

## بررسی تاثیر میزان و اندازه ذرات AP و RDX بر سرعت سوزش و خواص مکانیکی نوعی سوخت XLDB با دود کاهش یافته

سعید عباسی<sup>\*</sup>، محمود رضا محمودی نژاد<sup>۲</sup>

سازمان صنایع هوافضا

(تاریخ وصول: ۹۰/۲/۶، تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۱۷)

### چکیده

در این مقاله طراحی و تولید فرمولاسیون‌های مختلف از نوعی سوخت دوپایه شبکه‌ای کم دود (XLDB) با هدف بهینه‌سازی عملکرد بالستیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. سوخت XLDB تولید شده شامل نوعی بایندر پلی اورتانی تحت عنوان پلی کاپرولاکتون می‌باشد و از ترکیبات آمونیوم پرکلرات (AP) و RDX به عنوان اکسیدکننده در آن استفاده شده است. ترکیبات مختلفی از این سوخت به منظور بررسی تاثیر میزان AP و RDX برایمپالس ویژه، سرعت سوزش، خواص مکانیکی نظیر مدول الاستیسیته و تنش تسلیم طراحی و تولید شده است. نتایج بدست آمده از انجام تست‌ها در این تحقیق بیانگر این مطلب است که با افزایش میزان AP از 10% تا 20% و کاهش RDX از 50% به 40%، میزان سرعت سوزش در فشارهای مختلف دستخوش تغییرات زیادی می‌شود. درتست‌های انجام شده، جایگزینی RDX با AP منجر به کاهش توان نمایی سرعت سوزش (n) از مقادیر بالای 0/9 به کمتر از آن و افزایش ایمپالس ویژه (تقریباً 4%) شده است. در ادامه با انجام تست‌های تکمیلی، نقش اندازه ذرات AP و RDX بر روی سرعت سوزش و خواص مکانیکی بررسی شده است. کاهش اندازه ذرات AP تا 5 میکرون به تنهایی موجب کاهش میزان توان نمایی از مقادیر  $n > 0/9$  به  $n < 0/75$  می‌شود. علاوه بر این، استفاده از دوسایز ریز و درشت RDX با نسبت (30/70) افزایش چشم‌گیری در بهبود خواص مکانیکی سوخت داشته است. نتایج بدست آمده از این تحقیق بیانگر این مطلب می‌باشد که استفاده از اندازه ذرات ریز AP و RDX موجب بهبود عملکرد بالستیکی و انجام تست‌های ایمن و دور از انفجار در موتورهای حاوی این سوخت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سوخت XLDB، پلی کاپرولاکتون، آمونیوم پرکلرات، RDX، ایمپالس ویژه، توان نمایی.

### 1- مقدمه

شامل اختلاط در یک هم‌زن خورشیدی، عملیات پخت با افزودن عواملی نظیر N=100، IPDI، TDI و ریخته‌گری درون قالب می‌باشد. تفاوت‌های پایه‌ای و مهم بین سوخت‌های دوپایه و XLDB وجود دارد که عبارتند از: عملکرد محدود سوخت‌های دوپایه به لحاظ فرآیندی و بالستیکی و نیز عملکرد ضعیف مکانیکی سوخت‌های دوپایه در دماهای پایین. بنابراین سوخت‌های دوپایه نیازمند بهبود در این زمینه‌ها می‌باشند و با استفاده از سوخت‌های XLDB این نوع مشکلات برطرف می‌شود [1-3]. در سامانه‌های موشکی که سیستم هدایت آن لیزری و یا رادار می‌باشد، استفاده از سیستم‌های پیش‌رانه

سوخت‌های دوپایه بهبود یافته شبکه‌ای شده (XLDB)، نوعی از سوخت‌های جامد می‌باشد که انرژی و ایمپالس ویژه بالایی دارند و میزان دود تولید شده از گازهای خروجی آن پایین است. این نوع سوخت‌ها شامل بایندرهای پلی‌اورتانی از نوع پلی استر یا پلی اتر، نیترو گلیسرین (NG) و یا سایر استر نیترات‌های مایع کم انرژی‌تر و با حساسیت کمتر (BTTN، TMETN) به عنوان نرم کننده پر انرژی و ذرات جامد نظیر AP، RDX و HMX تحت عنوان اکسیدکننده می‌باشد. فرآیند تولید سوخت‌های XLDB به ترتیب

