

## بررسی اثر کاتالیست بر نرخ سوزش پیشرانه جامد مرکب بر پایه پلاستیسیول PVC

حمید رضا اجرائی<sup>۱\*</sup>، عباس کبریت‌چی<sup>۲</sup>

۱- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی، تهران- ایران،

hamidejraee6@gmail.com

۲-استادیار

### چکیده

پیشرانه‌های بر پایه پلاستیسیول PVC (Polyvinyl chloride) از نوع پیشرانه‌های ترموپلاستیک هستند که متشکل از یک اکسیدکننده، سوخت فلزی، سیستم بایندر، شامل رزین PVC و نرم‌کننده که با هم پلاستیسیول PVC را تشکیل می‌دهند و برخی افزودنی‌های دیگر مانند کاتالیست نرخ سوزش می‌باشند. اثر چندین کاتالیست نرخ سوزش با فرمولاسیون‌های مختلف بر نرخ سوزش پیشرانه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. و در این تحقیقات مشخص شد که کاتالیست‌های نرخ سوزش تأثیر قابل توجهی بر نرخ سوزش دارند و بسته به مقدار آنها در فرمولاسیون پیشرانه، آن تأثیر را نشان می‌دهند. اثر یک کاتالیست نرخ سوزش جدید با علامت تجاری Sicomin-Rot K3130 S و چندین کاتالیست متداول برای تعیین تأثیر آنها بر نرخ سوزش پیشرانه مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر این کاتالیست‌ها بر نرخ سوزش پیشرانه‌های موشک جامد مرکب سری موسوم به Flexolite مورد بررسی قرار گرفت. تمام پیشرانه‌های سری Flexolite بر پایه پرکلرات آمونیوم به عنوان اکسیدکننده و پلاستیسیول پلی‌وینیل کلرید به عنوان بایندر هستند. اثر این کاتالیست جدید بر روی دو فرمولاسیون غیرآلومینیزه و آلومینیومی و در مقایسه با سایر کاتالیست‌ها بررسی شده است. در پایان ماده کرومیت مس به عنوان بهترین کاتالیست نرخ سوزش انتخاب شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پیشرانه - پلاستیسیول PVC - سیستم بایندر - کاتالیست نرخ سوزش - کرومیت مس

### ۱- مقدمه

همواره هزینه، تسهیل فرآیند ساخت و افزایش پات لایف (Pot life) از ضرورت‌های تولید پیشرانه جامد مرکب بوده است. بدین منظور از پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه پلاستیسیول PVC می‌توان استفاده کرد. پلاستیسیول PVC به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی قلیل قبول، در دسترس بودن و هزینه کم نسبت به HTPB (Hydroxyl terminated polybutadiene) به عنوان بایندر در پیشرانه‌های جامد مرکب قابل استفاده می‌باشد. پیشرانه‌های پلی‌وینیل کلراید در مقایسه با سایر پیشرانه‌های استاندارد چندین مزیت منحصر به فرد دارند. که شامل:

ویسکوزیته کم، بنابراین پردازش آسان، پات لایف نامحدود و قابلیت اکستروژن می‌باشند [۱]. اولین پیشرانه‌های پلی‌وینیل کلراید (PVC) در سال ۱۹۵۰ به عنوان بخشی از برنامه گسترده‌ای که توسط Atlantic Research Corp برای بررسی و ارزیابی پیشرانه‌ها و روش‌های تولید پلاستیسیول بود، انجام شد. از آن زمان، پیشرانه PVC به طور گسترده در پرتابه‌های نظامی و غیر نظامی مورد استفاده قرار گرفت که می‌توان به استفاده در پرتابه‌های کنترلی و اکتشافات تغییرات جوی اشاره کرد. برخی

