه‌ای تنش تسلیم افزایش و کرنش تسلیم کاهش یافته است. در این خصوص کرنش تسلیم نمونه اول (با تک دانه‌بندی ۱۰۰ میکرون) برابر ۴۰٪، نمونه دوم (با تک دانه‌بندی ۹۰ میکرون) برابر ۲۰٪، نمونه سوم (با دو دانه‌بندی



شکل ۲- نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های گوناگون پیشرانه شامل آمونیوم پرکلرات.

ولیکن فاکتورهای تنش در شکست، کرنش در شکست و کرنش تسلیم کاهش یافته است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد حضور آمونیوم پرکلرات در دانه‌بندی‌های گوناگون در نمونه‌های پیشرانه دارای GAP منجر به تغییر ویژگی‌های مکانیکی می‌شود و در نتیجه پیشرانه ۳ کلاسه GAP<sub>4</sub> با ۳ دانه‌بندی ۲۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ میکرون از لحاظ ویژگی‌های مکانیکی بهینه می‌باشد.

نتیجه‌های مربوط به سختی نمونه‌ها نیز در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود سختی پیشرانه‌ها

کرنش شکست این پیشراندها به ویژه در نمونه‌های سه کلاسه به‌طور محسوس کاهش یافته لیکن تنش شکست نمونه‌ها تغییر محسوس نداشته است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

۱۰۰/۲۵۰ میکرون) مساوی ۲۱٪ و نمونه چهارم (با سه دانه‌بندی ۲۰/۱۰۰/۲۵۰ میکرون برابر ۱۲٪ به‌دست آمد. همچنین محاسبه ویژگی‌های مکانیکی نشان داد که به‌کارگیری ذره‌های AP از یک دانه‌بندی به سه دانه‌بندی موجب افزایش محسوس مدول یانگ، چقرمگی و سختی شده است. همچنین

## مراجع

- [۱] دهنوی، محمدعلی؛ مسعودی، میثم؛ پیشرانده جامد مرکب پرنرژنی NEPE، *مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پرنرژنی*، (۲)۹: ۳ تا ۱۰ (۱۳۹۲).
- [۲] حسینی، سیدقربان؛ ایومن، اسماعیل؛ بررسی فعالیت کاتالیست نانوذره های CuO در تجزیه گرمایی آمونیوم پرکلرات، *مجله علمی-پژوهشی مواد پرنرژنی*، (۲)۳۴: ۱۳ تا ۲۳ (۱۳۹۴).
- [3] Sutton G.P., Biblarz O., "Rocket Propulsion Elements", John Wiley & Sons Inc., (2001).
- [۴] بلاغی اینانلو، ابراهیم؛ دهنوی، محمدعلی؛ بلاغی اینانلو، اسماعیل؛ سمناهی رهبر، مجتبی؛ مطالعه‌ی تاثیر نانوذرات آلومینیوم بر عملکرد احتراقی پیشراندهای مرکب بر پایه آمونیوم پرکلرات (AP)، *مجله علمی-پژوهشی مواد پرنرژنی*، (۱)۸: ۵۳ تا ۵۹ (۱۳۹۱).
- [5] Zarrin Ghalam Moghadam A., Hashemipour Rafsanjani A.A., *The Role of Boron in Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate*, Iran J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE), 19(1): 40-42 (2000).
- [۶] براتی، کاظم؛ نصرت‌زادگان، کیوان؛ فردوسی، محمد؛ مصدق، محسن؛ حسین‌دوست، بنیامین؛ سنتز، شناسایی و دانه بندی گوانیل اوره دی نیتراآمید (۱۲-FOX)، *مجله علمی-پژوهشی مواد پرنرژنی*، (۲)۹: ۵۳ تا ۵۹ (۱۳۹۳).
- [۷] افشانی، محمدابراهیم؛ صحافیان، علی؛ ساخت پیشرانده دو پایه پرنرژنی AP-CMDB جهت تامین محرکه ویژه حداقل ۲۴۰ sec، *مجله علمی-پژوهشی مواد پرنرژنی*، (۱)۱: ۳۳ تا ۴۴ (۱۳۸۵).
- [8] Mousavi Mashhadi M., Sanatgar M.R., *Stress Analysis of Viscoelastic Materials and Its Application in Solid Propellant*, Amirkabir, 16: 35-46 (2005).
- [9] Spires D.N. "Beyond Horizons, A Half Century of Air Force Space Leadership", Air University Press, New York (1998).
- [10] Mahanta A.K., Pathak D.D. "HTPB-Polyurethane: A Versatile Fuel Binder for Composite Solid Propellant", InTech. Pub. (2012).
- [11] Manjari R., Somasundaran U.I., Joseph V.C., Sriram T., *Structure-Property Relationship of HTPB-Based Propellants, Formulation Tailoring for Better Mechanical Properties*, J. Appl. Polym. Sci., 48: 279-289 (1993).