\* E-mail: saaid\_abbasi@yahoo.com

مقاله، در فرمولاسیون سوخت‌ها، از بایندر پلی کاپرولاکتون (PCP) با جرم مولکولی 2000 و نرم کننده نیتروگلیسرین (NG) استفاده شده است و همچنین با توجه به اهمیت مساله کاهش دود و کنترل توان نمایی سرعت سوزش در سوخت‌های XLDB، به بررسی تأثیر میزان AP و RDX و اندازه ذرات آن‌ها بر سرعت سوزش سوخت و خواص مکانیکی این نوع سوخت پرداخته‌ایم. طبق گزارش‌های ارائه شده، ایجاد تغییرات در رفتار سوزشی سوخت‌های XLDB با استفاده از بهبود دهنده‌های فلزی سرعت سوزش، به میزان بسیار محدودی امکان‌پذیر است. به همین دلیل، هدف اصلی این تحقیق، بهینه‌سازی سرعت سوزش این نوع سوخت‌ها با افزایش میزان AP و همچنین کاهش اندازه ذرات AP و RDX می‌باشد.

## 2- بخش تجربی

### 2-1- ترکیب سوخت

در فرمولاسیون طراحی شده، مقادیر AP بین 10% تا 20% و در اندازه ذرات ریز و درشت 5 و 200 میکرون است. میزان RDX مورد استفاده بین 40% تا 50% و در اندازه ذرات ریز و درشت 10 و 150 میکرون می‌باشد. در این تحقیق 8 نوع فرمولاسیون از سوخت (براساس تغییرات میزان AP و RDX) مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات آن‌ها در جدول 1 آمده است (در تمام فرمولاسیون‌ها نسبت NG/PCP برابر 2/2 می‌باشد).

سوخت XLDB با فرمولاسیون‌های اشاره شده در جدول 1 با استفاده از فرآیند ریخته‌گری دوغای بی تولید می‌شود، به این ترتیب که ابتدا مواد در میکسر خورشیدی به مدت 20 ساعت مخلوط می‌شوند، سپس عامل پخت به آن افزوده شده و در نهایت تحت خلأ در قالب‌های مخصوص ریخته‌گری می‌شوند.

### 2-2- دستگاه‌ها و روش اندازه‌گیری

سرعت سوزش سوخت، در دستگاه بمب کرافورد با استفاده از فشار گاز نیتروژن محاسبه شد. برای این کار نمونه‌ای از سوخت به صورت یک میله با مقطع مستطیلی با ابعاد  $100 \times 5 \times 5$  میلی‌متر تهیه و سطح آن توسط عایق پلی وینیل فرمال پوشیده شد. گرمای حاصل از انفجار سوخت توسط دستگاه LECO، مدل AC-350 در فشار 400 (psi) با جرم مصرفی 1 گرم از سوخت محاسبه شده است. میزان ایمپالس ویژه سوخت نیز توسط نرم افزار ترمودینامیکی CEC محاسبه شده است.