از نمونه‌های این موارد عبارتند از: راکت‌های Redye، Stinger Lankch، C-4 Fairing، MK-30 Sustainer و ARCAS [۲]. پیشرانه‌های پلاستیسیول پلی‌وینیل کلراید (PVC) سیستم‌هایی از بایندر، اکسیدکننده و سوخت فلزی (در صورت استفاده) هستند. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی جزئی که به طور معمول کمتر از ۲٪ از کل را شامل می‌شوند، شامل عامل ترکننده (Wetting agent)، پایدارکننده (Stabilizer)، مات‌کننده (Opacifier) و کاتالیست نرخ سوزش هستند. نرخ سوزش با انتخاب برخی از نرم‌کننده‌های قابل قبول و تغییر اندک در نسبت وزن PVC و نرم‌کننده تغییر می‌کند. [۳]. روش جامد کردن (پخت کردن) دوغاب ریخته‌گری شده پیشرانه‌های پلاستیسیول بطور قابل ملاحظه‌ای با پیشرانه‌های مرکب تفاوت دارد. در پیشرانه‌های جامد مرکب مونومرها یا شبه پلیمرهایی با وزن مولکولی پایین تشکیل می‌شوند که فرایند جامد شدن دوغاب پیشرانه با کامل شدن واکنش‌های پلیمریزاسیون انجام می‌شود. در پیشرانه‌های پلاستیسیول همه واکنش‌های پلیمریزاسیون قبل از شروع تولید پیشرانه کامل شده‌اند. فرایند جامد شدن خمیر پیشرانه پلاستیسیول از طریق حل شدن رزین جامد (پودر PVC) در مایع غیر فرار که بعنوان یک نرم‌کننده برای PVC انتخاب شده است انجام می‌شود [۲]. رزینی که برای تولید پیشرانه‌های پلاستیسیول استفاده می‌شود باید گرید پراکنشی (Dispersion) باشد. ذرات رزین باید کروی (تقریباً)، ترجیحاً حداکثر قطر حدود  $3\ \mu\text{m}$  یا کمتر، عاری از تخلخل و دارای سطحی تمیز باشند. این امر با تشکیل یک پلاستیسیول خامه‌ای روان از مخلوط کردن با وزن تقریباً مساوی نرم‌کننده‌های معمولی برای پلیمر مورد نظر امکانپذیر می‌شود. [۴]. در فرآیند تولید پیشرانه پلاستیسیول، ضروری است که ذرات رزین در دمای فرآورش بیش از حد سریع حل نشوند، زیرا افزایش سریع ویسکوزیته مخلوط پیشرانه با عملیات اختلاط و ریخته‌گری تداخل پیدا می‌کند. باید پات لایف کافی برای پیشرانه مخلوط وجود داشته باشد. خود سیستم نرم‌کننده-رزین تأثیر عمده‌ای بر پات لایف دارد و به همین دلیل نمی‌توان از ترکیبات خاصی در فرآیند پلاستیسیول استفاده کرد. در بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که افزودن مقادیر کمی از مواد معدنی و آلی به یک پیشرانه جامد مرکب نرخ سوزش را به شدت تغییر می‌دهد. این مواد معمولاً در حدود ۱ تا ۳٪ برای تنظیم نرخ سوزش پیشرانه استفاده می‌شود. افزایش مقدار کاتالیست باعث کاهش ایمپالس ویژه می‌شود زیرا آن‌ها معمولاً رقیق‌کننده‌های غیر انرژی‌زا هستند [۵].

### ۲- بررسی کاتالیست‌های در فرمولاسیون

Sicomin-Rot K 3130 S ساخت شرکت BASF، کرومیت مس (CuO)،  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ساخت آلدریچ، اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) و آتروسیل ( $\text{SiO}_2$ ) ساخت Skoplje, Alkaloid، به عنوان کاتالیست در این بررسی استفاده شدند. برای اولین بار از Sicomin-Rot K 3130 S به عنوان یک کاتالیست برای

جدول ۲- فرمولاسیون‌های پیش‌رانه با انرژی متوسط همراه با کاتالیست [A]

