

مطالعه و بررسی اجزاء یک پیشرانه مرکب کم دود

زهرا صالحی^{۱*}، محمد حسین کشاورز^۲، محمد قربانی فراز^۳

اصفهان - شاهین شهر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی

(زهرا صالحی: salehi.chem@gmail.com)

چکیده

در تهیه سوخته‌های مرکب باید به مسائل زیادی توجه کرد. از آن جمله می‌توان به انرژی و ایمپالس بالا، دود کمتر و به صرفه بودن هزینه‌ها اشاره کرد. در این کار سعی شده ضمن بررسی چند فرمولاسیون معمول برای پیشرانه‌های مرکب، ترکیباتی انتخاب شود که ضمن به صرفه بودن، از نظر انرژی و ایمپالس ویژه شرایط مناسبی داشته و حتی الامکان دود کمتری ایجاد کنند.

واژه‌های کلیدی: سوخت مرکب - بایندر - پلاستی سایزر - دود - ایمپالس ویژه

۱- مقدمه

معمولاً یک سوخت مرکب شامل سه جزء اصلی بایندر، اکسید کننده و سوخت (غالباً پودر فلزی) همراه با افزودنی‌هایی چون پلاستی سایزرها، عوامل پیوندی و مرطوب کننده‌ها، پایدارکننده‌ها، عوامل پخت و کاتالیزورهای سرعت سوزش می‌باشد. در طراحی سوخت مرکب انتخاب هر یک از این اجزاء بسته به کاربرد و اهداف مورد نظر است. مسلماً سوخت ایده‌آل وجود ندارد ولی تهیه سوختی با مشخصات بهتر هدف همه‌ی سازندگان است. از ویژگی‌های یک سوخت خوب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱ تا ۶]:

- انرژی بالا
- پایداری کافی
- سازگاری اجزای پیشرانه با یکدیگر
- داشتن حداکثر دانسیته
- محصولات احتراق با وزن کم
- مقاومت در برابر عوامل خارجی
- حداکثر استحکام فیزیکی
- تغییر اندک با دما
- سهولت ذخیره سازی
- حساسیت کم به ناخالصی‌ها
- سهولت اتصال به قطعات فلزی سازه
- تولید گازهای خروجی غیر قابل رویت، غیرسمی، غیر خورنده و غیر روشن (Nonluminous)

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد پیشرانه

^۲ - استاد دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ - مربی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

- سوختن با سرعت مناسب، پایدار و قابل پیش بینی در شرایط عملیاتی

۲- گامی در جهت کاهش دود و انتخاب اکسید کننده و کمک اکسید کننده‌ی مناسب

از جمله مسائلی که امروزه مورد توجه است مسئله‌ی دود می‌باشد. که علاوه بر دلایل امنیتی در موشک‌های تاکتیکی، از نظر آلودگی محیط زیست نیز مهم و مورد توجه می‌باشد. بر حسب نوع و مقدار محصولات احتراق روش متداولی برای طبقه‌بندی پیش‌رانه‌ها وجود دارد که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- طبقه بندی پیش‌رانه‌های مرکب از نظر دود [۱]

شماره	عوامل ایجاد دود در پیش‌رانه	دود ثانویه	دود اولیه	طبقه بندی
۱	بدون پودر فلزی و یون هالید(پرکلرات آمونیوم)	ندارد	ندارد	بدون دود
۲	بدون پودر فلزی یا در حد ناچیز و پرکلرات آمونیوم کمتر از ۲۰٪	کم	بسیار کم	کم دود
۳	دارای مقداری پودر فلزی و پر کلرات آمونیوم در حد زیاد	دارد	مقداری	دود کاهش یافته
۴	دارای پودر فلزی و پر کلرات آمونیوم مطابق سوخته‌های مرکب عادی	دارد	دارد	دود دار

محصولات احتراق ناشی از پودرهای فلزی و اکسید کننده‌هایی نظیر آمونیوم پر کلرات (AP)، ایجاد دودهای اولیه و ثانویه می‌کنند که از مهمترین عوامل ایجاد دود می‌باشند. بنابراین اولین گام کاهش و حتی حذف پودر فلزی (معمولا آلومینیم) می‌باشد. در گام بعدی می‌توان مصرف موادی مانند آمونیوم پرکلرات را به حداقل رساند. اما این اصلاحات باعث شده کارایی سوخت بشدت کاهش یابد. برای حفظ کارایی این سوخت کم (بدون) دود لازمست از ترکیبات نیتروآمین استفاده شود. از بهترین نیتروآمینها HMX می‌باشد که با توجه به در دسترس بودن و تهیه‌ی آن در ایران، قیمت نسبتا مناسب (با توجه به مزایای آن و در مقایسه با قیمت ترکیباتی چون CL20 و...) و همچنین ویژگیهایی چون:

- کاهش جرم مولکولی محصولات احتراق
- کاهش دمای محصولات احتراق به دلیل افزایش تعداد ذرات سبک در محصولات احتراق
- کاهش خوردگی محصولات احتراق به دلیل کاهش تولید یونهای هالیدی و فلزی [۱، ۳، ۴، ۸]

جایگزین مناسبی برای پودر آلومینیم و پرکلرات آمونیوم می‌باشد. در کار حاضر در یک فرمولاسیون نظری پودر آلومینیم را تا زیر ۲۰٪ کاهش داده و از HMX بجای کسری از پرکلرات آمونیوم استفاده می‌شود و اثر آن بر روی ایمپالس ویژه و دود مورد بررسی قرار گرفته و با داده‌های کارهای تجربی قبل که توسط Rm. Muthiah و همکارانش [۷] انجام شده، مقایسه می‌شود.