با دود زیاد (دود اولیه- دود ثانویه) مشکلات زیادی را در هدایت و کنترل سامانه ایجاد می‌کند به همین دلیل طراحی و تولید سوخت‌هایی بدون دود و یا کم دود و در عین حال با ایمپالس ویژه بالا نظیر سوخت‌های XLDB بسیار مورد توجه قرار گرفت و اکنون در توسعه موشک‌های با شتاب بالا نقش موثری ایفا می‌کنند [4 و 5]. امروزه به نقش موثر ذرات ریز AP در افزایش سرعت سوزش سوخت‌های XLDB پی‌برده شده است، به طوریکه با افزایش میزان AP ریز در ترکیب این نوع سوخت‌ها سرعت سوزش آن به ویژه در فشارهای پایین رشد چشمگیری پیدا می‌کند. AP به صورت کریستال‌های سفید رنگ تهیه می‌گردد. اندازه و شکل کریستال‌ها در سرعت سوزش پیشرانه مؤثر می‌باشد. بنابراین کنترل اندازه ذرات در فرآیند تولید بسیار مهم می‌باشد این ماده بدلیل خواص ویژه آن نظیر، عملکرد خوب، سازگاری آن با سایر اجزاء پیشرانه و در دسترس بودن آن بطور گسترده‌ای در پیشرانه‌های کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است و می‌توان گفت که این ماده مهمترین اکسیدکننده‌ای است که در حال حاضر بطور عملی در پیشرانه‌های جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد. پتانسیل اکسید کنندگی پرکلرات‌ها بالا است و این عامل موجب ایجاد عملکرد بالا در پیشرانه می‌گردد [6] اما مهمترین مشکل AP و سایر پرکلرات‌ها، تولید HCl و دیگر ترکیبات سمی و خورنده در گازهای خروجی می‌باشد. همین عامل باعث شده است که اکسیدکننده‌های دیگری جهت جایگزینی AP مطرح شوند. بنابراین در سوخت‌های XLDB از پرکننده‌های خانواده پرکلرات‌ها مانند AP در مقیاس زیاد (درصد بالا) نمی‌توان استفاده کرد زیرا میزان تولید دود با افزایش AP در ترکیب زیاد می‌شود، بنابراین از ترکیبات نیتروآمینی مثل HMX و یا RDX به عنوان پرکننده پر انرژی علاوه بر AP در ترکیب استفاده می‌گردد. نیتروآمین‌ها مواد منفجره بسیار قوی هستند که در ساختمان پیشرانه‌های جدید جهت بالا بردن عملکرد آن‌ها و کاهش میزان آلودگی بکار می‌روند. این پیشرانه‌ها دارای محدوده وسیعی از سرعت سوزش، حساسیت کم و دود کاهش یافته هستند. با جایگزینی AP با ترکیبات نیتروآمینی مانند RDX و HMX باید از ترکیبات نرم‌کننده پرانرژی (عموما نیترات استرهای مانند NG) استفاده کرد. این نرم‌کننده باید دارای فاکتور حلالیت<sup>1</sup> نزدیک به فاکتور حلالیت سطحی ذرات نیتروآمینی باشد. پیش پلیمر HTPB سازگاری لازم با نرم کننده نیتروگلیسرین و یا دیگر نیترات استرها را ندارد، لذا باید از پیش پلیمر مناسب دیگری مانند PEG، PPG یا PCP استفاده نمود [7-9]. در این

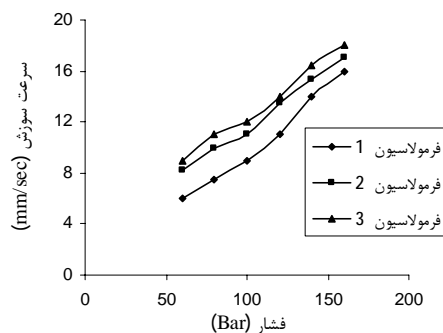
جدول ۱- فرمولاسیون سوخت‌های تولید شده.

PCP + IPDI	NC + NG	RDX (10 میکرون)	RDX (150 میکرون)	AP (5 میکرون)	AP (200 میکرون)	اجزاء تشکیل
						دهنده فرمولاسیون
%14	%26	.....	%50	.....	%10	1
%14	%26	.....	%45	.....	%15	2
%14	%26	.....	%40	.....	%20	3
%14	%26	.....	%50	%10	.....	4
%14	%26	.....	%45	%15	.....	5
%14	%26	.....	%40	%20	.....	6
%14	%26	%45	.....	%15	.....	7
%14	%26	%28	%12	%20	.....	8

می‌یابد. نکته قابل توجه در فرمولاسیون سوخت میزان AP کمتر از 20% می‌باشد. زیرا در این مقادیر میزان دود ثانویه تولید شده در گازهای خروجی از نازل موتور کم و ناچیز می‌باشد. نمونه‌های تولید شده دارای دانسیته بین 1/65 تا 1/75 (سانتیمتر مکعب/ گرم) هستند و این افزایش دانسیته نسبت به سوخت‌های دویپایه یکی از مزیت‌های این نوع سوخت است.