Sicomin-Rot K 3130 S					
% ترکیبات	F	G	H	L	O
اکسیدکننده	۷۴/۵۰	۷۴/۰۰	۷۵/۰۰	۷۵/۰۰	۷۵/۰۰
آلومینیوم	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰
بایندر	۲۳/۶۵	۲۳/۶۵	۲۰/۶۰	۲۰/۶۰	۲۰/۶۰
پایدارکننده	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰
افزودنی‌ها	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
کربن سیاه	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
Sicomin-Rot K3130 S	۰/۵۰	۱/۰۰	۳/۰۰	۳/۰۰	۳/۰۰
kg/m <sup>3</sup> دانسیته	۱۶۸۵	۱۶۹۵	۱۷۴۵	۱۷۴۰	۱۷۳۵

جدول ۳- فرمولاسیون‌های پیش‌رانه با انرژی بالا همراه با کاتالیست [A]

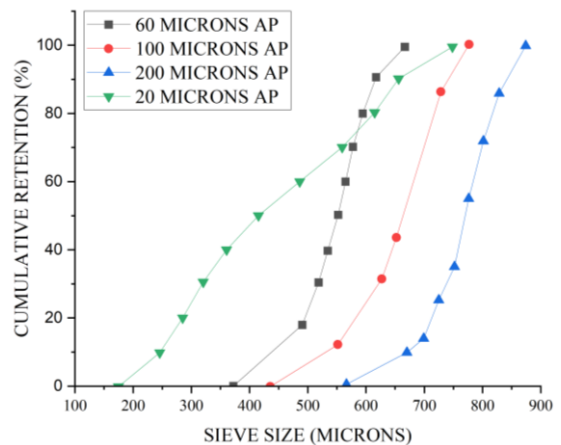
% ترکیبات	P	Q	R	S	T
اکسیدکننده	۶۹/۷۵	۶۹/۵۵	۶۹/۷۰	۶۹/۵۵	۶۹/۵۵
آلومینیوم	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۹/۷۰
بایندر	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰	۱۸/۸۰	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰
پایدارکننده	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰
افزودنی‌ها	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۲۵
کربن سیاه	۰/۱۰	---	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
Aerosil	---	۰/۲۰	۰/۵۰	---	---
Sicomin-Rot K3130 S	---	---	---	۰/۲۰	---
اکسید آهن	---	---	---	---	۰/۵۰
kg/m <sup>3</sup> دانسیته	۱۷۶۵	۱۷۷۰	۱۷۷۰	۱۷۶۲	۱۷۶۲

در جدول ۱ پنج فرمولاسیون با یک نوع بایندر PVC با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در آن‌ها تاثیر نوع کاتالیست و افزایش میزان آن بر روی دانسیته پیش‌رانه‌های پلاستیسول مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که می‌بینیم با اضافه نمودن کاتالیست در فرمولاسیون‌های A, B, C, D و E افزایش دانسیته پیش‌رانه را نسبت به فرمولاسیون A به وضوح قابل مشاهده است، تغییرات دانسیته با استفاده از کاتالیست Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بجای کرومیت مس اندک می‌باشد، در حالیکه نرخ سوزش با بکارگیری کاتالیست اکسید آهن بجای کرومیت مس کاهش می‌یابد. همانطور که پیشتر به آن اشاره شد اندازه ذرات آمونیم پرکلرات و آلومینیم نقش موثری در افزایش و یا کاهش نرخ سوزش پیش‌رانه‌های پلاستیسول دارند. کاهش اندازه ذرات اکسیدکننده افزایش قابل ملاحظه حجم اکسیدکننده را در توده و ماتریس پلیمری در بر دارد که این خود به تنهایی باعث افزایش نرخ سوزش و خواص بالستیکی می‌شود. در فرمولاسیون‌هایی که درصد آمونیم پرکلرات کم‌تری دارند و درصد سوخت فلزی آلومینیم برابری استفاده شده است، نرخ سوزش پیش‌رانه و دمای شعله آن بسیار پایین می‌باشد. ولی در فرمولاسیون‌هایی که بیشترین درصد AP را داریم نرخ سوزش افزایش قابل توجهی دارد. فرمولاسیون‌هایی که مانند همدیگر می‌باشند و اختلاف آن‌ها در نوع نرم‌کننده می‌باشد مثلاً در یک فرمولاسیون که از نرم‌کننده DOP استفاده شده سرعت سوزش افزایش بیشتری دارد چون آنتالپی تشکیل DOP مثبت تر می‌باشد. از بررسی فرمولاسیون‌های بالا تاثیر قابل

اندازه گیری نرخ سوزش استفاده شده است. این کاتالیست یک کریستال مخلوط متشکل از کرومات سرب، مولیبدات سرب و سولفات سرب است که با پوشش ترکیبات سیلیکات و آنتیموان تثبیت می‌شود. فرمول کلی آن  $Pb(Cr,S,Mo)O_4$ ، چگالی آن  $5777 \text{ kg/m}^3$  و قطر متوسط آن کمتر از  $1 \mu\text{m}$  است [۶].