*جدول ۲- اثر استفاده از HMX بر روی دود HCl، ایمپالس ویژه و دمای محفظه احتراق**

درصد HMX	محتوای HCl در خروجی (٪وزنی)	ایمپالس ویژه در فشار ۷۰ بار (S)	ایمپالس ویژه در خلاء در فشار ۷۰ بار (S)	دمای محفظه احتراق (K)
۰	۱۶/۲	۲۶۵/۴	۲۹۰/۵	۳۵۳۰/۲۹
۱۰	۱۳/۳	۲۶۶/۹	۲۹۱/۶	۳۴۵۶/۲۴
۲۰	۱۰/۷۱	۲۶۷/۸	۲۹۲/۰	۳۳۵۹/۲۳
۲۵	۹/۳۵	۲۶۷/۵	۲۹۱/۶	۳۲۹۴/۸۵
۳۰	۵/۵۳	۲۶۵/۲	۲۸۸/۴	۳۲۱۲/۲۱
۴۰	۲/۹۲	۲۵۹/۰	۲۸۲/۸	۲۹۶۶/۴۹
۵۰	۲/۱	۲۵۶/۶	۲۸۰/۵	۲۷۶۳/۱۱
۶۰	۱/۱۴۵	۲۵۵/۳	۲۷۹/۲	۲۷۲۳/۱۷
۶۵	۰/۵۹	۲۵۴/۷	۲۷۸/۶	۲۷۰۰/۳۳

*در این سوختها ۸۸٪ فاز جامد بکار رفته و متشکل از: ۱۸٪ آلومینیوم، ۱۲٪ بایندر و ۷۰٪ آمونیوم پرکلرات + HMX می باشد.

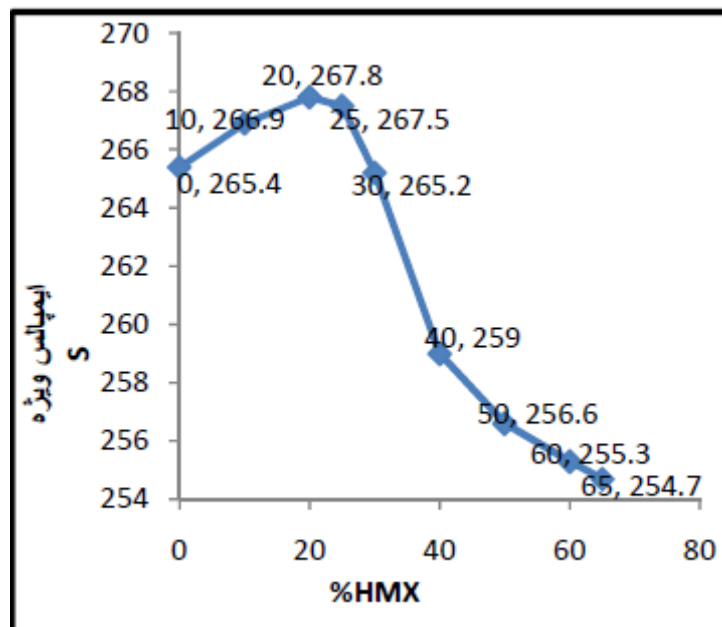
** داده‌ها با نرم افزار NASA-CEA 96 در فشار محفظه (فشار عملکرد موتور) ۷۵ bar و نسبت A_e/A_t برابر با ۸ محاسبه شده‌اند.

می‌توان داده‌های بدست آمده از جدول (۲) را با برخی داده‌های کارهای تجربی قبل [۷] که در جدول (۳) آمده است مقایسه کرد. ترکیب سوخت در هر دو جدول یکسان در نظر گرفته شده‌است. می‌بینیم که داده‌ها به هم نزدیک هستند.

جدول ۳- اثر استفاده از HMX بر روی دود HCl، ایمپالس ویژه و دمای محفظه احتراق (داده‌های کارهای تجربی قبل توسط Rm. Muthiah و همکارانش) [۷]

درصد HMX	محتوای HCl در خروجی (٪وزنی)	ایمپالس ویژه در فشار ۷۰ بار (S)	ایمپالس ویژه در خلاء در فشار ۷۰ بار (S)	دمای محفظه احتراق (K)
۰	۲۰/۶	۲۶۵/۱	۲۸۸/۵	۳۶۱۳
۱۰	۱۷/۴	۲۶۶/۸	۲۹۱/۹	۳۵۵۰
۲۰	۱۴/۶	۲۶۸/۰	۲۹۲/۷	۳۴۶۹
۲۵	۱۳/۱	۲۶۸/۱	۲۹۲/۷	۳۴۱۷
۳۰	۱۱/۰	۲۶۷/۷	۲۹۲/۰	۳۳۵۴

اگر به داده‌های دو جدول بالا و نمودار (۱) که ایمپالس بر اساس درصد HMX است توجه کنیم، در می‌یابیم که با افزایش درصد HMX تا حدود ۲۰٪، ایمپالس بالا می‌رود. اما بعد از آن با افزایش در مقدار HMX نه تنها افزایشی در ایمپالس مشاهده نشده بلکه ایمپالس ویژه رو به کاهش می‌رود.