### 3-2- بررسی تأثیر میزان AP بر سرعت سوزش

تأثیر میزان AP بر سرعت سوزش در شکل 2 نمایش داده شده است. سرعت سوزش سوخت‌های تولید شده در محدوده فشاری 6 تا 18 مگا پاسکال اندازه‌گیری شده است.



شکل 2- بررسی تأثیر میزان AP بر سرعت سوزش در فشارهای مختلف.

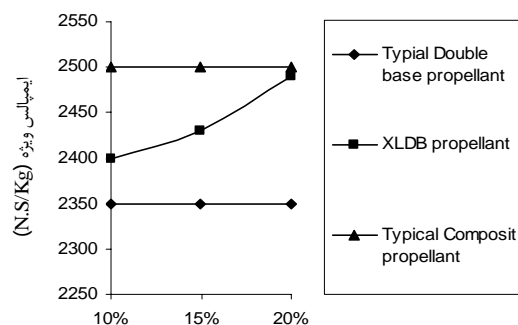
فرمولاسیون شماره (1) دارای سرعت سوزش 6/5 mm/s در فشار 60 (bar) می‌باشد، درحالی‌که در فرمولاسیون شماره (2) سرعت سوزش به 8/5 mm/s در فشار 60 (bar) می‌رسد. در نهایت استفاده از AP به میزان 20% در سوخت (فرمولاسیون 3) موجب رسیدن سرعت سوزش به مقدار 9/5 mm/s در فشار مذکور می‌گردد. مقایسه نتایج سرعت سوزش در فشار 16 (bar) بین

برای بررسی خواص مکانیکی سوخت، نمونه‌ها بصورت دمبلی شکل، طبق استاندارد ASTM D3039 تهیه شده و پارامترهای مربوط به خواص مکانیکی نمونه‌ها توسط دستگاه Shimadzu Autograph computer- controlled (AG-B series) اندازه‌گیری گردید.

### 3- نتایج و بحث

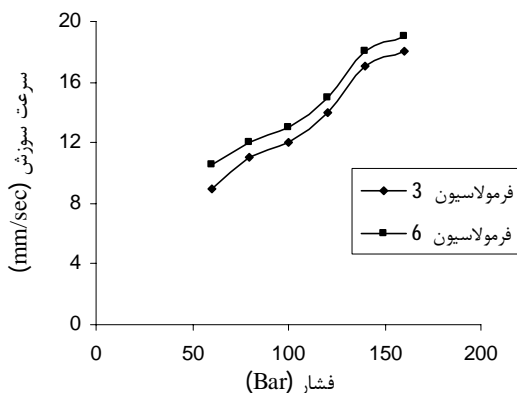
#### 3-1- ایمپالس ویژه

به دلیل محدودیت استفاده از AP در سوخت‌های XLDB و جایگزینی آن با نیترامین‌هایی نظیر RDX و HMX ایمپالس ویژه این نوع سوخت‌ها نسبت به سوخت‌های کامپوزیت کاهش می‌یابد. در شکل 1 ایمپالس ویژه محاسباتی سوخت XLDB تولید شده (بر اساس فرمولاسیون شماره 1) با سوخت‌های دویپایه و کامپوزیت مورد مقایسه قرار گرفته است و همچنین تأثیر میزان AP بر روی ایمپالس ویژه سوخت مورد نظر بررسی شده است.

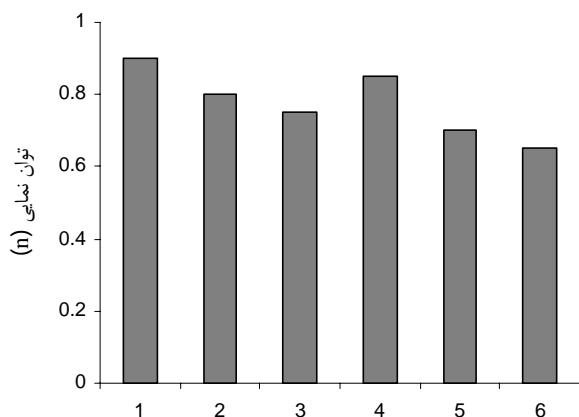


شکل 1- ایمپالس ویژه سوخت‌های XLDB (فرمولاسیون شماره 1) در مقایسه با انواع دیگر سوخت‌ها.

