

ساخت پیشراندهای دوپایه سیم گذاری شده به روش اکسترودی و بررسی تأثیر سیم فلزی بر سرعت سوزش

رضا فارغی علمداری^{۱*}، سید امان اله موسوی ندوشن^۲

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۹۱/۰۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۲۹)

چکیده

در این مقاله فرآیند ساخت پیشراندهای دوپایه سیم گذاری شده به روش اکسترودی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و روش دقیق ساخت و عوامل مؤثر بر سرعت سوزش پیشراندهای سیم گذاری شده و انتخاب سیم مناسب جهت افزایش بیشتر در سرعت سوزش ارائه شده است. در این تحقیق ضمن پیشنهاد روشی برای ساخت پیشراندهای دوپایه سیم گذاری شده به روش اکسترودی، نمونه‌هایی از پیشراندهای سیم گذاری شده با سه نوع سیم با جنس‌های مس، فولاد و برنج و با قطر 0.25 mm ساخته شد و تحت آزمون سرعت سوزش به روش بمب کرافورد قرار گرفت. آزمایشات نشان داد که سیم‌های فلزی کار گذاشته شده در نمونه‌های ساخته شده به وسیله این فرآیند به صورت کاملاً مستقیم و بدون هیچ گونه پیچ خوردگی و پارگی درون گرین پیشراندها قرار گرفته و سرعت سوزش پیشراندهای با یک سیم کار گذاشته شده نسبت به نمونه بدون سیم تا $3/9$ برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: پیشراندهای جامد دوپایه، سیم فلزی، سیم گذاری، سرعت سوزش، گرین.

۱- مقدمه

برای انتخاب گرین است. برای افزایش سرعت سوزش این گرین‌ها (گرین‌های سیگاری سوز) می‌توان از تکنیک مفتول‌های فلزی کار گذاشته شده استفاده کرد [۶-۴]. استفاده از این تکنیک ابتدا در سال ۱۹۵۰ برای پیشراندهای کامپوزیت بر پایه پلی وینیل کلراید توسط رامبل^۳ و همکارانش انجام شد [۷]. یکی از کارهای انجام شده در مدل ابتکاری آن‌ها بررسی تأثیر جنس و قطر مفتول بر روی افزایش سرعت سوزش بوده است (مطالعات آن‌ها با فرض پایا بودن شرایط انجام شد). تأثیر رشته‌های فلزی کار گذاشته بر سرعت سوزش پیشراندهای جامد گزارش شده است [۸]. آن‌ها در این گزارش سرعت سوزش در نقاط مختلف مفتول یکسان فرض شده است و تأثیر سطح تماس پیشراندها با مفتول بررسی نشده است. تأثیر هدایت گرمایی مفتول‌ها با جنس‌های مختلف

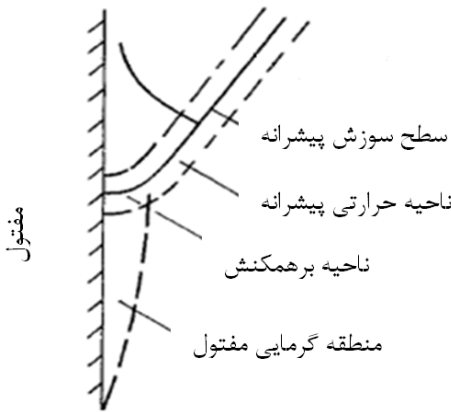
گرین در لغت به معنای دانه است و در اصطلاح به جرم شکل داده شده از پیشراندهای جامد گفته می‌شود. از دلایل استفاده از گرین می‌توان به کنترل داشتن بر سرعت سوختن اجزا در حالت گرین، ایجاد یک مخلوط همگن سوخت و اکسیدان و دیگر اجزا و افزایش دانسیته مخلوط در حالت گرین نسبت به اجزای سازنده آن اشاره کرد [۳-۱]. یکی از روش‌های افزایش سرعت سوزش بدون تغییر ترکیب پیشراندها استفاده از گرین‌های با حفره‌های مرکزی است که به دلیل سطح سوزش بیشتر نسبت به گرین‌های سیگاری سوز سرعت سوزش بیشتری دارند، اما گرین‌های سیگاری سوز کسر جرمی بیشتری را نسبت به گرین‌های حفره مرکزی ایجاد می‌کنند که اغلب یک فاکتور قابل توجه

* Email: reza_fareghi@yahoo.com

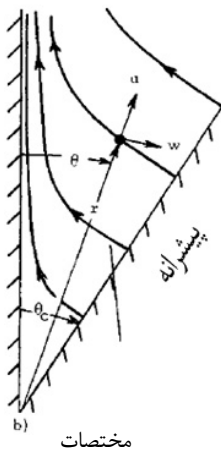
3- Rumbel

۱- دانشیار

۲- کارشناس ارشد



شکل ۱- مناطق مهم ایجاد شده در طول سیم فلزی پس از سوزش پیشرانه [۸].



شکل ۲- جهت‌های مختصاتی [۸].

باید توجه داشت که به جز برای یک ناحیه نازک پیشرانه نزدیک مفتول، سرعت سوزش پیشرانه اطراف به طور محسوسی تحت تأثیر مفتول نیست، بنابراین برای به دست آوردن نتایج بهتر در گرین‌های قطورتر از چندین مفتول استفاده می‌شود [۲۰ و ۱۹].

۳- خصوصیات فلزی مؤثر بر سرعت سوزش گرین

افزایش سرعت سوزش در پیشرانه سیم گذاری شده وابستگی شدیدی به خصوصیات هدایتی و قطر سیم فلزی دارد. افزایش قطر سیم فلزی تا یک مقدار مشخص به دلیل افزایش سطح تماس و در نتیجه افزایش انتقال حرارت موجب افزایش سرعت سوزش شده و بعد از آن موجب کاهش سرعت سوزش می‌شود. برای خیلی از مفتول‌ها سرعت سوزش با افزایش قطر مفتول تا حدود 0.127 mm افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر قطر سرعت سوزش کاهش می‌یابد. با افزایش قطر مفتول سطح مقطع مفتول نیز افزایش می‌یابد در نتیجه انتقال حرارت بیشتر

بر روی احتراق پیشرانه نیز بررسی شده است. در این بررسی‌ها نیز سرعت سوزش در نقاط مختلف مفتول یکسان فرض شده و تأثیر سطح تماس پیشرانه با مفتول نیز بررسی نشده است [۹].

