

## اثر افزایش ترکیبات نیتروآمینی روی پارامترهای انرژی و دود در سوخت جامد مرکب

فرهاد سیف<sup>۱\*</sup>، محمد علی قاسمی<sup>۲</sup>، محمد حسین کشاورز<sup>۳</sup>

اصفهان-شاهین شهر-دانشگاه صنعتی مالک اشتر-مجتمع علوم کاربردی ص.پ.۸۳۱۴۵/۱۱۵

(<sup>۱\*</sup>فرهاد سیف: [f.seif@mut-es.ac.ir](mailto:f.seif@mut-es.ac.ir))

### چکیده

سوخت‌های جامد مرکب اصلاح شده با ذرات نیتروآمینی از جمله سوخت‌هایی هستند که در سال‌های اخیر توجه زیادی به آنها در صنایع موشکی شده است. این سوخت‌ها بدلیل سرعت سوزش پایین، کالری احتراق بالا و همچنین کاهش دود و عدم خوردگی محصولات احتراق، شرایط بهینه‌ای را در موشک‌های تاکتیکی ایجاد می‌کنند. در این مقاله تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی و ترمودینامیکی ترکیبات پرانرژی نیتروآمینی جدید CL-20 با دو ماده منفجره متداول نیتروآمینی HMX و RDX مقایسه شده است. پارامترهای مختلفی از جمله: حساسیت انفجاری نسبت به جرقه الکتریکی، دانسیته، ضربه ویژه، ضربه ویژه حجمی، دمای محفظه احتراق و دود ناشی از محصولات احتراق در مورد این ترکیبات تجزیه و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: نیتروآمین- ضربه ویژه- ضربه ویژه حجمی- دانسیته- دمای محفظه احتراق

### ۱- مقدمه

سوخت جامد مرکب از سه جزء اصلی بایندر (HTPB)، اکسیدایزر (AP) و سوخت فلزی (Al) تشکیل شده است. بایندر یا بافت همبند قالب الاستومری است که علاوه بر دارا بودن منابع اصلی کربن و هیدروژن مورد نیاز جهت احتراق، ذرات مجزای سوخت فلزی و اکسیدایزر را بطور یکنواخت کنار یکدیگر نگهداشته و توده‌ای لاستیکی را تشکیل می‌دهد که توانایی مقاومت در مقابل تنش‌های مکانیکی و حرارتی را داشته باشد.

اکسیدایزر، اکسیژن مورد نیاز برای ادامه فرآیند احتراق در داخل موتور را فراهم می‌کند و معمولاً بیشترین جزء (در بعضی موارد تا ۸۰٪ وزنی) را به خود اختصاص می‌دهد.

سوخت فلزی نیز که معمولاً جزء پودرهای فلزی و یا هیدریدهای آنها هستند، جزء مواد انرژی‌زا محسوب می‌شوند و برای افزایش گرمای احتراق ( $\Delta H$ )، ضربه ویژه (Isp) و دانسیته (D) به فرمولاسیون سوخت اضافه می‌شوند.

در موشک‌های تاکتیکی بدلیل مسائل امنیتی، هدایت و کنترل از سوخت‌های جامد مرکب کم دود استفاده می‌شود. عامل اصلی تولید دود در سوخت جامد مرکب مربوط به اکسیدایزر-بدلیل تولید ترکیبات هالوژنه- و سوخت فلزی-بدلیل تولید اکسیدهای فلزی دود زا و خورنده- می‌باشد، به همین دلیل در این مورد خاص از سوخت فلزی اصلاً استفاده نمی‌شود و اکسیدایزر هم کمتر از حد معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مطالب گفته شده، سوخت از لحاظ انرژی افت پیدا می‌کند و بایستی به طریقی این مشکل را نیز حل نمود راهکار مناسب در این خصوص استفاده از ترکیبات پرانرژی نیتروآمینی در فرمولاسیون سوخت می‌باشد [۱ و ۲ و ۳].