نمودار ۱- ایمپالس ویژه بر اساس %HMX

بنابر این مشاهدات، تصمیم گرفته شد که در ترکیب سوخت مورد نظر از آلومینیوم صرفه نظر شود و حدود ۲۰٪ HMX جایگزین آمونیوم پراکرات شود. تا ضمن کاهش دود، انرژی نیز به میزان کافی تامین شود و ایمپالس ویژه‌ی مناسبی داشته باشیم.

۳- انتخاب باینردی مناسب

سیستم نگهدارنده‌ی سوخت یا بایندر یکی از مهمترین قسمتهای سوخت‌های جامد می‌باشد که نحوه‌ی احتراق، خواص مکانیکی و شرایط بالیستیکی این سوختها را کنترل می‌کند. غالب پیشرفتهای صورت پذیرفته برای بهبود سوخت‌های جامد در ارتباط با بررسی بایندر سوخت بوده‌است. بایندر باید خواص مهمی را دارا باشد که عبارتند از:

- توانایی ایجاد واکنش شیمیایی با اکسیدان به صورت اگزوترمیک بطوری که باعث کاهش دمای محفظه احتراق نگردد.
- توانایی حمل و نگهداری ذرات جامد و انواع فیلر(حداقل ۸۰٪ حجم خود) را داشته باشد.
- توانایی پلیمر شدن و شبکه‌ای شدن را داشته باشد.
- پخت خوبی داشته باشد و خواص مکانیکی خود را در سوخت حفظ کند. در واقع باید توانایی تحمل تنش‌های مختلف را بدون گسیختگی بافت سوخت داشته و رفتار ویسکوالاستیک مناسبی از خود نشان دهد.

بایندر دارای اجزای مختلفی مانند پیش پلیمر، پلاستی سائزر و سیستم پخت و... می‌باشد. پیش پلیمر قسمت اصلی بایندر در سوخت‌های مرکب می‌باشد که ۷۰ تا ۸۰ درصد آن را تشکیل می‌دهد. این اجزا به عنوان بدنه‌ی اصلی بایندر خواص اصلی آن را ایجاد می‌کنند و معمولاً بر اساس ماهیت انواع زنجیره‌ها یا خواص انواع گروه‌های عاملی‌شان طبقه بندی می‌شوند. اولین سوخت مرکب ساخته شده دارای بایندر ترموپلاستیکی مانند آسفالت، پلی وینیل کلراید و پلی ایزو بوتیلن بوده‌اند. برای این منظور لازم بود تا این ترکیبات ذوب شوند و این کار دمای بالایی را در فرآیند تولید نیاز داشت. حدود سال ۱۹۵۰ میلادی، اولین بایندر مایع قابل شبکه‌ای شدن تهیه شد. این نوع از بایندر نسبت اکسیدان به سوخت را بالا می‌برد و در تولید صنعتی بازا هر ۱۰ تن از سوخت حدود یک تن مواد پلیمری احتیاج می‌شود. خیلی سریع استفاده از این نوع بایندرها توسعه یافت و کاربردی شد که بدلیل حجم بالای تولید سوخت از این روش بود. این توسعه در دو دوره‌ی زمانی انجام شد. از ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۵ میلادی که سوخت‌های مرکب ساختاری از بایندر پلی سولفاید(تیوکول)، پلی اورتان و پلی اتر داشتند و از ۱۹۶۵ تا هم اکنون که بایندرهای جدید با پایه‌ی پلی بوتادین بررسی شده‌اند.

این پلیمرهای جدید خواص الاستومری بایندر را بهبود داده و قابلیت نگهداری ذرات جامد را در سوخت افزایش می‌دهند و در محدوده‌ی گسترده‌ای از دما بخصوص دماهای پایین خواص مکانیکی مطلوبی در سوخت ایجاد می‌کنند [۱، ۲، ۳، ۸، ۹].

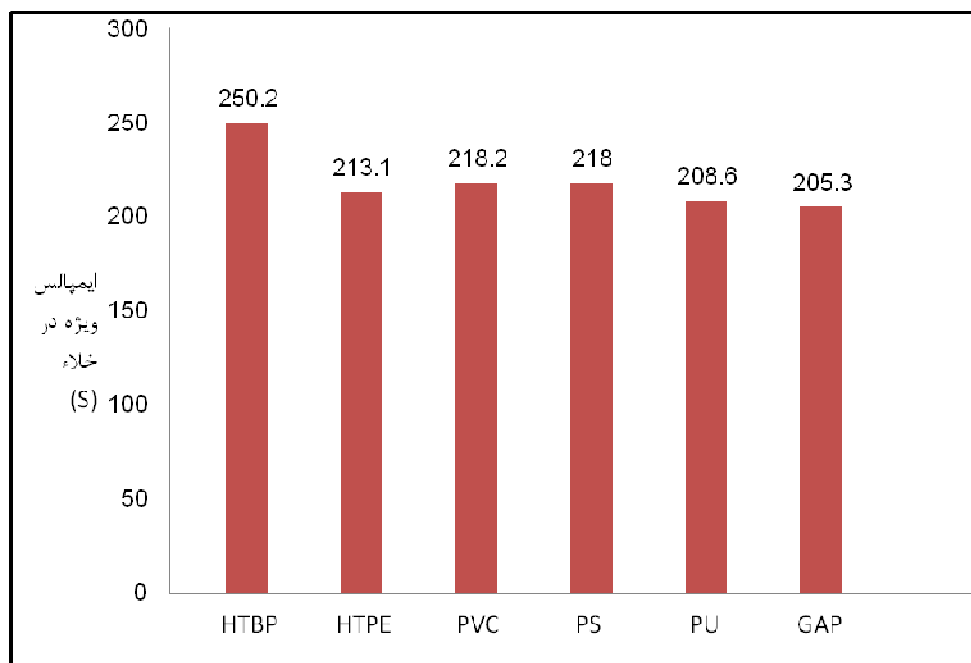
در ادامه‌ی کار چند پیش پلیمر رایج در سوخت‌های مرکب از نظر دود، ایمپالس و اثری که بر دمای محفظه احتراق دارند بررسی و مقایسه شده است تا پیش پلیمر بهتر انتخاب شود. نتایج در جدول ۴ و نمودارهای ۲ تا ۵ آمده‌است.