در همه فرمولاسیون‌های استفاده شده مراحل فرآورش، نوع و ترکیب بایندر یکسان هستند. ولی از چهار دانه‌بندی مختلف از پرکلرات آمونیم با اندازه‌های اسمی ذرات ۲۰، ۶۰، ۱۰۰ و  $200 \mu\text{m}$  در این فرمولاسیون‌های آزمایشی استفاده شده‌اند. تجزیه و تحلیل اندازه ذرات برای این چهار نوع آسیاب AP در شکل ۱ نشان داده شده است [۷].

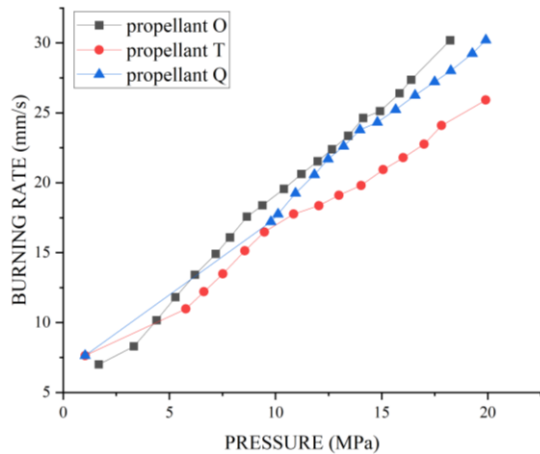
اجزا شرکت کننده در فرمولاسیون‌های بررسی شده در این تحقیقات در پیش‌رانه‌های انرژی متوسط و با انرژی بالا در جداول ۱-۳ نشان داده شده است، کاتالیست‌های معدنی مختلفی جهت افزایش نرخ سوزش به پیش‌رانه‌های پلاستیسول PVC افزوده می‌شوند. در این تحقیقات از کاتالیست‌هایی مانند کرومیت مس (CC)، اکسید آهن (IO)، کربن سیاه، Sicomin-Rot K 3130 S و Aerosil جهت بهبود نرخ سوزش و دانسیته استفاده شده است. این مواد چون مواد غیر انرژی زا هستند باعث کاهش ایمپالس ویژه پیش‌رانه‌های پلاستیسول می‌شوند. ولی اگر به میزان کم مورد استفاده قرار گیرند با توجه به میزان و نوع کاتالیست باعث افزایش نرخ سوزش می‌شوند [۸].



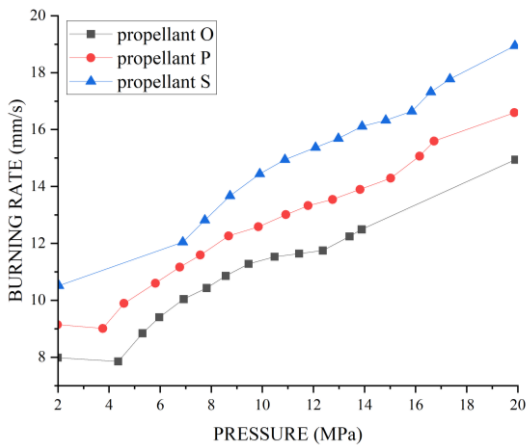
شکل ۱- داده‌های توزیع اندازه ذرات AP [۷]

جدول ۱- فرمولاسیون‌های پیش‌رانه با انرژی متوسط همراه با کاتالیست [A]