پیشرانه‌های دوپایه به دو روش اکسترودی و ریخته‌گری تولید می‌شوند. به پیشرانه‌های دوپایه ساخته شده توسط فرآیند ریخته‌گری "CDB" و به پیشرانه‌هایی ساخته شده با روش اکسترودی "EDB" اطلاق می‌شود. در این تحقیق از روش اکسترودی برای ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده استفاده شده است [۱۱ و ۱۰].

۲- مکانیسم عمل سیم فلزی کار گذاشته شده درون گرین پیشرانه

عوامل مختلفی بر سرعت سوزش و عملکرد گرین پیشرانه تأثیرگذار هستند، یکی از این عوامل تأثیرگذار، میزان انتقال حرارت درون گرین و سطح سوزش ایجاد شده هنگام سوزش گرین پیشرانه است. سیم‌های فلزی کار گذاشته شده درون گرین با افزایش مقدار این پارامترها سرعت سوزش را افزایش می‌دهند.

هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی فلز به کار رفته شده به عنوان سیم، مواد پیشرانه و گازهای احتراقی تولید شده، بر میزان انتقال حرارت در گرین و در نتیجه سرعت سوزش اثر می‌گذارند. آزمایش‌ها با سیم‌های فلزی با جنس‌های مختلف (که در نتیجه هدایت و تشعشع گرمایی متفاوتی دارند) این مسأله را تأیید می‌کند. در واقع سیم فلزی به عنوان یک مسیر کم مقاومت برای انتقال حرارت از محصولات داغ احتراقی به پیشرانه زیر سطح سوزش عمل می‌کند و حرارت انتقال یافته به پیشرانه، سبب افزایش دمای پیشرانه مجاور مفتول می‌شود [۱۸-۱۲].

در شکل (۱) یک نمای برش خورده در طول محور سیم فلزی در سوزش حالت پایا برای سیمی که به صورت عمودی قرار گرفته نشان داده شده است. در این شکل ناحیه‌های زیر مشخص شده است [۸]:

الف- ناحیه حرارتی پیشرانه که از هدایت حرارتی از سطح سوزش به سمت پیشرانه ناشی می‌شود؛

ب- ناحیه حرارتی مفتول که به سبب هدایت حرارتی از سیم فلزی به پیشرانه به وجود می‌آید. ناحیه حرارتی پیشرانه بسیار کوچک است، مثلاً برای آلومینیوم با مقطع عرضی $0.2 \times 0.127 \text{ mm}$ که در پیشرانه با سرعت سوزش $25/4 \text{ pascal/sec}$ در فشار 6895 pascal کارگذاشته شده است، ناحیه حرارتی پیشرانه حدود 0.254 mm ضخامت دارد در صورتی که ناحیه حرارتی سیم فلزی حدود 0.76 mm طول و 0.51 mm ضخامت دارد؛

ج- ناحیه برهمکنش که در آن انرژی جابه‌جا شده از سطح سوزش و مفتول با هم آمیخته می‌شوند و در واقع ناحیه بین منطقه گرمایی سیم فلزی و منطقه گرمایی پیشرانه است.

1- Cast Double-Base
2- Extruded Double-Base

با وجود ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده از سال ۱۹۵۰، تکنیک ساخت گرین‌های سیم گذاری شده به روش اکسترودی هنوز در کشور ما مورد استفاده قرار نگرفته است. در این تحقیق ضمن پیشنهاد روشی برای ساخت پیشرانه‌های دوپایه سیم گذاری شده به روش اکسترودی، نمونه‌هایی از پیشرانه‌های سیم گذاری شده (به صورت تک سیمی) با سیم‌های فلزی با قطرهای مشخص و جنس‌های متفاوت ساخته شد و سرعت سوزش این نمونه‌ها اندازه گیری شد.

روش ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده با استفاده از روش اکسترودی در هیچ یک از منابع قابل دسترس وجود نداشت، بنابراین مجبور به طراحی روشی بودیم که بتوانیم نمونه‌های قابل قبول از پیشرانه دوپایه سیم گذاری شده با توجه به امکانات موجود بسازیم. روش طراحی شده در این تحقیق ضمن سادگی و قابلیت اجرا به صورت صنعتی، با توجه به آزمون‌های انجام شده در این تحقیق عملکرد مناسبی نیز داشته است.

۴- شکاف بین مفتول و پیشرانه

در پیشرانه‌های مفتول گذاری شده باید سعی شود که بین مفتول و پیشرانه فضای خالی وجود نداشته باشد و مفتول کاملاً به پیشرانه چسبیده باشد. هر چه اندازه شکاف بین مفتول و پیشرانه^۲ بیشتر باشد، سرعت سوزش نیز کمتر خواهد بود و از طرف دیگر نیز گازهای داغ حاصل از احتراق در فضای خالی بین مفتول و پیشرانه نفوذ می‌کنند که این امر حتی می‌تواند منجر به انفجار شود، پس باید تا حد امکان سعی کرد که این فاصله را به صفر رسانید [۹ و ۱۵].

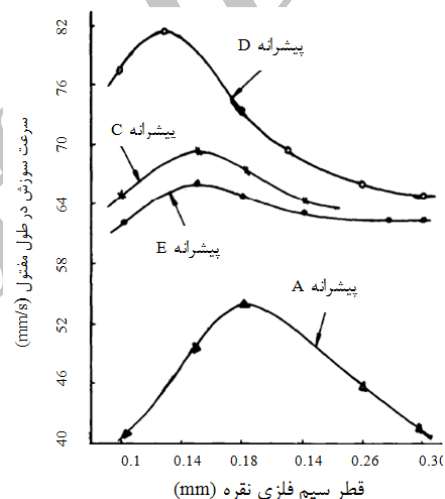
مریل به وسیله آزمایش‌های تأثیر فاصله بین مفتول و پیشرانه را بر سرعت سوزش مورد بررسی قرار دارد. نتایج آزمایش مریل در شکل (۴) آورده شده است. در این شکل سرعت سوزش پنج گرین پیشرانه ساخته شده بر حسب فاصله سوزش برای آرکادن^۳ ۴۲۶ (نام ترکیبی از پیشرانه است که ترکیب درصد آن در جدول (۲) آورده شده است) در ۱۳۷۹ pascal رسم شده است. در جدول (۲) درصد ترکیب و خصوصیات آرکادن ۴۲۶ آورده شده است. قطر مفتول نقره کار گذاشته شده در این آزمایش ۰/۲۵۴ mm بود [۹].

جدول ۲- فرمولاسیون و خصوصیات آرکادن ۴۲۶ [۹].