*جدول ۴- برخی ویژگیهای و دادههای بدست آمده برای پیش پلیمرهای رایج**

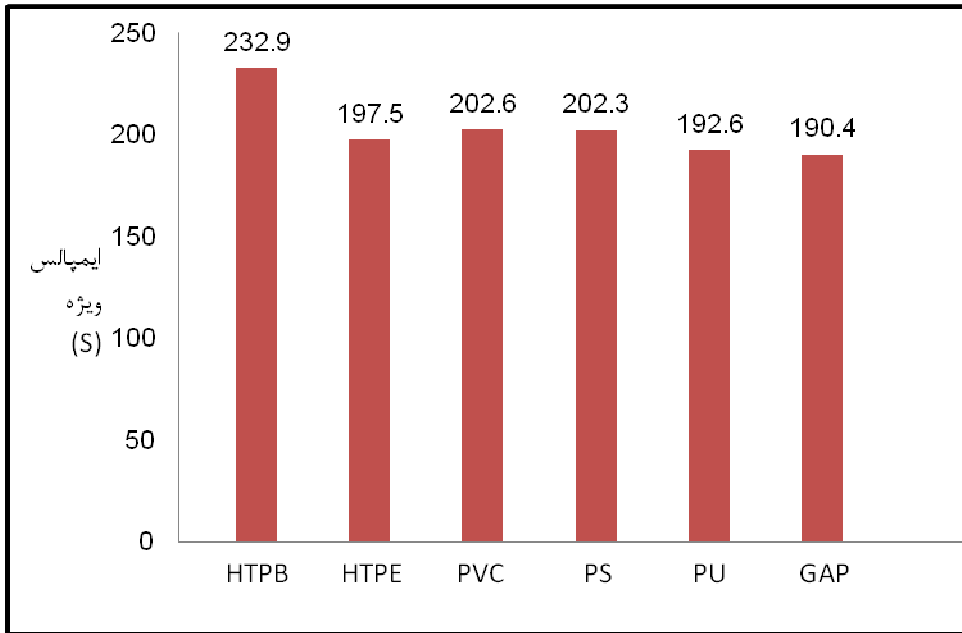
پیش پلیمر	دانسیتته (g/cm^3)	ایمپالس ویژه در فشار ۷۰ بار (S)	ایمپالس ویژه در خلاء در فشار ۷۰ بار (S)	دود(درصد وزنی ترکیبات کلر دار)	دمای احتراق (K)	محفظه
HTPB	۰/۹۳	۲۳۲/۹	۲۵۰/۲	۱۰/۲۶	۲۴۳۳/۴۹	
HTPE	۰/۹	۱۹۷/۵	۲۱۳/۱	۱۱/۴۵	۱۸۹۶/۲۴	
PVC	۱/۴۱	۲۰۲/۶	۲۱۸/۲	۱۶/۱۱	۲۱۰۸/۷۴	
PS	۱/۲۷	۲۰۲/۳	۲۱۸	۱۲/۰۷	۲۰۶۸/۵۲	
PU	۱/۰۰	۱۹۲/۶	۲۰۸/۶	۱۱/۱۴	۱۶۸۰/۷۴	
GAP	۱/۲۶۱	۱۹۰/۴	۲۰۵/۳	۱۱/۸۴	۱۸۲۰/۵۲	

* ترکیب سوخت مورد بررسی در اینجا شامل: ۶۰٪ آمونیوم پراکلرات، ۲۰٪ HMX، ۱۸٪ بایندر(پیش پلیمر، عامل پخت، پلاستی سازیر و عامل پیوندی) و ۲٪ کاتالیزور سرعت سوزش اکسید آهن (Fe_2O_3) می باشد.