از سال ۱۹۸۰ میلادی به بعد سوخت‌های جامد مرکب دارای ترکیبات نیتروآمینی اهمیت خاص پیدا کرده اند. استفاده از این ترکیبات -که معمولاً از C, H, N و O تشکیل شده اند- بدلیل تولید محصولات پایدار با جرم مولکولی پایین در مرحله احتراق، باعث افزایش انرژی در سوخت می‌شود [۴]. از جمله متداول‌ترین ترکیبات نیتروآمینی می‌توان به HMX و RDX اشاره

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی پیشران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی پیشران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۳</sup> - استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

نمود. ماده منفجره CL-20 نیز یک ماده منفجره نیتروآمینی جدید می باشد که حساسیت انفجاری محاسبه شده آن نسبت به جرقه الکتریکی J ۷/۱۵ بوده که در مقایسه با HMX و RDX به ترتیب با مقادیر J ۲/۸۹ و J ۲/۴۹ از حساسیت انفجاری کمتری برخوردار است [۵]. این مواد بخاطر تفاوت در دانسیته، بالانس اکسیژنی و گرمای تشکیل، اثرات متفاوتی را روی ضربه ویژه حجمی (D.Isp) - که بعنوان شاخص انرژی در سوخت‌های جامد مرکب مطرح است - دارند. در جدول ۱ مشخصات ترکیبات نیتروآمینی استفاده شده در این مقاله ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات تعدادی از نیتروآمین‌های متداول

نیتروآمین	فرمول شیمیایی	دانسیته (g/cc)	گرمای تشکیل (cal/mol)	بالانس اکسیژنی (%)
HMX	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>	۱/۸۷	۱۷۹۲۰	-۲۱/۶
RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	۱/۸۱۸	۱۴۶۹۰	-۲۱/۶
CL-20	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>12</sub> O <sub>12</sub>	۲/۰۴	۹۰۰۰۰	-۱۰/۹۵

درصد وزنی ترکیبات استفاده شده در این فرمولاسیون به شرح زیر می‌باشد:

جدول ۲- درصد وزنی ترکیبات استفاده شده در این فرمولاسیون

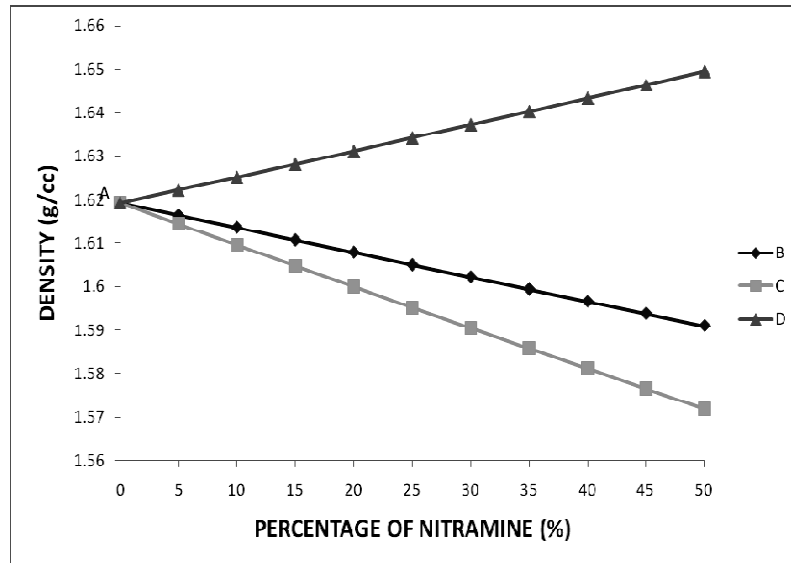
Component	A	B	C	D
HTPB	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
DOA	۷	۷	۷	۷
TDI	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹
MAPO	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
AP	۸۱	۳۱-۸۱	۳۱-۸۱	۳۱-۸۱
HMX	۰	۰-۵۰	۰	۰
RDX	۰	۰	۰-۵۰	۰
CL-20	۰	۰	۰	۰-۵۰

## ۲- نتایج و بررسی

محاسبات مربوط به خواص بالستیکی با استفاده از برنامه NASA-CEC-71 [۶] در فشار محفظه (فشار عملکرد موتور) ۷۵ bar و نسبت سطح مقطع واگرا به سطح مقطع گلوگاه (A<sub>۰</sub>/A<sub>۱</sub>) ۸ انجام شده است.