ترکیب درصد	پرکلرات آمونیوم ۷۵٪ HTPB ۱۲/۵٪ دی اکتیل آدیپات ۱۲/۵٪
دمای شعله (K)	۲۸۳۸
گرمای ویژه پیشرانه (Cal/g.K)	۰/۳۷۵
چگالی (g/cm ³)	۱/۶۷
هدایت گرمایی پیشرانه (Cal/cm.s.K)	۰/۰۰۰۷۱
ماتریکس سرعت در 1000 psi (cm/s)	۱/۷۰

صورت گرفته و سرعت سوزش بیشتر می‌شود، اما با افزایش بیشتر قطر مفتول میزان فلز به کار رفته شده در گرین پیشرانه افزایش می‌یابد و چون فلز به عنوان یک جسم بی اثر عمل می‌کند (احتراق نمی‌یابد) گازهای حاصل از احتراق کمتر تولید شده و در نتیجه سرعت سوزش نیز کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که حداکثر سرعت سوزش برای پیشرانه‌های مختلف و مفتول‌های مختلف مقدار متفاوتی است [۲۴-۲۱].

در شکل (۳) تأثیر قطر مفتول بر سرعت سوزش برای پیشرانه‌های ترکیب درصدهای مختلف آورده شده است. ترکیب درصد پیشرانه‌های مورد استفاده در این آزمون‌ها در جدول (۱) آمده است. همان‌گونه که از نتایج به دست آمده از آزمایشاتی که شولینگ و فنگ‌شنگ^۱ در سال ۱۹۸۲ انجام دادند مشاهده می‌شود، حداکثر سرعت سوزش برای پیشرانه‌های متفاوت در مقادیر متفاوتی رخ می‌دهد [۲۵].



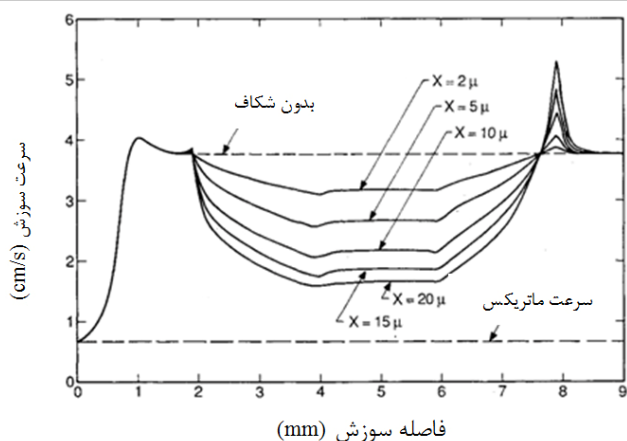
شکل ۳- تأثیر قطر سیم فلزی بر روی سرعت سوزش برای پیشرانه‌های مختلف [۲۵].

جدول ۱- خصوصیات مهم پنج نمونه از پیشرانه انتخاب شده برای آزمون‌های شولینگ و فنگ‌شنگ [۲۵].

پیشرانه	ترکیب درصد مواد							خواص
	NC	DNT	HMX	Al	سنترالیت	افزودنی	نمای فشار	
A	۸۴	۱۰	-	-	۳	۴	۰/۵۶۵	سرعت سوزش (mm/sec) P=90 kg/cm ²
B	۸۲	۱۱	-	-	۳	۴	۰/۵۶۵	
C	۹۳	-	-	-	۱	۴	۰/۳۰	
D	۹۱	-	-	۵	۱	۳	۰/۳۵	
E	۸۲	-	۱۲	۳	۱	۲	۰/۳۰	

2 - Gap
3 - Arcadene

1- Shuling & Fengsheng



شکل ۴- تأثیر فاصله بین مفتول و پیشرانه روی سرعت سوزش پیشرانه [۹].

درصد نیتروسولوز، ۳۵ درصد نیتروگلیسییرین و ۱۵ درصد نیز دیگر اجزا بود. تفاوت این دو پیشرانه در نوع و مقدار نرم کننده و پایدارکننده و بعضی از اجزای دیگر بود. اندازه گیری سرعت سوزش نمونه‌ها در این تحقیق به وسیله روش استرنر برنر (سوزش میله‌ای نمونه) و برای بررسی نحوه قرارگیری سیم درون پیشرانه از دستگاه x-ray استفاده شد. در این تحقیق سه نوع سیم با جنس‌های مس، فولاد و برنج انتخاب شدند و از این فلزات سیم‌هایی با قطر ۰/۲۵ mm تهیه شد. سیم مسی و فولادی استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت بدر^۱ آلمان و سیم برنجی استفاده شده ساخت شرکت استم^۲ آلمان بود. دستگاه پرس استفاده شده در این تحقیق از نوع سمبه ماتریسی و به صورت عمودی بوده که برای تهیه گرین‌های تحقیقاتی با قطر محدود استفاده می‌شود. دستگاه توسط عبور جریان آب گرم از داخل آن در دمای ۷۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد ثابت شد.

۲-۵- نحوه ساخت نمونه‌ها

برای ساخت پیشرانه دو پایه به روش اکسترودی در مرحله اول ساخت پیشرانه، اجزاء مواد پودری و کریستالی (کلیه اجزا به غیر از نرم کننده، نیتروسولوز، حلال و PVK) جهت اختلاط و همگن سازی توزین گردید. این اجزاء که شامل پایدارکننده‌ها، تعدیل کننده‌های بالستیکی، تسهیل کننده‌های فرآیند و... بودند در یک مخلوط کن هم زده شدند، به گونه‌ای که به صورت یک مخلوط یکنواخت در آیند و اجزاء آن قابل تشخیص نباشد. سپس عملیات کنت یا خمیری کردن انجام پذیرفت و پس از هوا دهی و خشک کردن، عملیات والز انجام گرفت و در آخر نیز عمل اکستروژن (به وسیله پرس کردن رول‌های حاصل از مرحله ولز در دستگاه پرس) و عملیات تکمیلی انجام پذیرفت.

روش ساخت بیان شده، روشی است که برای ساخت پیشرانه‌های دوپایه در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش ساخت طراحی شده در این تحقیق دقیقاً مشابه با روش مورد استفاده برای ساخت پیشرانه دوپایه در صنعت است با این تفاوت که تغییراتی در مرحله اکستروژن کردن و پرس انجام گرفته است که این موضوع در زیر به تفصیل توضیح داده شده است.

۱-۲-۵- روش معمول برای پرس کردن پیشرانه

برای درک بهتر روش ساخت طراحی شده ابتدا روش ساخت معمول نمونه‌های مدادی جهت تولید نمونه‌های شاهد توضیح داده می‌شود و سپس به بیان روش طراحی شده می‌پردازیم.