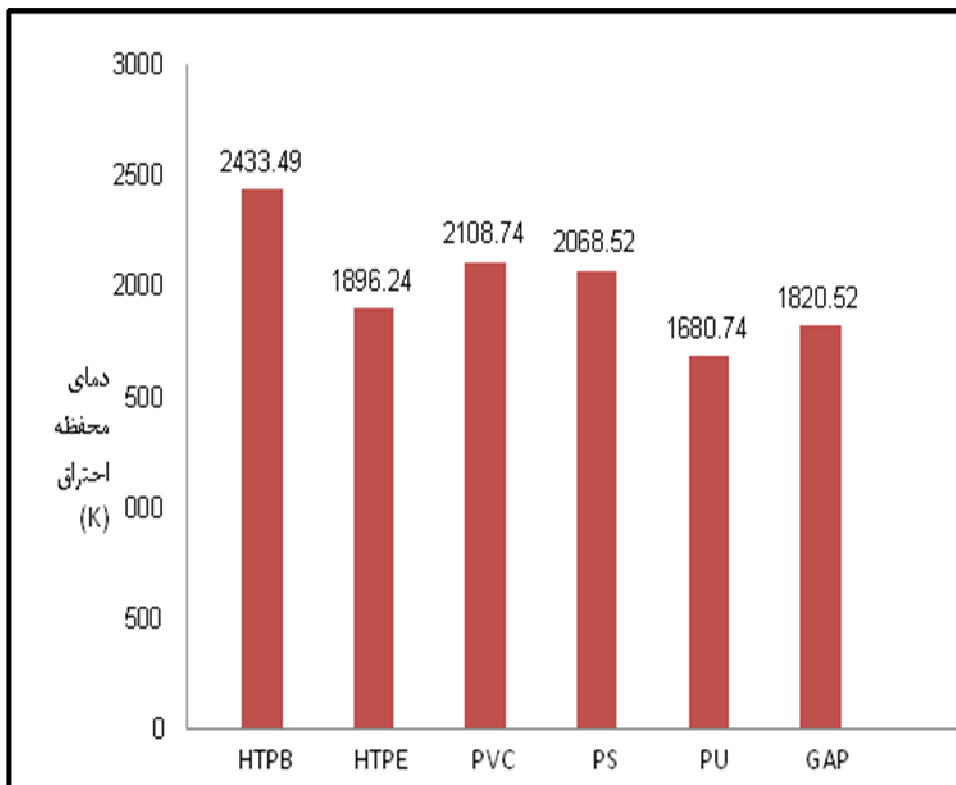
** دادهها با نرم افزار NASA-CEA 96 در فشار محفظه(فشار عملکرد موتور) ۷۵ bar و نسبت A_4/A_e برابر با ۸ محاسبه شده اند.



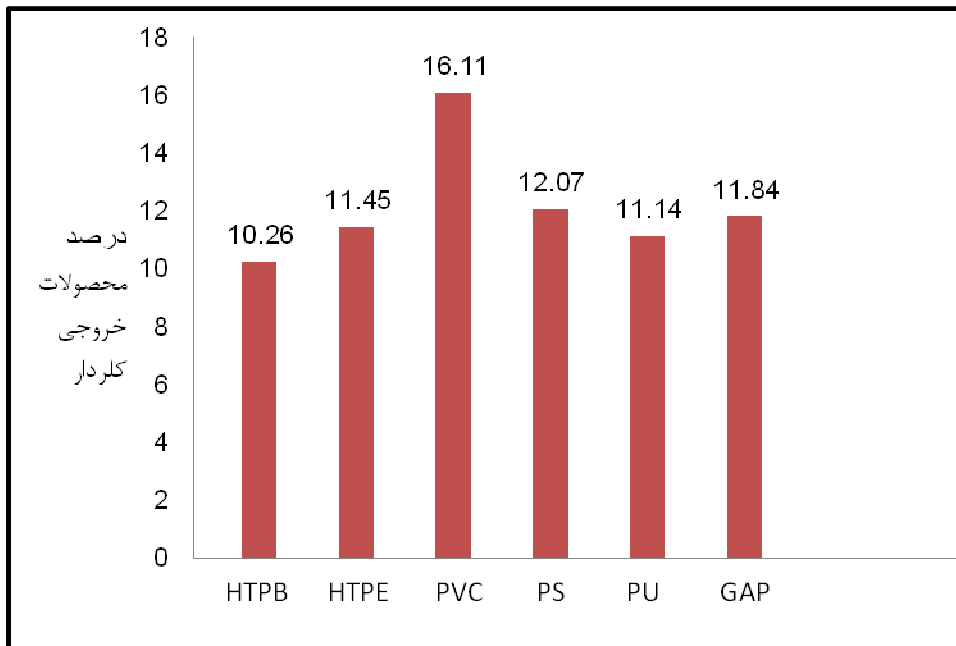
نمودار ۲- ایمپالس ویژه در خلاء برای چند پیش پلیمر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۳- ایمپالس ویژه برای چند پیش پلیمر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۴- دمای محفظه احتراق برای چند پیش پلیمر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۵- درصد محصولات کلردار برای چند پیش پلیمر ضمن سوزش در فشار ۷۰ بار

با دقت در جدول (۴) و نمودارهای بالا به خوبی می‌توان پی‌برد که در ترکیب سوخت مورد نظر از بین این پیش پلیمرها پلی بوتادین با گروه‌های هیدروکسی انتهایی (HTPB) از بقیه مناسبتر است، چرا که از نظر دود، انرژی و ایمپالس شرایط بهتری دارد. HTPB اولین بایندر خنثی است که کاربرد فراوان پیدا کرده‌است و نشان داده که سازگاری خوبی در ترکیب پیش‌رانه‌های مرکب با اجزایی چون آمونیوم پرکلرات و... دارد.