### ۲-۱- اثر افزایش نیتروآمین بر دانسیته (D)

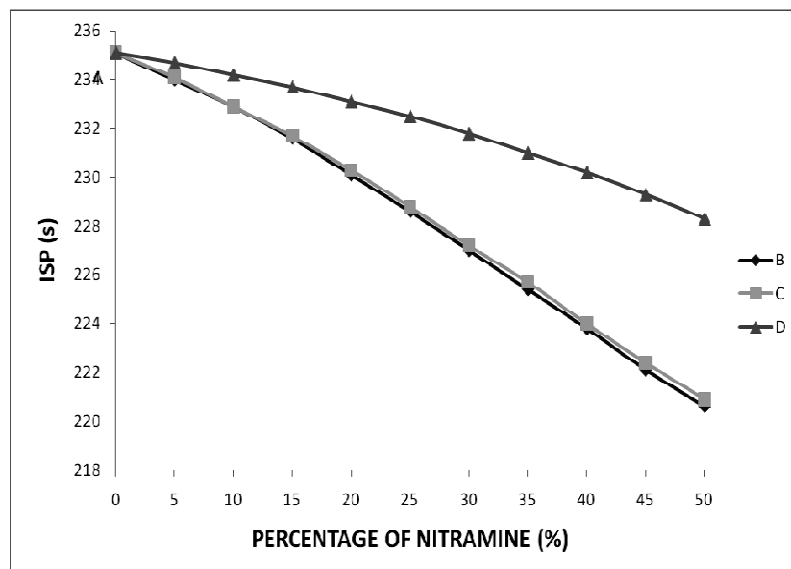
بطور معمول RDX معمولاً سوختی را ایجاد می‌کند که نسبت به سوخت حاصل از HMX دارای دانسیته پایین‌تری است ولی سرعت سوزش آن بیشتر می‌باشد. CL-20 باعث افزایش دانسیته سوخت می‌شود که این موضوع را می‌توان به بالاتر بودن دانسیته کریستالی آن نسبت به آمونیوم پراکلرات مرتبط دانست. این در حالیست که HMX و RDX دارای دانسیته‌هایی کمتر از AP می‌باشند. نتایج حاصل از این قسمت در نمودار ۱ آورده شده است.



نمودار ۱- اثر افزایش نیتروآمین بر دانسیته (D) سوخت

### ۲-۲- اثر افزایش نیتروآمین بر ضربه ویژه (Isp)

افزایش ترکیبات نیتروآمینی، همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده است کاهش ضربه ویژه را بدنبال دارد، ولی این کاهش برای CL-20 از سایر ترکیبات کمتر است که دلیل این امر اکسیژن بالانس منفی ترکیبات نیتروآمینی و در نتیجه کاهش راندمان احتراق می باشد. لازم بذکر است که مقدار عددی اکسیژن بالانس برای ترکیب CL-20 نسبت به دو ترکیب دیگر، مثبت تر است و لذا افت کمتری نشان می دهد.

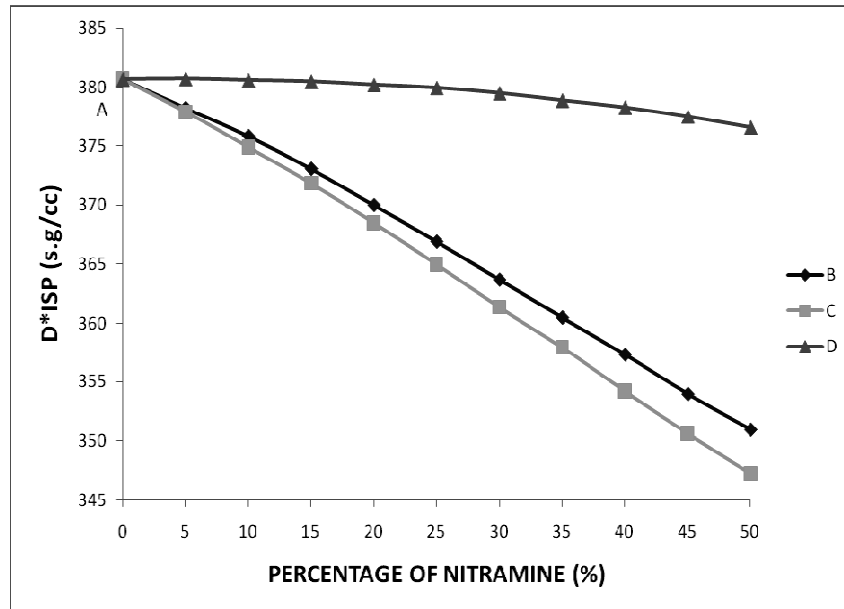


نمودار ۲- اثر افزایش نیتروآمین بر ضربه ویژه (Isp) سوخت

### ۲-۳- اثر افزایش نیتروآمین بر شاخص انرژی (D.Ip)

همانطور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، پارامتر انرژی در سوخت نیز با افزایش ذرات نیتروآمینی افت پیدا کرده است ولی برای نیتروآمین CL-20 این افت بسیار کمتر بوده است. همانطور که در دو قسمت قبل توضیح داده شده، ترکیب CL-20 دارای دانسیته کریستالی بالا و همچنین اکسیژن بالانس مثبت تر نسبت به دو ترکیب دیگر می باشد که همین امر، باعث افت