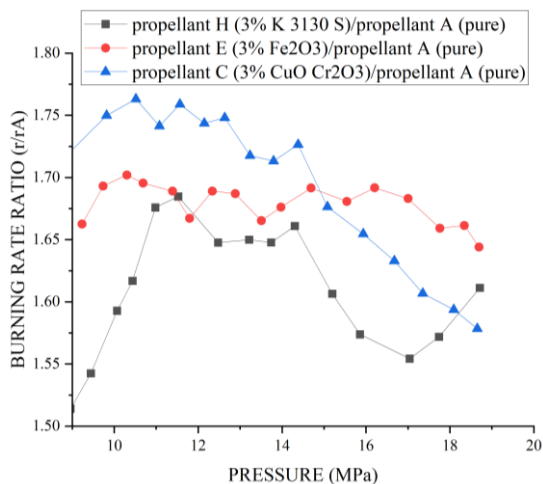
% ترکیبات	A	B	C	D	E
اکسیدکننده	۷۵/۰۰	۷۴/۵۰	۷۵/۰۰	۷۳/۵۰	۷۵/۰۰
آلومینیوم	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	---	۰/۵۰
بایندر	۲۳/۴۰	۲۳/۶۵	۲۰/۶۰	۲۰/۶۰	۲۰/۶۰
پایدارکننده	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰
افزودنی‌ها	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
کربن سیاه	۰/۳۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
کرومیت مس	---	۰/۵۰	۳/۰۰	۵/۰۰	---
اکسید آهن	---	---	---	---	۳/۰۰
kg/m <sup>3</sup> دانسیته	۱۶۸۰	۱۶۹۰	۱۷۳۵	۱۷۵۰	۱۷۴۰



شکل ۵- تأثیر IO بر پیشراندهای انرژی بالا (AP 60 $\mu$ m) [۹]

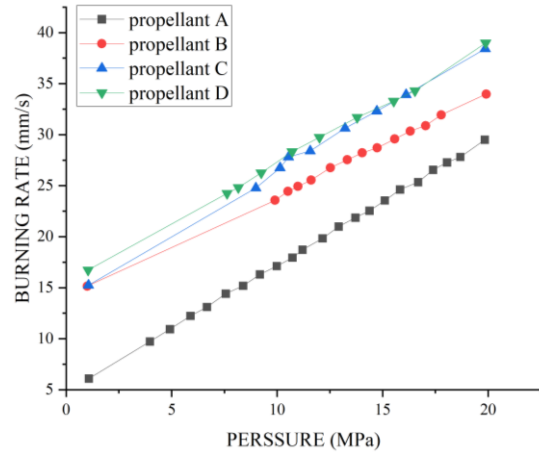


شکل ۶- تأثیر Sicomin-Rot K3130S بر پیشراندهای انرژی بالا (AP 200 $\mu$ m) [۹]

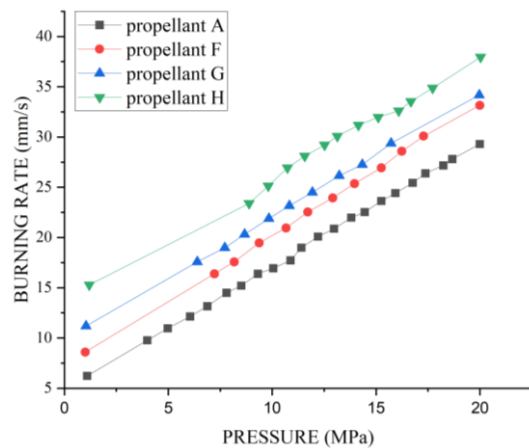


شکل ۷- تأثیر ۳ درصد کاتالیزورهای مختلف بر روی پیشرانه [۹]

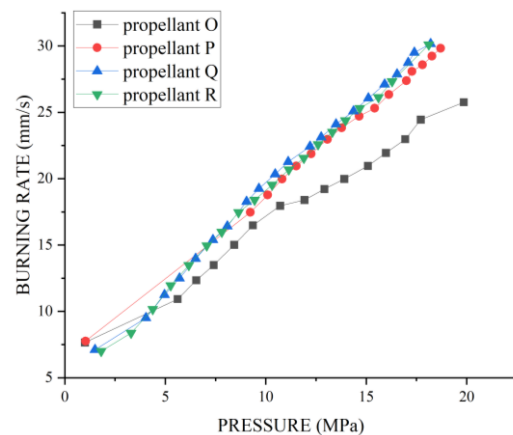
توجه کاتالیست و افزایش میزان اکسیدکننده بر نرخ سوزش مشاهده می‌شود. همچنین هرچه اندازه ذرات اکسیدکننده ریزتر باشد نرخ سوزش در فشار عملکردی این نمونه از پیشراندها افزایش می‌یابد [۹].