۴- انتخاب پلاستی سایزر

سوخته‌های مرکب معمولاً قابلیت بالایی برای پذیرش فاز جامد دارند که میزان این توانایی ارتباط تنگاتنگی با نوع و مقدار بایندر و پلاستی سایزر بکار رفته در سوخت دارد. با افزایش مقدار فاز جامد، تعیین نوع و مقدار بایندر و پلاستی سایزر از حساسیت بیشتری برخوردار می‌گردد. پلاستی سایزرها معمولاً برای بهبود فرآیندپذیری و خواص مکانیکی سوخت بکار گرفته می‌شوند. اما استفاده از این ترکیبات مسائلی چون پدیده‌ی مهاجرت، پایداری شیمیایی و حرارتی، تبخیر و قیمت بالای سنتز آنها را نیز به همراه دارد. پلاستی سایزرها به دو دسته‌ی کلی خنثی و انرژی‌زا تقسیم می‌شوند. اغلب پلاستی سایزرهای انرژی‌زا نمی‌توانند در سوخته‌های مرکب کم دود انرژی بالایی را ایجاد کنند و معمولاً در این نوع سوخته‌ها بکار نمی‌روند. به طور کلی پلاستی سایزرهای خنثی از نظر ساختاری به دو دسته‌ی کلی استری و هیدروکربنی طبقه‌بندی می‌شوند. پلاستی سایزرهای استری، اغلب استرهای آلیفاتیک و آروماتیک اسیدهای آلی ۶ تا ۱۲ کربنه می‌باشند. این اجزاء دارای عوامل قطبی کربونیلی، اکسیژن استری و رشته‌های هیدروکربنی غیرقطبی می‌باشند که قسمت قطبی با اجزاء قطبی در آمیزه‌ی سوخت مرکب و قسمت غیر قطبی با اجزاء غیرقطبی آمیزه‌ی سوخت برهمکنش ایجاد می‌کند. در نتیجه پلاستی سایزر استری مانند یک پل، اجزاء قطبی را با غیر قطبی به هم پیوند می‌دهد که با توجه به ساختار و گروه‌های عاملی آن، این قابلیت متفاوت می‌شود.

پلاستی سایزرها در واقع نقش حلال را برای بایندر ایفا می‌کنند و نباید آنها را با نرم‌کننده‌ها یکی دانست. پلاستی سایزرها بعنوان کاهنده‌ی ویسکوزیته در شرایطی که غلظت اجزاء افزایش می‌یابد عمل می‌کنند. و معمولاً در بایندرهای غیرانرژی‌زا مانند HTPB ۱۰ تا ۵ قسمت از بایندر را تشکیل می‌دهند. پلاستی سایزرهای استری بدلیل داشتن عوامل قطبی و غیرقطبی کاربرد بیشتری نسبت به پلاستی سایزرهای هیدروکربنی دارند که تنها توانایی انحلال اجزاء غیرقطبی را در خود دارند [۱، ۲،

۳، ۱۰، ۱۱]. از اینرو در ادامه‌ی کار اثر چند پلاستی سایزر خنثی و استری که غالباً در این سوخته‌های مرکب کم دود بکار می‌رود مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج در جدول ۵ و نمودارهای ۶ تا ۹ آمده است.

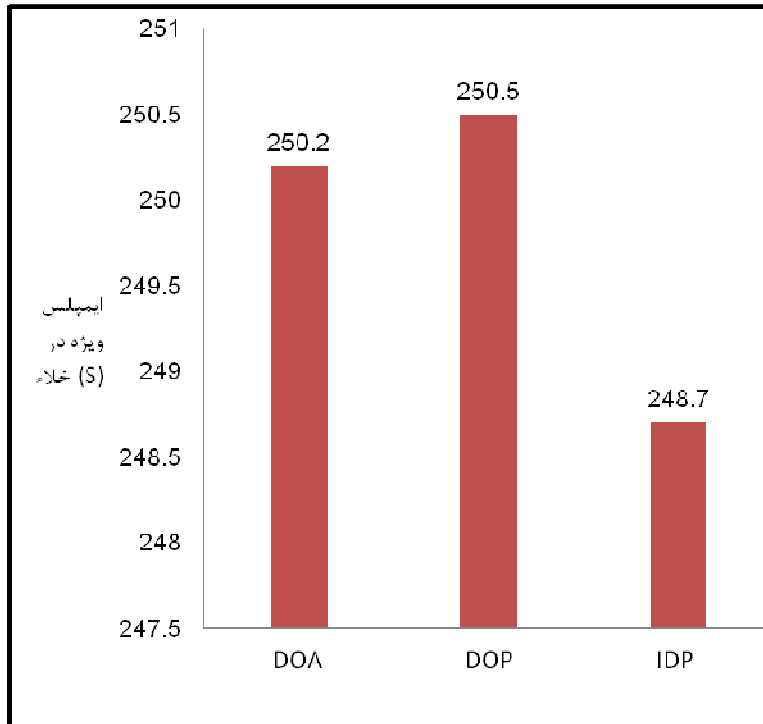
جدول ۵- برخی ویژگیها و داده‌های بدست آمده برای چند پلاستی سایزر معمول**

پلاستی سایزر	نوع	دانسیته (g/cm ³)	ایمپالس در خلا در فشار ۷۰ بار (S)	ایمپالس در فشار ۷۰ بار (S)	دمای محفظه احتراق (K)	دود (درصد وزنی ترکیبات کلر دار)
DOA	خنثی، استری	۰/۹۳۲	۲۵۰/۲	۲۳۲/۹	۲۴۳۳/۴۹	۱۰/۲۶
DOP	خنثی، استری	۰/۹۸۵	۲۵۰/۵	۲۳۳/۱	۲۴۵۷/۶۲	۱۰/۳۵
IDP	خنثی، استری	۰/۸۶۲	۲۴۸/۷	۲۳۱/۵	۲۳۷۵/۸۸	۱۰/۱۱