در روش معمول برای پرس کردن پیشرانه و تهیه نمونه‌های مدادی، ابتدا رول مورد نظر جهت نرم شدن و آمادگی برای پرس برای مدت حدود ۳ ساعت در داخل گرم کن پرس و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

همان طور که در شکل (۴) دیده می‌شود تا فاصله ۲cm از سطح سوزش که مقدار شکاف بین پیشرانه و مفتول برابر صفر است (برای همه نمونه‌ها) بیشترین مقدار سرعت سوزش دیده می‌شود. از فاصله ۲cm تا ۴cm از سطح سوزش اولیه بیشترین کاهش در سرعت سوزش برای نمونه‌ای که بیشترین شکاف را دارد دیده می‌شود. بعد از آن یعنی از فاصله ۴cm تا ۶cm از سطح سوزش اولیه (که شکاف بین پیشرانه و مفتول برای نمونه‌های مختلف متفاوت بود) بیشترین سرعت سوزش مربوط به نمونه‌ای است که کمترین شکاف را دارد (X= ۲μ) و کمترین سرعت سوزش مربوط به نمونه‌ای است که بیشترین شکاف را دارد (X= ۲۰μ). در انتهای نمودار پیک تیزی مشاهده می‌شود (افزایش ناگهانی در سرعت سوزش را داریم) که علت آن کاهش ناگهانی مقدار شکاف بین پیشرانه و مفتول و در نتیجه افزایش ناگهانی سرعت سوزش است. ارتفاع این پیک برای نمونه‌ای که بیشترین شکاف را دارد بلندتر است، زیرا میزان تغییر شکاف آن بیشتر است. بنابراین بلندترین پیک انتهای نمودار مربوط به نمونه‌ای است که کمترین شکاف را دارد (X= ۲μ) و کوتاه‌ترین پیک انتهای نمودار مربوط به نمونه‌ای است که بیشترین شکاف را دارد (X= ۲۰μ) [۹].

مطابق با این رفرنس هر چه فاصله پیشرانه و مفتول بیشتر شود سرعت سوزش نیز کمتر می‌شود و اگر فضای خالی زیاد شود منجر به انفجار می‌شود که راه حل جلوگیری از این عمل استفاده از پوشش بر روی مفتول فلزی است.

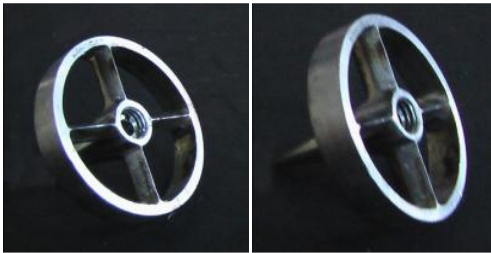
۵- بخش تجربی

۱-۵- مواد و تجهیزات

در این تحقیق از دو نوع پیشرانه جامد دوپایه تهیه شده به روش اکسترودی که با A و B نام‌گذاری شده‌اند، استفاده شده است. فرمولاسیون‌های پیشرانه A و B مورد استفاده در این تحقیق حاوی ۵۰

1- Bedra
2- Stamm

بود درون پیشرانه قرار گیرد به دور این قرقره پیچیده می‌شد. برای بیرون آمدن سیم فلزی از فضای تعبیه شده سوراخی در وسط آن ایجاد شد. قطر این سوراخ باید تقریباً به اندازه سیمی باشد که بر روی قرقره پیچیده می‌شود و نباید اختلاف زیادی با قطر سیم استفاده شده داشته باشد زیرا ممکن است در هنگام ساخت نمونه و پرس شدن پیشرانه، مقداری از پیشرانه از میان فضای خالی بین سیم و سوراخ وسط چهار پر وارد محفظه تعبیه شده شود و موجب متوقف شدن عمل سیم گذاری و پاره شدن سیم فلزی گردد. در این تحقیق قطر سوراخ ایجاد شده وسط چهار پر برابر با 0.130 میلی متر بود (شکل ۷). قرقره‌ای که سیم فلزی مورد نظر به دور آن پیچیده شده بود درون فضای خالی بالای چهار پر قرار گرفت و دربی طراحی و ساخته شد که پس از پیچیدن آن، درب بر روی قرقره قرار می‌گرفت و محکم می‌شد و از ورود پیشرانه به داخل فضای تعبیه شده جلوگیری می‌کرد (شکل ۸).



شکل ۷- چهار پر طراحی شده از دو نمای مختلف.

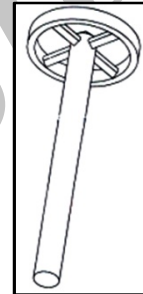


شکل ۸- تصویر درب ساخته شده برای قرار دادن بر روی فضای تعبیه شده (محل قرار گرفتن قرقره).

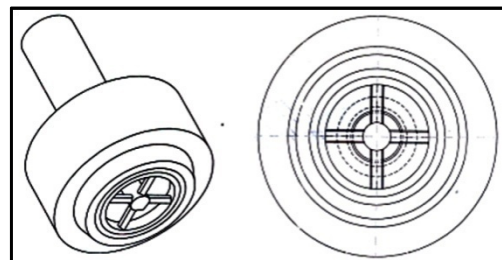
طراحی و ساخت ماتریس جهت انجام سیم گذاری: فضای خالی درون چهار پر طراحی شده برای قرارگیری قرقره تعبیه شده بود، بنابراین چهار پر مقداری حجیم‌تر شده و درون ماتریس معمولی قرار نمی‌گرفت. به همین علت مجبور به طراحی ماتریسی بودیم که چهار پر ساخته شده درون آن قرار گیرد. جنس این ماتریس از برنج بود (شکل ۹).