شکل ۲- تأثیر CC و IO بر پیشراندهای انرژی متوسط (AP 20 $\mu$ m) [۹]



شکل ۳- تأثیر Sicomin-Rot K3130S بر پیشراندهای انرژی متوسط (AP 20 $\mu$ m) [۹]



شکل ۴- تأثیر aerosil بر پیشراندهای انرژی بالا (AP 60 $\mu$ m) [۹]

کاتالیست ۰/۵، ۱، ۳، ۵، و ۵/۵ است. با افزایش سطح از ۳ به ۵٪، نرخ سوزش به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. همچنین با افزودن ۳٪ یا بیشتر از این کاتالیست، ضریب شتاب سوزش تغییر می‌کند. افزودن ۳٪ از همه این کاتالیست‌ها در شکل ۷ نشان داده است که CC مؤثرترین کاتالیست است، در حالی که مقایسه ۵٪ کاتالیست‌ها در شکل ۸ نشان می‌دهد که Sicomin-Rot K 3130 S مؤثرترین کاتالیست منفرد در این زمینه است. از این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که CC اگر مقدار اضافه شده تا ۳٪ باشد بهترین کاتالیست است. افزایش بیشتر نرخ سوزش نیاز به استفاده از Sicomin-Rot K 3130 S دارد [۷].

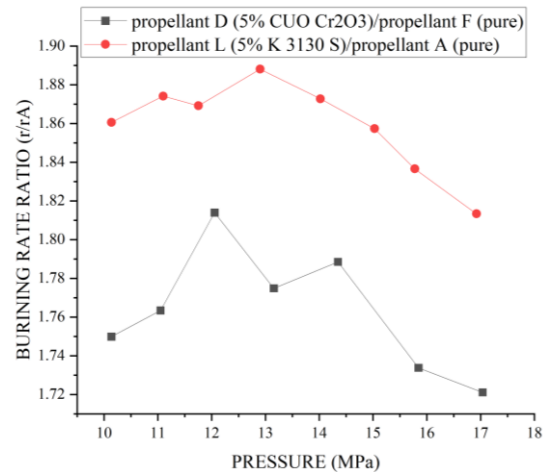
گنجلندن برخی فلزات سبک در فرمولاسیون پیش‌ساز می‌تواند محتوای انرژی یک پیش‌ساز جامد را افزایش دهد. افزودن آلومینیوم باعث افزایش دمای احتراق و در نتیجه افزایش ایمپالس ویژه می‌شود. علاوه بر این، چگالی بارگذاری پیش‌ساز نیز افزایش می‌یابد. پیش‌سازهای پراثری عموماً بیشتر از ۱۰٪ آلومینیوم در فرمولاسیون خود دارند [۱۲].

تحقیقات نشان داده است که افزودن ۲٪ اکسید فریک و یا ۱٪ اکسید کرومیت مس، اکسید آهن، کربنات منیزیم و یا اکسید منیزیم نرخ سوزش را در محدوده فشار ۷۰ بار و دمای محیط به میزان ۱۵٪ افزایش می‌دهند. به علاوه افزودن ۲٪ مخلوط مساوی اکسید مس و اکسید منیزیم نرخ سوزش را به میزان ۲۰٪ افزایش می‌دهند. از طرفی اضافه کردن ۱٪ کربنات کلسیم نرخ سوزش را به میزان ۱۵٪ کاهش می‌دهد. تحقیقات و تجربیات حاکی از این امر است که کرومیت مس بهترین کاتالیست برای نرخ سوزش می‌باشد، بطوریکه افزودن میزان ۰/۲٪ از آن (از شرکت Harshaw) نرخ سوزش را ۲۵٪ افزایش می‌دهد و در رابطه ویل، (۱) نمای فشار را پایین می‌آورد [۱۳].