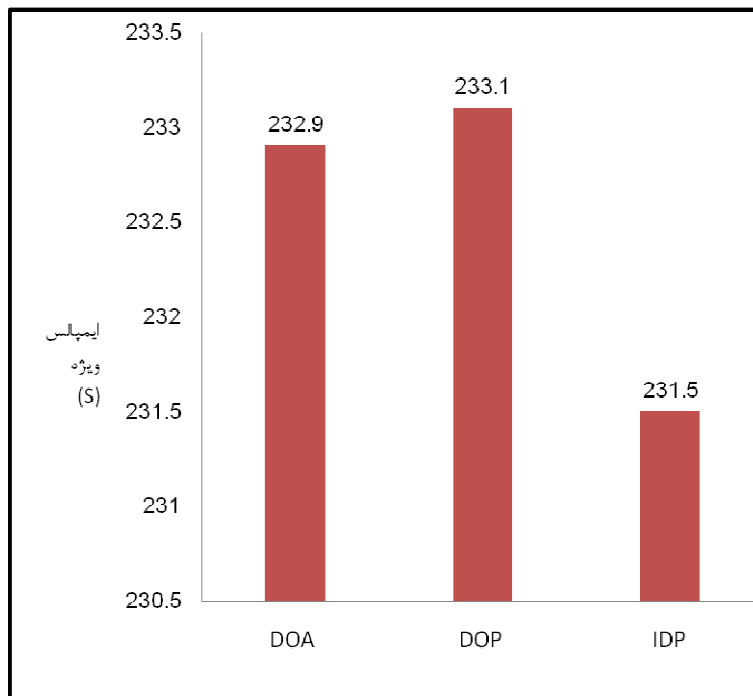
* ترکیب سوخت مورد بررسی در اینجا شامل: ۶۰٪ آمونیوم پرکلرات، ۲۰٪ HMX، ۱۸٪ بایندر (پیش پلیمر، عامل پخت، پلاستی سایزر و عامل پیوندی) و ۲٪ کاتالیزور سرعت سوزش اکسید آهن (Fe₂O₃) می‌باشد.

** داده‌ها با نرم افزار NASA-CEA-96 در فشار محفظه (فشار عملکرد موتور) ۷۵ bar و نسبت A_t/A_e برابر با ۸ محاسبه شده‌اند

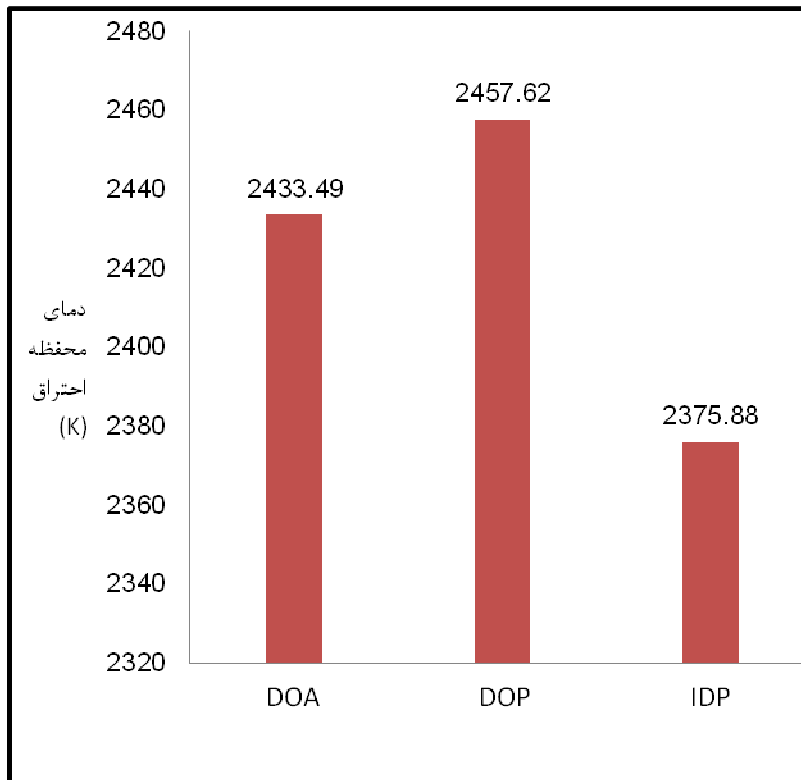
از این بین دی اکتیل آدیپات (DOA) و ایزو دسیل پلارگونات (IDP) ویسکوزیته‌ی آمیزه‌ی سوخت را بیشتر کاهش می‌دهند. DOA و IDP به عنوان تسهیل کننده فرآیند ساخت و اختلاط نقش موثری را در سوخته‌های مرکب ایفا می‌کنند. DOA همانطور که از داده‌های بالا قابل استنتاج است از نظر دود، انرژی و همچنین به دلیل دسترسی راحت و قیمت نسبتاً پایین آن مناسب بوده و در سوخته‌های مرکب کم دود با بایندر HTPB کاربرد زیادی دارد.