انتخاب جنس و قطر فلز به عنوان مفتول کار گذاشته شده در گرین: نقطه ذوب، هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی فلز به کار رفته به عنوان مفتول در افزایش سرعت سوزش نقش بسزایی دارد. هر چه نقطه ذوب، هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی فلز به کار رفته شده بیشتر باشد، به همان نسبت نیز سرعت سوزش افزایش می‌یابد. فلزات مس، فولاد و

قرار گرفت. سپس چهار پر و ماتریس مورد نظر درون دستگاه پرس قرار داده می‌شود. بسته به اینکه نمونه با چه قطری و به صورت حفره دار و یا بدون حفره مد نظر ما باشد، ماتریس و چهار پر متفاوتی را استفاده کردیم. پس از قرار دادن چهار پر و ماتریس در دستگاه پرس و قرار دادن رول‌های پیشرانه درون مخزن پرس، اعمال فشار توسط دستگاه پرس و عبور پیشرانه از مجموعه قالب منجر به شکل دهی و متعاقب آن تولید نمونه‌های مدادی گردید. بسته به اینکه ساخت نمونه بدون حفره و یا حفره دار مد نظر باشد چهار پر متفاوتی درون دستگاه پرس نصب شد. مثلاً اگر بخواهیم نمونه با قطر داخلی مشخص تولید کنیم باید از چهار پری که در آن میله‌ای با همان قطر تعبیه شده است استفاده کنیم. برای درک بهتر شمایی از چهار پری که جهت ساخت پیشرانه حفره مرکزی استفاده شده و همچنین شمایی از چهار پر وقتی که در ماتریس قرار دارد در شکل (۵) و (۶) آورده شده است.



شکل ۵- چهار پر جهت ساخت پیشرانه حفره مرکزی.



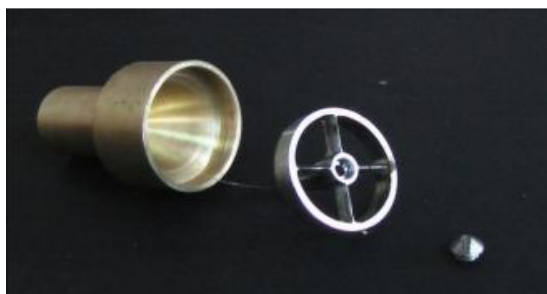
شکل ۶- چهار پر در درون ماتریس (از دو نمای مختلف).

گرین‌های شاهد (بدون سیم) با قطر 6 mm به صورت استوانه‌ای به شرح فوق ساخته شدند (شکل ۷).

۵-۲-۲- روش ساخت پیشرانه سیم گذاری شده در مرحله پرس

برای ساخت پیشرانه سیم گذاری شده، یعنی قرار دادن سیم درون پیشرانه در مرحله پرس کردن طرحی پیشنهاد شد که بر اساس آن باید چهار پر و ماتریس جدیدی به شرح زیر ساخته می‌شد.

طراحی و ساخت چهار پر جهت انجام سیم گذاری: برای انجام سیم گذاری در این تحقیق چهار پری طراحی شد که در وسط در قسمت بالای چهار پر، محلی برای قرار دادن قرقره تعبیه شد. سیمی که قرار



شکل ۱۰- نحوه قرار گرفتن چهار پر و قرقره درون ماتریس.



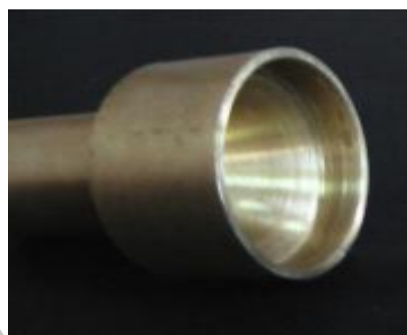
شکل ۱۱- نمونه‌های مدادی سیم گذاری شده.

وجود سیم فلزی در وسط تمام طول نمونه پیشرانه و عدم پاره شدگی و پیچ خوردگی بسیار مهم است. برای بررسی دقیق نحوه سیم گذاری از نمونه‌های ساخته شده تصاویر x-ray تهیه شد (شکل ۱۲). مشاهده می‌شود که سیم فلزی در پیشرانه سیم گذاری شده با روش طراحی شده دقیقاً در وسط نمونه ساخته شده قرار دارد و هیچ گونه پاره شدگی و پیچ خوردگی درون آن شکل نگرفته است.

۶- نتایج و بحث

برای بررسی میزان تأثیر مفتول‌های فلزی کار گذاشته شده درون گرین پیشرانه، در ابتدا گرین‌های پیشرانه A و B ساخته شده به عنوان شاهد (نمونه ساخته شده بدون سیم و با ترکیب درصد ذکر شده) مورد آزمون سرعت سوزش قرار گرفتند. سپس سرعت سوزش نمونه‌های سیم گذاری شده که با همان ترکیب درصد پیشرانه شاهد ساخته شده بودند اندازه گیری شد. برای انجام آزمون سوزش از روش استرنده برنر استفاده شده است. آزمون‌های سرعت سوزش در این تحقیق در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تحت فشارهای ۰.۷۰، ۰.۸۰، ۰.۹۰، ۱.۰۰ و ۱.۱۰ بار انجام پذیرفت (جدول ۴). لازم به ذکر است که همه نمونه‌های سیم گذاری شده در پیشرانه نوع B در حین آزمون سرعت سوزش منفجر شدند.

برنج انتخاب شدند و از آنها سیم‌هایی با قطر ۰/۲۵ mm تهیه شد (جدول ۲). با توجه به اینکه هدف اصلی، طراحی روشی ساده و با قابلیت صنعتی شدن برای ساخت گرین‌های سیم گذاری شده است، بنابراین سعی شد که با توجه به منابع موجود، سیم‌های فلزی با جنس و قطری ساخته شود که بیشترین افزایش در سرعت سوزش از آن انتظار می‌رفت. قطر سوراخ ایجاد شده وسط چهار پر برابر با ۰/۳۰ میلی متر بود و با استفاده از امکانات موجود سوراخ کوچک‌تری نمی‌توانستیم وسط چهار پر ایجاد کنیم (برای ایجاد سوراخ‌های با قطر کمتر نیاز به دستگاه لیزر است). بنابراین سیم‌هایی با قطر ۰/۲۵ mm انتخاب شد.



شکل ۹- ماتریس طراحی شده برای دستگاه پرس.

جدول ۳- هدایت گرمایی و نقطه ذوب سیم‌های فلزی استفاده شده.

جنس مفتول	نقطه ذوب (°C)	هدایت گرمایی در ۲۰ °C (W/m.K)	تشنه گرمایی در ۶۵۰ °C (cm ² /sec)
مس	۱۰۸۳	۴۰.۱	۰/۹۰
برنج	۹۳۰	۱۰.۹	۰/۲۱
فولاد	۱۵۰۰	۴۳	۰/۰۶۴

انجام سیم‌گذاری در مرحله پرس: برای ساخت نمونه‌های سیم‌گذاری شده، ابتدا سیم مورد نظر که با قطر مشخص (با قطری کمتر از قطر ایجاد شده وسط چهار پر یعنی کمتر از ۰/۳۰ میلی متر) تهیه شده را به دور قرقره پیچیده و درون فضای خالی تعبیه شده در وسط چهار پر قرار داده شد. سپس چهار پر درون ماتریس برنجی و سپس درون دستگاه پرس قرار گرفت (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که مقداری از سیم باید از سوراخ وسط چهار پر بیرون آورده شود.