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر کاتالیست‌های مختلف را بر نرخ سوزش پیش‌سازهای جامد مرکب بر پایه پلاستیسول PVC بررسی شد و با استفاده از نتایج تجربی، می‌توان دریافت که CC بهترین کاتالیست مورد استفاده در آزمایشات برای پیش‌سازهای با انرژی متوسط تا ۹ MPa است. CC اگر تا میزان ۳٪ افزوده شود مؤثر است، بالاتر از این بر میزان سوزش تأثیر نمی‌گذارد. Sicomin-Rot K 3130 S در مقایسه با همان مقدار CC و IO کمی کمتر مؤثر است، اما اثربخشی آن بر میزان سوزش تا ۵/۵٪ وجود دارد. بنابراین، با این کاتالیست می‌توان به افزایش نرخ سوزش بیشتر در فرمولاسیون‌های پیش‌ساز اولیه دست یافت. همچنین این کاتالیست بسیار ارزان‌تر از CC است. Sicomin-Rot K 3130 S به عنوان بهترین کاتالیست در فرمولاسیون‌های پیش‌ساز با انرژی بالا نشان داده شده است. آئروسول کاتالیستی است که کمی بهتر از IO است. آئروسول تأثیر خود را به عنوان یک کاتالیست در فرمولاسیون‌های پیش‌ساز در فشارهای بیشتر از ۴ MPa نشان داده است، اما اثربخشی آن بالای ۰/۲٪ ضعیف است. تنظیم دقیق نرخ سوزش را می‌توان با اصلاح سطح نرم‌کننده در فرمولاسیون پیش‌ساز به دست آورد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که افزایش سطح نرم‌کننده در فرمولاسیون‌های پیش‌ساز تا ۱۰٪، نرخ سوزش را برای مقدار کمتری کاهش می‌دهد.

با توجه به این تحقیقات، ایمپالس ویژه و نرخ سوزش با میزان اکسیدکننده نسبت مستقیم دارند و نرخ سوزش با کاهش اندازه ذرات اکسیدکننده



شکل ۸- تأثیر ۵ درصد کاتالیزورهای مختلف بر روی پیش‌ساز [۹]

#### ۳- بحث و نتایج

نرخ سوزش پیش‌سازهای جامد به پارامترهایی مانند فشار و دمای اولیه پیش‌ساز، سرعت جریان متقاطع، نوع پیش‌ساز، نسبت سوخت به اکسیدکننده و اندازه ذرات اکسیدکننده بستگی دارد. به طور کلی، نرخ سوزش پیش‌سازهای جامد را می‌توان مطابق معادله (۱)، (قانون سنت رابرت یا ویل) توصیف کرد [۱۰]:

$$r = b \cdot P_c^n \quad (1)$$

که در آن  $P_c$  فشار محفظه احتراق،  $b$  ضریب فشار و  $n$  نمای فشار است. نتایج تجربی خلاصه‌شده در شکل‌های ۲-۶ به‌عنوان اثرات کاتالیست‌های بر نرخ سوزش فرمولاسیون‌های مختلف پیش‌ساز در وابستگی به فشار ارائه شده‌اند. همه داده‌ها با قانون سنت رابرت مرتبط هستند.

مواد مختلف مانند کرومیت مس، اکسید آهن و سایر ترکیبات فلزی واسطه برای افزایش نرخ سوزش AP خالص و همچنین پیش‌سازهای جامد مرکب مبتنی بر AP شناخته شده بودند. اندازه ذرات و وضعیت تجمع هر کاتالیست که تأثیر زیادی بر نرخ سوزش پیش‌سازها دارد، متفاوت است. به همین دلیل است که مقایسه کمی اثربخشی کاتالیست در شرایط مکانیکی هنگام برخورد با کاتالیست‌های جامد دشوار است.