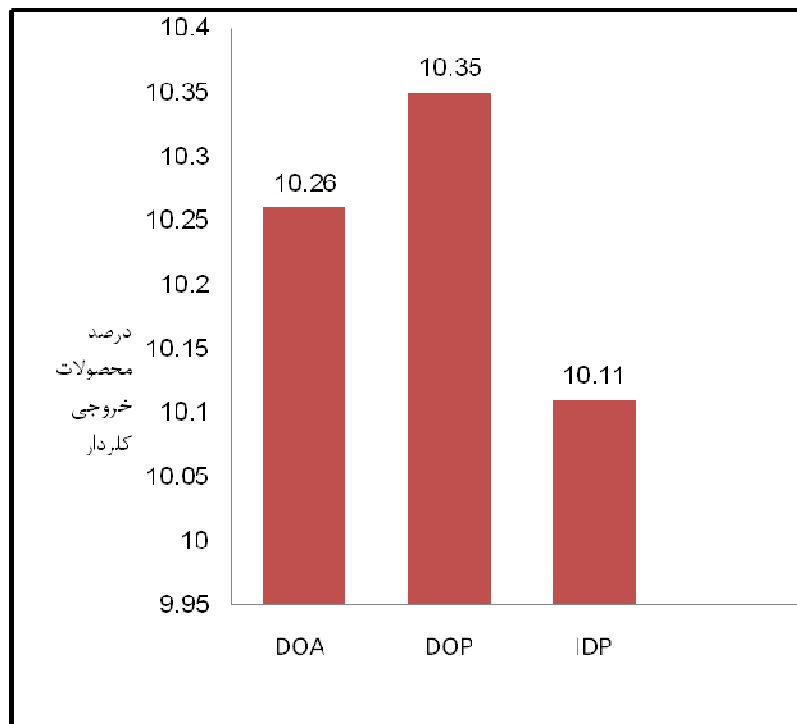
نمودار ۶- ایمپالس ویژه در خلاء برای چند پلاستی سایزر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۷- ایمپالس ویژه برای چند پلاستی سایزر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۸- دمای محفظه احتراق برای چند پلاستی سایزر در فشار ۷۰ بار



نمودار ۹- درصد وزنی محصولات خروجی کلردار برای چند پلاستی سایزر در فشار ۷۰ بار.

۵- نتیجه گیری

برای تهیه‌ی سوخت مناسب لازم است که در انتخاب تمامی اجزاء توجه کافی صورت گیرد تا سوختی مطلوب مطابق معیارهای مورد نظر تهیه شود. از جمله مهمترین معیارهای مورد نظر در تهیه سوختهای مرکب: انرژی، دود، ایمنی و به صرفه بودن هزینه هاست. در سوختهای مرکب معمولاً دود عامل مزاحمی به شمار می‌رود. بنابراین سعی شده تا میزان آن به حداقل رسانده شود. منابع عمده تولید دود در این سوختها پودر فلزی و آمونیوم پرکلرات (AP) است که عامل اصلی ایجاد انرژی نیز می‌باشند. بنابراین سعی میشود تا از ترکیبات انرژی‌تیک جدید در سوختهای مرکب کم دود یا بدون دود استفاده شود. استفاده از این گونه ترکیبات باید به گونه‌ای بوده که ضمن حل مشکل دودزایی، کارایی سوخت را نیز حفظ کنند. از مناسبترین ترکیبات نیتروآمین، HMX است که طبق بررسی‌ها بهتر است تا ۲۰٪ جایگزین AP شود و پودر فلزی به کلی حذف شود. از مهمترین قسمت‌های سوخت، بایندر است بنابراین باید در انتخاب آن دقت کرد. پیش پلیمر HTPB یکی از مناسبترین پیش پلیمرها در سوختهای مرکب کم دود می‌باشد. این پیش پلیمر علی‌رغم غیر انرژی‌تیک بودن، توانایی حمل فاز جامد بالا، سازگاری با اجزای دیگر و در بین دیگر پیش پلیمرهای غیر انرژی‌تیک از نظر دود و ایمپالیس وضعیت بهتری را دارا می‌باشد. در سوختهای مرکب با درصد فیلر بالا باید از پلاستی سایزر استفاده کرد. DOA پلاستی سایزر منتخب ماست. چرا که از حیث فرآیندپذیری، زمان ریخته‌گری، دود، قیمت و دردسترس بودن مناسبتر است.

تشکر و قدر دانی

از مساعدت و راهنمایی‌های کلیه‌ی دوستان و همکلاسیها بسیار سپاسگزارم.

مراجع

- 1- Davenas, A., Solid Rocket Propulsion Technology, Pergomon Press, France: 1993.
- 2- Kubota, Naminosuke. Propellant and explosives. Germany: Wiley. 2007.
- 3- Timnot, y. M., Advanced Chemical rocket Propulsion, Academic Press Inc, 1987.
- 4- Sakovich, G.V., Design Principles of Advanced Solid Propellants, Journal of Propulsion and Power, Vol. 11. No. 4, 830-838, 1995.
- 5- Iwama, Akira; Hasue, Kasuo., Takahashi T., Matsui K., Kzunari, I., Hydrogenated Hydroxy Terminated Polyisoprene as a fuel Binder for composite solid Propellants, Explos., Pyrotech., 21(1), 43 50, 1996.
- 6- Campbell, D., Cumming, A. S., and Marshall, E.J., Development of Insensitive rocket Propellants Based on Ammonium Nitrate and Polynimmo, Internal Paper, ICI Explosives, Stevenson and Dra, Sevenoaks, England Uk, 1994.
- 7- Muthiah, Rm., Varghese, S. S. R., Ninan, N.K., and Kirishnamurthy, V. N., Realization of an Eco-Friendly Solid Propellant Based on HTPB-HMX-AP System for Launch Vehicle Application, Propellants, Explosives, pyrotechnics 23, 90-93, 1998.
- 8- Menke, K., and Siegfried Eisele, Rocket Propellants with Reduced Smoke and High Burning Rates, Propellants, Explosives, pyrotechnics 22, 112-119, 1997.
- 9- STUTCHBURY, Y.E., Polymers as fuel - Binders for solid Rocket Propellants, the Royal Australian Chemical Insitute, Proceedings, June, 145-149, 1970
- 10- Gordon, E., Tactical Missile Propulsion, AIAA, Vol. 107, July 1996.
- 11- Provates, A., Energetic Polymers and Plasticizers for Explosive Formulation- A Review of Recent Advances. DSTO-TR- 0966, 2000.