به منظور نرم شدن و شکل پذیری، نمونه حدود ۳ ساعت داخل گرم کن پرس در دمای ۸۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از روشن کردن دستگاه پرس، پیشرانه‌ای که از بین پره‌های چهار پر بیرون آمد، سیم فلزی را در وسط خود به بیرون می‌کشید. نمونه‌های تولید شده به طول حدود ۱۸ سانتی متر بریده شده و در هوای آزاد سرد شدند (شکل ۱۱).

۹-۱- تأثیر مفتول فلزی بر سرعت سوزش (برای پیشرانه A)

ترتیب، مفتول فولادی با اینکه هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی کمتری نسبت به مفتول برنجی دارد ولی با این حال سرعت سوزش را بیشتر افزایش داده است. این مطلب را می توان این گونه توجیه کرد که چون نقطه ذوب فولاد بیشتر از برنج است (تقریباً ۱/۵ برابر) بنابراین مدت زمان بیشتری می تواند در منطقه شعله باقی بماند، پس مدت بیشتری انتقال حرارت از گازهای داغ به مفتول صورت می گیرد و مفتول مدت زمان بیشتری دما را درون پیشرانه هدایت می کند، بنابراین سرعت سوزش را بیشتر از مفتول برنجی افزایش می دهد.



شکل ۱۲- x-ray تهیه شده از پیشرانه سیم گذاری شده با سیم مسی، برنجی و فولادی.

محاسبات مربوط به معادله سرعت سوزش و میزان افزایش سرعت سوزش برای نمونه شاهد پیشرانه A و نمونه های سیم گذاری شده در پیشرانه A در ۲۰ درجه سانتی گراد در جدول (۵) آورده شده است. در شکل (۱۳) نمودار سرعت سوزش بر حسب فشار برای این پیشرانه ها رسم شده است.

نسبت سرعت سوزش پیشرانه A با سیم و بدون سیم (جدول ۶)، نشان می دهد که بیشترین افزایش سرعت سوزش مربوط به نمونه سیم گذاری شده با استفاده از سیم مسی است (۳/۹ برابر) و کمترین افزایش سرعت سوزش مربوط به نمونه سیم گذاری شده با استفاده از سیم برنجی است (۳/۰۹ برابر). این اختلاف در میزان افزایش در سرعت سوزش پیشرانه ریشه در هدایت گرمایی، تشعشع گرمایی و نقطه ذوب مفتول فلزی کار گذاشته شده در درون پیشرانه دارد. هر چه هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی فلز به کار رفته شده بیشتر باشد، به همان نسبت نیز سرعت سوزش افزایش می یابد. هدایت گرمایی و تشعشع گرمایی مس از فولاد و برنج بیشتر است، بنابراین همان گونه که از آزمون های سرعت سوزش دیده می شود، سرعت سوزش را بیشتر افزایش داده است. از طرف دیگر، هر چه نقطه ذوب مفتول بیشتر باشد، نرخ افزایش سرعت سوزش نیز بیشتر می شود، زیرا نقطه ذوب بالاتر مفتول باعث می شود مدت بیشتری در منطقه شعله باقی بماند، پس مدت بیشتری انتقال حرارت از گازهای داغ به مفتول صورت می گیرد و مفتول مدت زمان بیشتری دما را درون پیشرانه هدایت می کند. بدین

جدول ۴- نتایج آزمون سرعت سوزش برای نمونه شاهد و نمونه های سیم گذاری شده با سیم های مسی، برنجی و فولادی در ۲۰ درجه سانتی گراد و فشارهای مختلف برای پیشرانه A.

فشار (bar)					
۱۱۰	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	
۱۱/۶۴	۱۱/۴۵	۱۱/۲۷	۱۱/۰۰	۱۰/۷۸	سرعت سوزش نمونه شاهد بدون سیم گذاری (mm/s)
۴۶/۰۱	۴۴/۹۸	۴۴/۳۰	۴۱/۹۲	۴۱/۶۷	سرعت سوزش نمونه های سیم گذاری شده با سیم مسی (mm/s)
۴۲/۳۵	۳۸/۵۹	۳۵/۶۱	۲۹/۹۲	۲۷/۷۸	سرعت سوزش نمونه های سیم گذاری شده با سیم برنجی (mm/s)
۴۳/۱	۴۲/۶	۴۲/۲	۴۱/۶۸	۴۰/۹۲	سرعت سوزش نمونه های سیم گذاری شده با سیم فولادی (mm/s)

جدول ۵- محاسبات مربوط به معادله سرعت سوزش و میزان افزایش سرعت سوزش برای نمونه شاهد پیشرانه A و نمونه های سیم گذاری شده در پیشرانه A در ۲۰ درجه سانتی گراد.

نمونه با سیم فولادی	نمونه با سیم برنجی	نمونه با سیم مسی	نمونه شاهد	
۳۷۹/۶	۲۵۷/۷	۳۸۶/۵	-	۷۰ bar
۳۷۸/۹	۲۷۲/۰	۳۸۱/۱	-	۸۰ bar
۳۷۴/۴	۳۱۶/۰	۳۹۳/۱	-	۹۰ bar
۳۷۲/۰	۳۳۷/۰	۳۹۲/۸	-	۱۰۰ bar
۳۷۰/۳	۳۶۳/۸	۳۹۵/۳	-	۱۱۰ bar
۳۷۵	۳۰۹	۳۹۰	-	میانگین افزایش سرعت سوزش (%)
۰/۱۱۱	۰/۹۷۲	۰/۲۳۷	۰/۱۷۱	نمای فشاری
۲۵/۴۸	۰/۴۴	۱۵/۰۷	۵/۱۹	ضریب سرعت سوزش
$r = 25.48 p^{0.111}$	$r = 0.44 p^{0.972}$	$r = 15.07 p^{0.237}$	$r = 5.19 p^{0.171}$	معادله سرعت سوزش

$$a = a \exp[\sigma_p (T_i - T^\circ_i)] \quad (1)$$

که در این معادله:

$$T_i = \text{دمای اولیه برای نمونه}$$

$$T^\circ_i = \text{دمای اولیه نمونه شاهد}$$

$$a = \text{ضریب سرعت واکنش در دمای } T^\circ_i$$

$$a = \text{ضریب سرعت واکنش در دمای } T_i$$

$$\sigma_p = \text{حساسیت سرعت سوزش در دمای اولیه تحت فشار ثابت است که}$$

مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_p = \left(\frac{\delta \ln r}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{r} \left(\frac{\delta r}{\delta T} \right)_p \quad (2)$$

عوامل مانند نوع و مقدار ذرات جامد، فشار عملکردی، نوع و مقدار کاتالیزورهای بالستیکی و ترکیب درصد سوخت و نوع فرآیند ساخت بر حساسیت سرعت سوزش نقش دارند. در برخی گزارشات ذکر شده است استفاده از مفتول فلزی درون پیشرانه اغلب باعث افزایش ضریب سرعت سوزش می‌شود [۲۵]. نتایج به دست آمده نیز نشان می‌دهند که نمونه‌های سیم گذاری شده با استفاده از سیم‌های مسی و فولادی ضریب سرعت سوزش بالاتری نسبت به نمونه بدون سیم دارند (جدول ۷).