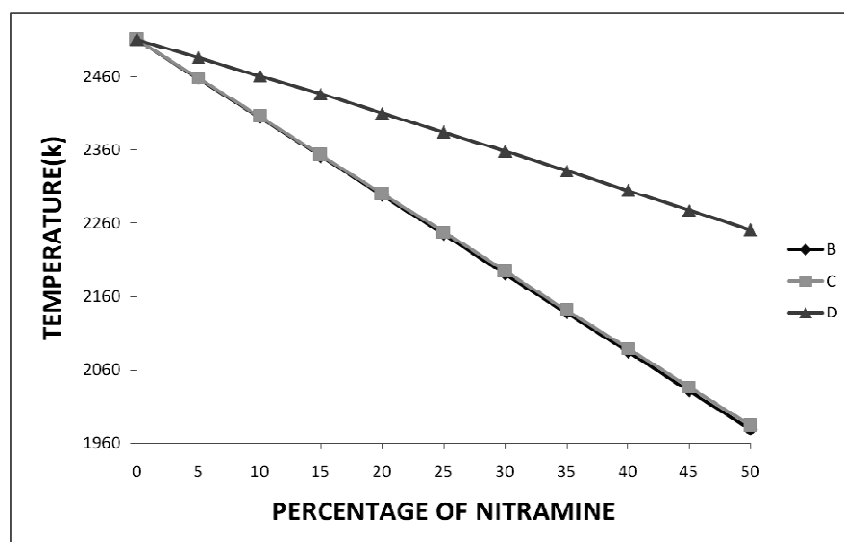
شاخص انرژی با شیب کمتر ضمن استفاده از این ترکیب می‌گردد. نکته قابل توجه، افزایش جزئی شاخص انرژی در فرمولاسیون حاوی ۵٪ CL-20 می‌باشد.



نمودار ۳- اثر افزایش نیتراآمین بر شاخص انرژی (D.Isp) سوخت

#### ۴-۲- اثر افزایش نیتراآمین بر دمای محفظه احتراق ( $T_c$ )

در نمودار ۴ اثرات افزایش ترکیبات نیتراآمینی روی دمای محفظه احتراق نشان داده شده است و همانطور که مشخص است افزایش ترکیبات نیتراآمینی باعث کاهش دمای محفظه احتراق می‌شود ولی RDX و HMX نسبت به CL-20 باعث افت بیشتری در دمای محفظه می‌شود. دلیل این امر را می‌توان در تولید محصولات گازی ناشی از احتراق ترکیبات نیتراآمینی دانست که معمولاً دارای جرم‌های مولکولی کم بوده و حاوی ترکیباتی چون  $N_2$  گازی می‌باشند. این ترکیبات بصورت گازهای بی اثر عمل کرده و منجر به رقیق شدن محصولات احتراق و کاهش دمای آن می‌شوند.



نمودار ۴- اثر افزایش نیتراآمین بر دمای محفظه احتراق ( $T_c$ )

### ۵-۲- اثر افزایش نیتروآمین بر دود محصولات خروجی

مواد جامد (S)، آب ( $H_2O$ ) و اسید کلریدریک (HCl) از جمله مواد دودزا در این فرمولاسیون می‌باشند که درصد هر کدام از این اجزاء به ترتیب در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بطور کلی افزایش نیتروآمین‌ها باعث تولید ذرات جامد می‌گردد که دلیل آن، اکسیژن بالانس منفی و در نتیجه احتراق ناقص سوخت می‌باشد. اما مهمترین مسئله کاهش چشمگیر گازهای HCl و  $H_2O$  می‌باشد که این ترکیبات منجر به تولید دود ثانویه می‌گردند و علاوه بر این مشکل، بحث خوردگی نازل نیز مطرح می‌شود.