با افزایش میزان AP در سوخت، مقدار ایمپالس ویژه آن تقریباً 4% افزایش



شکل 5- مقایسه سرعت سوزش بین فرمولاسیون‌های 3 و 6 در فشارهای مختلف.



شکل 6- تأثیر اندازه ذرات AP بر توان نمایی سرعت سوزش بر اساس فرمولاسیون‌های 1 تا 6.

### 3-4- تأثیر اندازه ذرات RDX بر سرعت سوزش

در این مقاله تأثیر اندازه ذرات RDX بر روی سرعت سوزش سوخت و عدد n نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر این مطلب بوده است که فرمولاسیون‌های حاوی ذرات ریز RDX توان نمایی پایین‌تری نسبت به فرمولاسیون‌های حاوی ذرات درشت تر RDX داشته‌اند. تأثیر اندازه ذرات RDX بر سرعت سوزش در فشارهای مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از مقایسه فرمولاسیون‌های 5 و 7 بیانگر این مطلب است که اندازه ذرات ریز RDX تأثیری مضاعف در کاهش سرعت سوزش در فشارهای بالا ( $P > 120$  bar) دارد.

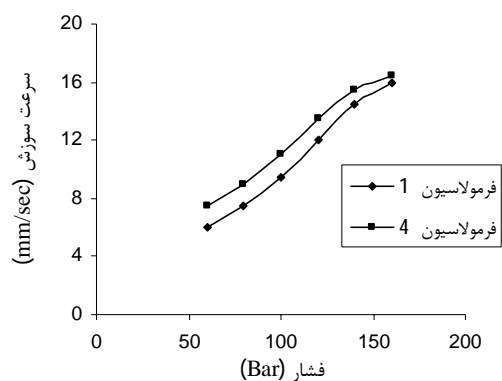
تأثیر اندازه ذرات RDX بر سرعت سوزش نمونه‌ها را می‌توان بر مبنای تغییر مکانیسم سینتیک لایه‌های مذاب RDX مخلوط شده با بایندر که در اثر تغییر در فلاکس حرارتی کریستال‌های RDX می‌باشد، توجیه کرد.

فرمولاسیون‌های 1 و 3، بیانگر افزایش 18 درصد مقدار سرعت سوزش در فرمولاسیون 3 نسبت به فرمولاسیون 1 بوده است.

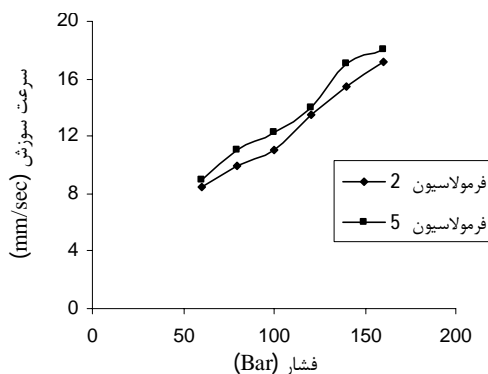
### 3-3- بررسی تأثیر اندازه ذرات AP بر سرعت سوزش

در شکل‌های 3، 4 و 5 تأثیر اندازه ذرات AP بر سرعت سوزش، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر تغییرات چشم‌گیر در افزایش سرعت سوزش (با ریز شدن ذرات AP) می‌باشد. مقایسه نتایج بدست آمده در این مقاله بیانگر این مطلب است که در مقادیر بالاتر AP، اختلاف سرعت سوزش در سوخت‌های حاوی AP ریز با AP درشت بیشتر شده است (هر دو عامل افزایش محتوی AP و ریز بودن ذرات AP تأثیر مضاعف بر سرعت سوزش دارد).