جدول ۷- ضریب سرعت سوزش برای نمونه‌های سیم گذاری شده.

نمونه	ضریب سرعت سوزش
نمونه شاهد	۵/۱۹
نمونه سیم گذاری شده با سیم مسی	۱۵/۰۷
نمونه سیم گذاری شده با سیم برنجی	۰/۴۴
نمونه سیم گذاری شده با سیم فولادی	۲۵/۴۸

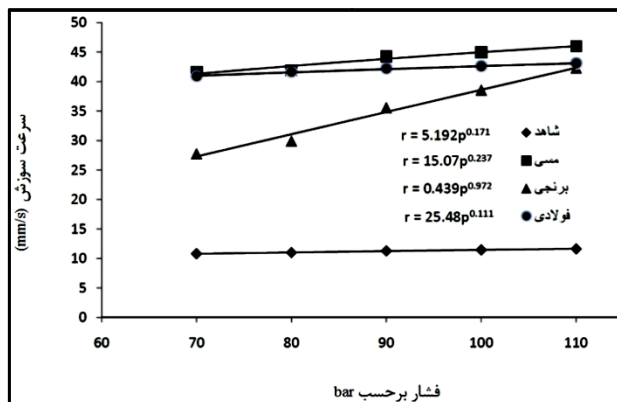
۴-۶- علت انفجار نمونه‌های سیم گذاری شده در پیشرانه B در

حین آزمون سرعت سوزش

یکی از نکات قابل توجه در ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده، لزوم چسبیدن سیم فلزی به پیشرانه و عدم وجود فضای خالی بین مفتول و پیشرانه است. هر چه اندازه شکاف بین مفتول و پیشرانه بیشتر باشد، سرعت سوزش نیز پایین‌تر خواهد بود. از طرفی اگر شکاف بین مفتول و پیشرانه زیاد باشد، گازهای داغ حاصل از احتراق در فضای خالی بین مفتول و پیشرانه نفوذ کرده و ممکن است موجب انفجار شود [۲۷] و [۱۹]. علت انفجار پیشرانه‌های سیم گذاری شده نوع B مربوط به خواص رئولوژی این نوع پیشرانه است. در واقع، مفتول فلزی قرار داده شده در پیشرانه B به خوبی به پیشرانه نمی‌چسبد و بین پیشرانه و مفتول فلزی فضای خالی وجود دارد. این امر سبب شده که گازهای داغ حاصل از احتراق در فضای خالی بین مفتول و پیشرانه نفوذ کند و موجب انفجار نمونه‌های سیم‌گذاری شود. برای جلوگیری از این مشکل می‌توان از پوشش بر روی سیم فلزی استفاده کرد [۲۷].

جدول ۶- نسبت سرعت سوزش پیشرانه A با سیم و بدون سیم.

جنس سیم	نسبت سرعت سوزش نمونه با سیم و بدون سیم
مس	۳/۹۰
برنج	۳/۰۹
فولاد	۳/۷۵



شکل ۱۳- نمودار سرعت سوزش بر حسب فشار برای نمونه‌های سیم‌گذاری شده با استفاده از سیم‌های فولادی، مسی و برنجی و نمودار سرعت سوزش بر حسب فشار برای نمونه شاهد A.

۶-۲- تأثیر مفتول فلزی بر نمای فشار (برای پیشرانه A)

نمای فشار (n) مستقل از دمای اولیه گرین است و تأثیر فشار محفظه احتراق بر سرعت سوزش را بیان می‌کند. افزایش دمای اولیه گرین هیچ تغییری در انرژی شیمیایی آزاد شده پیشرانه در حین احتراق ایجاد نمی‌کند و صرفاً سرعت واکنش‌هایی را که منجر به آزاد سازی انرژی می‌شود را تغییر می‌دهد، بنابراین افزایش یا کاهش دمای اولیه گرین تأثیری بر نمای فشار نخواهد داشت [۱].

در همه نمونه‌های سیم گذاری شده نسبت به نمونه‌های بدون سیم (نمونه‌های شاهد) نمای فشاری افزایش یافته است که این افزایش برای نمونه‌ها با سیم‌های با جنس مختلف متفاوت است (برای نمونه برنجی افزایش میزان نمای فشاری بیشتر از بقیه نمونه‌ها است). این مطلب نشان دهنده این است که نمای فشاری پیشرانه‌های سیم گذاری شده به جنس سیم فلزی کار گذاشته درون پیشرانه وابسته است. افزایش نمای فشاری برای نمونه سیم گذاری شده با سیم برنجی از بقیه نمونه‌ها بیشتر است و برای نمونه با سیم فولادی کم‌ترین افزایش در میزان نمای فشاری دیده می‌شود.