کرومیت مس یک ماده غیر استوکیومتری است که خواص آن به روش ساخت آن بستگی دارد. مقالات زیادی وجود دارد که به اثر کاتالیستی کرومیت مس می‌پردازند. کرومیت مس تجزیه AP را کاتالیز می‌کند و کاتالیز در فاز جامد انجام می‌شود. کاتالیست کرومیت مس تجزیه در دمای بالا را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد که در پیش‌سازهای پلاستیسول PVC افزودن ۲٪ اکسید آهن یا ۱٪ اکسید کروم، سرعت سوختن را ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. کرومیت مس مؤثرتر است زیرا با افزودن ۰/۲٪ نرخ سوزش را ۲۵٪ افزایش می‌دهد. و علاوه بر این، تمایل پایداری برای کاهش نمای فشار دارد [۱۱].

تأثیر CC و IO بر نرخ سوزش پیش‌ساز در شکل ۲ برای آسیاب AP  $20 \mu\text{m}$  نشان داده شده است. از آنجایی که پیش‌سازهای پلاستیسول مشکلات رئولوژیکی با درصد CC بیشتر ندارند، CC در سطوح ۰/۵، ۳ و ۵٪ اضافه شد. ۵٪ CC در مقایسه با ۳٪ CC تأثیر قابل توجهی بر نرخ سوزش ندارد. تأثیر Sicomin-Rot K 3130 S بر پیش‌سازهای انرژی متوسط برای آسیاب AP  $20 \mu\text{m}$  در شکل ۳ نشان داده شده است. سطح

افزایش می‌یابد. نهایتاً پیشنهاد می‌شود جهت رسیدن به نرخ سوزش مطلوب با به کارگیری از دو نوع AP با اندازه ذرات و مش بندی های مختلف در پیشرانه مربوطه که این امر باعث پر شدن خلل و فرج پلاستیسول PVC و در نتیجه ایجاد سطح سوزش مطلوب می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] K. E. Rumbel, "Poly (vinyl chloride) Plastisol Propellants," ACS Publications, 1967.
- [2] J. Hunley, "The history of solid-propellant rocketry-What we do and do not know," in 35th joint propulsion conference and exhibit, 1999, p. 2925.
- [3] A. Davenas, "History of the development of solid rocket propellant in France," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 11, no. 2, pp. 285-291, 1995.
- [4] J. MARTIN, "Polyvinyl chloride plastisol propellants," in 20th Joint Propulsion Conference, 1984, p. 1237.
- [5] K. Kishore, S. Sankaralingam, and A. S. Begum, "Studies on the ageing behaviour of Polyvinylchloride/ammonium perchlorate composite solid propellant," *Fuel*, vol. 68, no. 11, pp. 1476-1479, 1989.
- [6] D. D. Blagojevic and V. S. Bozic, "Processing technique of rocket propellants based on modified polyvinyl chloride," *Propellants, explosives, rockets, and guns*, pp. 200-205, 1998.
- [7] V. S. Bozic and D. D. Blagojevic, "Burning-rate modifier effects on a modified polyvinyl chloride-based propellants," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 17, no. 5, pp. 1017-1022, 2001.
- [8] R. H. Burgess, *Manufacture and Processing of PVC*. CRC Press, 1981.
- [9] V. S. Bozic and M. V. Milos, "Effects of oxidizer particle size on propellants based on modified polyvinyl chloride," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 17, no. 5, pp. 1012-1016, 2001.
- [10] A. Manash and P. Kumar, "Comparison of burn rate and thermal decomposition of AP as oxidizer and PVC and HTPB as fuel binder based composite solid propellants," *Defence Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 227-232, 2019.
- [11] E. Cohen-Nir, "Combustion of Highly Loaded Composite Propellants: Study of Pressure Exponents," *Combustion Science and Technology*, vol. 14, no. 1-3, pp. 75-84, 1976.
- [12] D. Reese, "A review of solid propellant burn rate enhancement by mechanical methods," in to vol. 11, ed, 2010, p. 1.
- [13] A. Chatterjee and P. Joshi, "Combustion studies of aluminized PVC plastisol," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 17, no. 5, pp. 413-415, 1980.