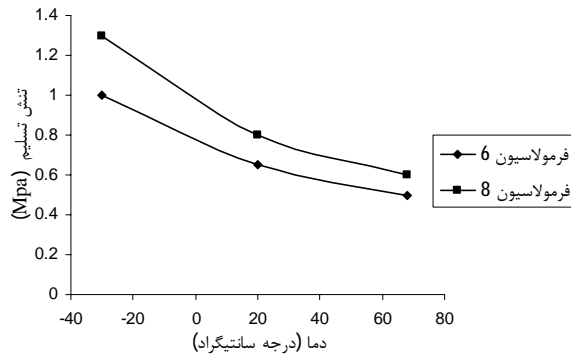
افزایش میزان AP نه تنها بر سرعت سوزش بلکه بر توان نمایی فشار (n) تأثیر گذار است، همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده، در فرمولاسیون‌های 1 تا 3، مقدار عددی توان نمایی (با افزایش AP) از 0/95 به 0/75 کاهش یافته است. در فرمولاسیون‌های 4 تا 6، با جایگزین کردن ذرات ریز AP به جای ذرات درشت، مقدار عددی توان نمایی از 0/85 به 0/65 کاهش یافته است.



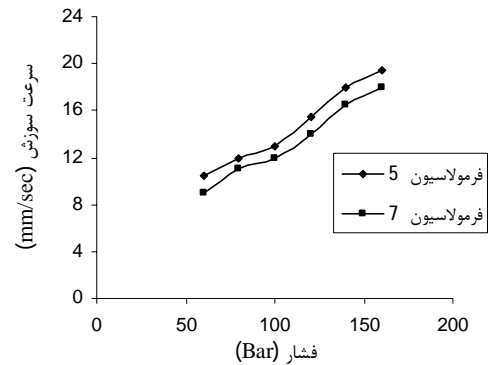
شکل 3- مقایسه سرعت سوزش بین فرمولاسیون‌های 1 و 4 در فشارهای مختلف.



شکل 4- مقایسه سرعت سوزش بین فرمولاسیون‌های 2 و 5 در فشارهای مختلف.



شکل 9- تاثیر اندازه ذرات RDX بر تنش تسلیم در سه دمای 20، 68 و 30- درجه سانتیگراد.



شکل 7- تاثیر اندازه ذرات RDX بر سرعت سوزش، در فشارهای مختلف.

### 3-5- بررسی خواص مکانیکی

سوخت‌های تولید شده از خواص ویسکوالاستیکی مناسبی برخوردار می‌باشند. میزان کرنش سوخت با فرمولاسیون‌های مشخص شده، در محدوده دمایی 30°C- تا 68 °C با سرعت 20 mm/s در جدول 2 نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این بخش بیانگر تأثیر زیاد اندازه ذرات RDX بر تنش برشی و مدول الاستیک (Modulus) این نوع سوخت‌ها می‌باشد. نمونه حاوی ذرات درشت و ریز RDX با نسبت (70/30) تنش تسلیم و مدول بالاتری نسبت به نمونه حاوی ذرات درشت RDX داشته‌است (شکل‌های 8 و 9).

### 4- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تأثیر تغییرات میزان AP بر سرعت سوزش نمونه‌های تولید شده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان AP در فرمولاسیون سوخت‌های XLDB، مقادیر سرعت سوزش در فشارهای مختلف زیاد می‌شود. همچنین با ریز شدن ذرات AP می‌توان به مقادیر بالاتری از سرعت سوزش در فشارهای مختلف دست یافت. دلیل این امر می‌تواند افزایش نفوذ شعله ناشی از حضور AP در ترکیب سوخت باشد، به طوری که با افزایش میزان AP و ریزتر شدن آن شدت نفوذ شعله در لایه‌های مذاب حاوی بایندر و مواد پرانرژی بیشتر می‌شود. براساس نتایج به دست آمده از انجام تست‌ها می‌توان گفت، فرمولاسیون شماره 8:

NC + RDX = 28% (10 Micron), RDX=12% (150 Micron), AP = 20%

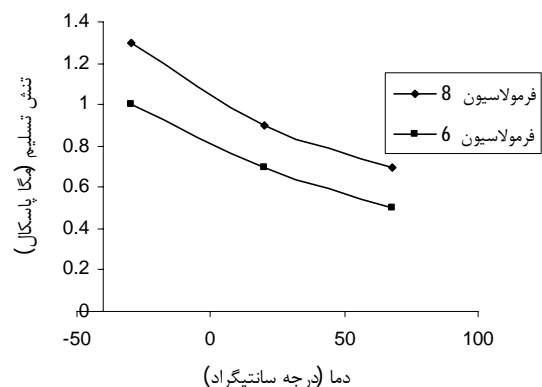
IPDI + PCP = 14% , NG = 26%

ترکیبی مناسب به لحاظ سرعت سوزش و خواص مکانیکی می‌باشد و نتایج حاصل از تست‌های عملکرد بالستیکی آن نیز رضایت بخش بوده است.

در فشارهای بالا به این دلیل که ذرات درشت RDX به صورت خیلی بارز ذوب نمی‌شوند (زیرا ضخامت لایه مذاب نازک تر شده و در این فشارها RDX براحتی دچار سوزش می‌شود)، بنابراین سرعت سوزش آن در حد RDX خالص می‌باشد، اما در فشارهای پایین‌تر چون بایندر ذوب شده به صورت یک لایه مذاب با ضخامت بالا، قابلیت اختلاط با کریستال‌های RDX مجاور را پیدا می‌کند، به عنوان یک مانع برای سوزش آن عمل می‌کند و محصولات احتراق نمی‌توانند بایندر مذاب را جاروب کرده بنابراین ذرات درشت RDX براحتی سوخته نمی‌شوند درحالی‌که ذرات ریز RDX توسط نفوذ شعله سوخته می‌شوند [10].

جدول 2- تاثیر اندازه ذرات RDX بر رفتار کرنشی سوخت در دماهای مختلف.

درصد افزایش طول (در نقطه شکست)	68 °C	20 °C	-30°C
فرمولاسیون 6	40%	52%	78%
فرمولاسیون 8	70%	110%	130%



شکل 8- تاثیر اندازه ذرات RDX بر مدول الاستیک در سه دمای 20، 68 و 30- درجه سانتیگراد.

- [6] Kohga, M.; Hagihara, Y. "Burning Rate of Composite Propellant Containing Fine Porous Ammonium Perchlorate."; Propell. Explos. Pyrot. 1998, 23, 182-188.
- [7] Osborn, J. R.; Panella, R. F. "Review of Solid Propellant Burning Rate", Review of Scientific Instruments 1966, 37, 86-92.
- [8] Chan, L.; Turner, D. "Minimum Signature Propellant."; US Patent 6,863,751, 2005.
- [9] "Double Base Propellants with AP&HMX Added (CMDB or/andXLDB)."; [Http://Ae-Www.Technion.Ac.II/Admin/Serve](http://Ae-Www.Technion.Ac.II/Admin/Serve), 2008.
- [10] Davenas, A. "Sold Rocket Propulsion Technology."; Pergamon press, 1994.
- [1] Lu Dian, L.; Xue-Zhong, F.; Yu-Kum, F. "Study on the Combustion Properties of XLDB Propellant."; Chinese J. of Explos. Propell. 2001, 4, 50-51.
- [2] Kubota, N. "Combustion Mechanism of Nitramine Composite Propellants."; Eighteen Symposium On Combustion, 1981, 187-189.
- [3] Menke, K.; Eisele, S. "Rocket Propellants with Reduced Smoke and High Burning Rates."; Propell. Explos. Pyrot. 1999, 22, 112-119.
- [4] Klohn, W.; Eisele, S. "Nitramine Solid Propellants with Reduced Signature."; Propell. Explos. Pyrot. 1987, 12, 71-77.
- [5] Zhulin, H.; Zeng-Guo, F.; Panming, W. E..H. "The Energy and Pressure Exponent of Composite Modified Double Base Propellant."; Propell. Explos. Pyrot. 1992, 1759-62.

Archive of SID