۶-۳- تأثیر مفتول فلزی بر روی ضریب سرعت سوزش برای

پیشرانه A

ضریب سرعت سوزش یک عدد بی بعد نیست و وابسته به دمای اولیه گرین پیشرانه است [۲]. در زیر رابطه ضریب سرعت سوزش آورده شده است:

۷- نتیجه گیری

با وجود ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده از سال ۱۹۵۰، تکنیک ساخت گرین‌های سیم گذاری شده به روش اکسترودی هنوز در کشور ما به کار گرفته نشده است. شاید این موضوع به این دلیل باشد که روش ساخت پیشرانه‌های سیم گذاری شده با استفاده از روش اکسترودی در هیچ یک از منابع قابل دسترس وجود ندارد. در این مقاله، ضمن پیشنهاد روشی برای ساخت پیشرانه‌های دویایه سیم‌گذاری شده به روش اکسترودی، نمونه‌هایی از پیشرانه‌های سیم گذاری شده با سیم‌های فلزی با قطرهای مشخص و جنس‌های متفاوت ساخته شد و آزمون‌های سرعت سوزش و آنالیز x-ray انجام شد. روش پیشنهاد شده در این تحقیق روشی بسیار ساده و کاربردی است و امکان عملی شدن آن در فاز صنعتی نیز وجود دارد. از تصاویر x-ray گرفته شده از نمونه‌ها کاملاً مشخص است که سیم گذاری در نمونه‌ها به بهترین نحو ممکن یعنی بدون هیچ پیچ خوردگی و یا پارگی سیم و در وسط گرین انجام شده است. نتایج نشان داد که هدایت گرمایی، تشعشع گرمایی و نقطه ذوب فلز به کار رفته به عنوان مفتول در پیشرانه مفتول گذاری شده در افزایش سرعت سوزش نقش بسزایی دارند. در همه نمونه‌های سیم گذاری شده، نسبت به نمونه بدون سیم (نمونه‌های شاهد) نمای فشاری بیشتر بود که این افزایش در نمای فشاری برای نمونه‌ها با سیم‌های با جنس مختلف متفاوت بود. سیم مسی از بقیه عملکرد بهتری داشته است، زیرا علاوه بر افزایش بیشتر در سرعت سوزش، تغییر زیادی در نمای فشاری پیشرانه ایجاد نکرده است.

مراجع

- [10] Zayed, M. A.; Adel, A. M.; Hassan, M. "Stability Studies of Double-Base Propellants with Centralite and Malonanilide Stabilizers Using MO Calculations in Comparison to Thermal Studies"; J. Hazard. Mater. 2010, 179, 453-461.
- [11] Gould, R. F.; Klager, K. "Propellants Manufacture, Hazards, and Testing"; Division of Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society, 1969.
- [12] Homburg, A.; Brachert, H. "Technology of the Screw Extrusion Process for the Manufacture of Double Base Rocket Propellants"; Propellants, Explos., Pyrotech. 1977, 2, 69-74.
- [13] Mark, B. "An Evaluation of a Variable Thrust Forced Cone Burning Solid Rocket Motor"; Commonwealth of Australia, DSTO-TR-0116, 1995.
- [14] Xie, Y. Li.; You Wang, X. "Effect of Wire with Coating on P-T Curve of End Burning D.B. Propellant Grain Embedded with Metal Wire"; Xian Modern Chemistry Research Institute, ICT, 1988, 55/1-55/9.
- [15] Xie, Y. L.; Yang, X. Y. "The Process by Which Double Base Propellants with Embedded Continuous Wires are Fabricated by Use of the Screw Extruder"; Ft. Belvoir Defense Technical Information Center. FTD-ID(RS)T-1830-82, 1983.
- [16] Hongqing, H. "Calculations of Burning Surfaces of Propellant Grain with Embedded Metal Wires and of Internal Ballistics of Such Motor"; Foreign Technology, 1985.
- [17] Winch, P. C.; Irvine, R. D. "Active Control of Solid Propellant Consumption Rate by Forced Cone Burning"; Defence J. Propulsion. 1986, 4, 104-110.
- [18] Winch, P. C.; Irvine, R. D. "Forced Cone Burning for Active Control of Solid Propellant Burning Rate"; Weapons Systems Research Laboratory Defence Science and Technology Organ Salisbury, South Australia, 25th Joint Propulsion Conference, AIAA-86-1710, 1986.
- [19] Gossant, B.; Godfroy, R. "Theoretical Calculus of Burning Rate Ratio in Grains with Embedded Metal Wires"; Propulsion Conference Boston, 1988, 3, 11-13.
- [20] Kubota, N. "Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires"; J. AIAA. 1981, 20, 116-121.
- [21] Yuli, X.; Xiyon, W. "Combustion Performance of Double-Base Propellant Grain Embedded With Continuous Metal Wires Processed in Screw Extruder"; Xian Modern Chemistry Research Institute, Xian, ICT, 111, 1992.
- [22] Rumbel, K. E.; Cohen, M. "Propellant Grains"; US Patent 3,109,374, 1963.
- [23] Bofors, N. "Analytical Methods for Powder and Explosives"; AB Bofors Nobelkurt. 1974.
- [24] Xiong, W. L.; Yang, J. S. "Effects of Main Grain Design Parameters of an Embedded Metal-Wire Grain"; J. Solid Rocket Tech. 2008, 31, 38-42.
- [25] Shuling, C.; Fengsheng, Li. "Influence of Long Metal Wires on Combustion of Double-base Propellant"; Combust. Flame. 1982, 45, 213-218.
- [26] David, R. "Handbook of Chemistry and Physics (CRC)"; Lide Taylor & Francis Group Version, 2010.
- [27] فارغی علمداری، رضا و موسوی ندوشن، سید امان اله "استفاده از پوشش بر روی مفتول فلزی در پیشرانه جامد"، مجله علمی-ترویجی تحقیق و توسعه مواد پرنرژ، سال ششم، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۲، صفحه ۴۱، پاییز و زمستان ۱۳۸۹.
- [1] Davenas, A. "Solid Rocket Propulsion Technology"; first ed. Pergmon Press 1993.
- [2] Kubota, N. "Propellants and Explosives"; Thermochemical Aspects of Combustion; Second, Completely Revised and Extended Edition, Wiley-VCH, 2007.
- [3] Sutton, G. P. "Rocket Propulsion Elements"; Wiley-Interscience: Canada, 7th Ed, 1985.
- [4] Folly, P.; Mader, P. "Propellant Chemistry"; Chimia, Germany 2004, 58, 313-329.
- [5] Kyung, H. S.; Changjin, L.; Seon, Y. C. "The Enhancement of Regression Rate of Hybrid Rocket Fuel by Various Methods"; Honkuk University, Seoul, Korea 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, Nevada. AIAA-359, 2005.
- [6] Blair, M. "An Evaluation a Variable Thrust Forced Cone Burning Solid Rocket Motor"; Weapons Systems Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory DSTO-TR-0116, 1995.
- [7] Rumbel, K. E.; Robert, M. C.; Nugent G.; Scurlock, A. C. "Propellant Grains"; US Patent 3,116,692, 1955.
- [8] Caveny, L. H.; Glick, R. L. "Influence of Embedded Metal Fibers on Solid-Propellant Burning Rate"; J. Spacecraft. 1967, 4, 79-85.
- [9] Merrill, K. K. "Analytical Modeling of Effects of Wires on Solid Motor Ballistics"; J. Propulsion 1990, 7, 312-321.