جدول ۳- ترکیب درصد عوامل دودزا به ازای درصد نیتروآمین

Nitramine(%)	S (%)			$H_2O$ (%)			HCl(%)		
	HMX	RDX	CL-20	HMX	RDX	CL-20	HMX	RDX	CL-20
۰	۰	۰	۰	۲۲/۴۲	۲۲/۴۲	۲۲/۴۲	۱۵/۸۰۴	۱۵/۸۰۴	۱۵/۸۰۴
۵	۰	۰	۰	۱۹/۶۴۳	۱۹/۶۴۷	۱۹/۸۹۴	۱۴/۵۸۱	۱۴/۵۸۱	۱۴/۶۸۴
۱۰	۰	۰	۰	۱۷/۰۴۵	۱۷/۰۵۳	۱۷/۴۹۸	۱۳/۴۰۷	۱۳/۴۰۶	۱۳/۵۸۸
۱۵	۰	۰	۰	۱۴/۷۳۴	۱۴/۷۳۳	۱۵/۳۵۳	۱۲/۲۸۶	۱۲/۲۸۵	۱۲/۵۱۶
۲۰	۰	۰	۰	۱۲/۷۷	۱۲/۷۷۶	۱۳/۱۹۵	۱۱/۲۲۴	۱۱/۲۲۲	۱۱/۴۷۳
۲۵	۰	۰	۰	۱۱/۱۵۳	۱۱/۱۵۶	۱۱/۳۵۷	۱۰/۲۱	۱۰/۲۰۸	۱۰/۴۵۷
۳۰	۰	۰	۰	۹/۷۸۵	۹/۷۸۴	۹/۷۴۷	۹/۲۳۱	۹/۲۲۸	۹/۴۶۹
۳۵	۰	۰	۰	۸/۵۹۲	۸/۵۸۹	۸/۳۴۲	۸/۲۷۶	۸/۲۷۲	۸/۵۰۱
۴۰	۰/۵۷۳	۰/۵۳۷	۰	۷/۷۸۵	۷/۷۶۴	۷/۱۰۶	۷/۲۹۶	۷/۲۹۵	۷/۵۵۱
۴۵	۱/۷۳	۰/۶۸۸	۰/۰۶۴	۷/۲۹۲	۷/۲۶۸	۶/۰۳۸	۶/۳۰۱	۶/۳	۶/۶۰۸
۵۰	۲/۸۸۲	۰/۸۳۴	۱/۰۱۸	۶/۸۲۹	۶/۸۰۳	۵/۴۵۶	۵/۳۳۹	۵/۳۳۸	۵/۶۲۶

### ۳- نتیجه گیری کلی

با توجه به نمودارها و توضیحات ارائه شده می‌توان دریافت که استفاده از ترکیبات نیتروآمینی (HMX, RDX, CL-20) بطور کلی باعث افت شاخص انرژی در سوخت می‌شوند که این موضوع برای ترکیب CL-20 بسیار کمتر می‌باشد. از لحاظ دمایی محفظه، بیشترین دما مربوط به CL-20 می‌باشد؛ پس، لازم است تا جنس فلزات استفاده شده در محفظه را متناسب با این دما انتخاب نمود. محدوده دمایی HMX و RDX تقریباً یکسان و پایین‌تر از CL-20 می‌باشد که بسیار مطلوب است. CL-20 نسبت به دو ترکیب دیگر دود کمتری را ضمن فرآیند احتراق تولید می‌کند و حساسیت آن نیز نسبت به جرقه الکتریکی پایین‌تر است. در خاتمه با توجه به مزایای برشمرده شده برای ترکیب CL-20، استفاده از این ترکیب در سوخت‌های جامد امروزی پیشنهاد می‌شود.

### مراجع

1. Kubota, N, Propellants and Explosives Thermochemical Aspects of Combustion, Second Edition, WILEY-VCH (2008).
2. Davenas, A, Solid Rocket Propulsion Technology, Pergamon Press (1993)
3. Sutton G. P. & Biblarz, O, Rocket Propulsion Elements, 7 Edition, (2001)
4. Yount, R. A., " Impulse Efficiency for Minimum Smoke Propellant Motors", Technical Group Supervisor, Propellant Development, Member AIAA, (1981).
5. M. H. Keshavarz, H. R. Pouretdal and A. Semnani, "Reliable prediction of electric spark sensitivity of nitramines: A general correlation with detonation pressure", J. Hazard. Mater., 167, 461-466 (2009).
6. G. Sanford, B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. I. Analysis, vol. 1331, NASA Reference Publication, 1994.
- 7.