- [۱۲] شهیدزاده، منصور؛ کمالی، احسان؛ بررسی خواص حرارتی و مکانیکی پلی‌یورتان‌های بر پایه GAP. مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پیرانتری، (۴)۹: ۴۱ تا ۴۸ (۱۳۹۲).
- [۱۳] کمالی، احسان؛ شهیدزاده، منصور؛ بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کاپلی‌یورتان‌های بر پایه GAP-PPG با نسبت‌های متفاوت، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۱)۱۰: ۳ تا ۱۲ (۱۳۹۴).
- [۱۴] شهیدزاده، منصور؛ سالاری منش، فریده؛ زمانی، مهوش؛ بررسی اثر آنتی‌اکسیدان بر فرایند کهولت اکسایشی رزین پلی‌بوتادی-ان با گروه هیدروکسیل انتهایی، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۲)۱۰: ۴۳ تا ۵۲ (۱۳۹۴).
- [۱۵] شهیدزاده، منصور؛ اسدی، زاهد؛ نادری جهرمی، بنت‌الهدی؛ سنتز و بررسی کارایی هیدانتوین گلیسیدیل پلیمر به‌عنوان عامل پیوندی پلیمری پیشرانه‌های نیتروآمینی، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۳)۹: ۱۳ تا ۲۴ (۱۳۹۳).
- [۱۶] امینی، سیدمهدی؛ کشاورز، محمدحسین؛ قربانی‌فراز، محمد؛ حیاتی، مهران؛ موسوی‌آذر، علی؛ آقاییاری، مهدی؛ تأثیر استفاده از آمونیوم پرکلرات با دو اندازه (درشت و ریز) بر ویسکوزیته پیشرانه جامد مرکب، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۲)۹: ۶۱ تا ۶۶ (۱۳۹۳).
- [۱۷] اشرفی، مهدی؛ فخرآئیان، حسین؛ دهنوی، محمدعلی؛ سنتز و فرمولاسیون سیستم بایندر- نرم‌کننده NHTPB-NPB و بررسی خواص عملکردی آن در PBXN-109 اصلاح شده، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۲)۱۱: ۱۳ تا ۲۲ (۱۳۹۵).
- [۱۸] فتحی، نواب؛ دهنوی، محمدعلی؛ بررسی تأثیر آمونیوم اگزالات/ استرانسیم کربنات بر حساسیت دمایی سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۱)۸: ۱۷ تا ۲۴ (۱۳۹۲).
- [۱۹] یاری، سعید؛ سلیمانی حمیدی‌نژاد، پیمان؛ بلاغی، ابراهیم؛ کلاتتری، آیت‌اله؛ سیف، فرهاد؛ ارزیابی اثر پارامترهای مختلف بر سرعت سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب، مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پیرانتری، (۱)۱۰: ۴۵ تا ۵۶ (۱۳۹۳).
- [۲۰] کاوسی قاضلو، محمدحسین؛ غفوری، مرتضی؛ مروری بر روش‌های بهبود خواص مکانیکی پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه GAP، مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پیرانتری، (۳)۹: ۱۵ تا ۲۴ (۱۳۹۲).
- [۲۱] دهنوی، محمدعلی؛ حاجی‌بابا، آرمین؛ بررسی عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی پلی‌یورتان‌ها، مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پیرانتری، (۲)۱۰: ۳۵ تا ۴۱ (۱۳۹۳).
- [۲۲] ملائی، احمد؛ رحیمی پور، محمدرضا؛ دهنوی، محمدعلی؛ مطالعه تجربی اثر پودر آلومینیوم نانو ساختار بر خواص یک PBX پایه HMX، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۳)۱۰: ۶۹ تا ۷۸ (۱۳۹۴).
- [۲۳] بیات، یداله؛ فولادگر، زهرا؛ تهیه و آنالیز پلی‌مورف CL-۲۰ و بررسی پارامترهای مؤثر بر دانه‌بندی آن، مجله علمی-پژوهشی مواد پیرانتری، (۱)۸: ۵۳ تا ۵۸ (۱۳۹۲).
- [24] Gronheim A., "Explosive Materials, Physical/Mechanical Properties Uniaxial Tensile Test", Standardization Agreement (STANAG) No.4506, North Atlantic Treaty Organization (NATO), (2000).