

بهینه سازی روش تولید ترکیبات انفجاری قابل ریخته گری حاوی آلومینیوم بر پایه TNT و RDX

رضا کریمیان^{۱*}، سجاد دمیری^۲، حمیدرضا شاملویی^۳، علیرضا قربانی^۴

اصفهان - زرین شهر - مجتمع صنایع دفاع - صندوق پستی ۱۵۹

*E-mail: R.Karimian@gmail.com

(تاریخ وصول: ۸۸/۲/۳۰، تاریخ پذیرش: ۸۸/۴/۲)

چکیده

ترکیبات انفجاری حاوی آلومینیوم از اوایل قرن بیستم به واسطه انرژی انفجار زیاد، سرعت و ضربه‌های انفجار بالا و همچنین طولانی بودن فشار ناشی از حضور آلومینیوم، مورد توجه قرار گرفته اند. از مهمترین این ترکیبات می‌توان به توریکس، DBX، تریتنال، HTA-3، H-6 و HBX ها اشاره کرد. ترکیبات HBX، ترکیبات انفجاری قابل ریخته‌گری حاوی آلومینیوم هستند که به صورت سه ترکیب HBX-1، HBX-3 و H-6 تولید می‌شوند. در این تحقیق، تولید این ترکیبات به صورت گرانول مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مؤثر بر کیفیت محصول، از قبیل نسبت مواد جامد و آب، دور همزن، دمای افزایش TNT و مقدار آن جهت ایجاد پوشش اولیه، دمای مخلوط در هنگام افزایش سوسپانسیون TNT/Al و دمای افزایش سوسپانسیون TNT/Al مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفتند.

واژه های کلیدی: مواد منفجره، HBX، TNT، RDX، پودر آلومینیوم.

۱- مقدمه

ترکیبات ریخته‌گری پایه TNT، به بهبود سرعت انفجار ترکیبات انفجاری از طریق افزایش گرمای تشکیل، موازنه اکسیژن و دانسیته، کمک نموده است. این امر به بهبود سرعت ترکش و انرژی جت

ظهور RDX و HMX باعث ایجاد گام های بلندی در زمینه مواد منفجره شدیدالانفجار^۵ شده است. RDX و HMX مصرف شده در

۵- High explosive

۱- کارشناس ارشد شیمی تجزیه
۲- کارشناس ارشد شیمی تجزیه
۳- کارشناس ارشد شیمی فیزیک
۴- کارشناس ارشد شیمی تجزیه

سرچنگی‌ها منجر شده است؛ ولی لازمه بهبود در تکانه به منظور ایجاد حفره و اثرات ترکش بزرگتر، افزایش پودر فلزی که عموماً آلومینیوم است، می‌باشد [۱]. یکی از مهمترین ترکیبات انفجاری حاوی آلومینیوم تورپکس^۱ می‌باشد که تقریباً حاوی ۴۲٪ RDX، ۴۰٪ TNT و ۱۸٪ پودر آلومینیوم است. این ترکیب انفجاری، نسبت به TNT، انفجار قوی تری ایجاد کرده اما از آن حساس تر است. تورپکس، به واسطه انرژی انفجار زیاد و سرعت انفجار بالاتر از RDX و طولانی‌تر بودن فشار انفجار ناشی از آلومینیوم، مورد توجه بوده است. تورپکس به عنوان ترکیب انفجاری زیر آبی ضد کشتی، بر مبنای وزن ماده منفجره نسبت به TNT، به طور تقریبی حدود ۵۰٪ مؤثرتر واقع می‌شود [۱]. این ترکیب را می‌توان از طریق افزودن مقدار معینی TNT به ترکیب B، تا رسیدن به نسبت RDX به TNT مورد نظر، و سپس همزدن، حرارت دادن و افزودن ۱۸٪ AI تا تکمیل شدن مخلوط تهیه نمود [۳ و ۲].

به دلیل بالا بودن حساسیت تورپکس نسبت به اصطکاک و ضربه، نوعی ترکیب انفجاری تحت عنوان DBX^۲، در آمریکا و انگلستان توسعه یافت که با جایگزینی نیمی از RDX تورپکس با آمونیوم نیترات به دست می‌آید. این ترکیب نسبت به تورپکس حساسیت کمتری دارد، اما سرعت انفجار آن ۶۸۰۰ m/sec است که در مقایسه با تورپکس (۷۶۰۰ m/sec) کمتر می‌باشد و قدرت تخریب کمتری دارد. DBX به دلیل موازنه اکسیژن بهتر، موج شوک بهتری نسبت به تورپکس، در زیر آب ایجاد می‌نماید و به این دلیل از آن در بمب های زیرآبی^۳ استفاده می‌شود، اما مقدار انفجار آن در هوا نسبت به تورپکس قدری کمتر است. به دلیل حضور آمونیوم نیترات، DBX جاذب رطوبت می‌باشد و با فلزات، واکنش می‌دهد [۲]. DBX را می‌توان با افزودن ۲۱٪ آمونیوم نیترات و ۱۸٪ آلومینیوم به ۴۲٪ سیکلوتول یا ترکیب B ۵۰:۵۰:۱۹ حاوی TNT که قبلاً در حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد ذوب شده، تولید کرد [۴].

از دیگر ترکیبات مشابه این گروه می‌توان به ترکیبات Alex-20 و Alex-32 اشاره نمود که مخلوطی از مواد منفجره پر انرژی TNT، RDX و آلومینیوم می‌باشند. این ترکیبات به ترتیب دارای سرعت انفجار ۷۵۳۰ m/sec و ۷۳۰۰ m/sec هستند [۵] و روش تولید آن‌ها

مشابه تورپکس می‌باشد [۶]. HTA-3 نیز یک ترکیب انفجاری مشابه می‌باشد که در آن به جای RDX از HMX استفاده شده است. این ترکیب که به عنوان پر کننده، در بمب‌ها، سرچنگی‌ها و بعضی از موشک‌های هوا به هوا استفاده می‌گردد، برای برش دادن فلزات نیز به کار می‌رود [۷ و ۸]. روش تولید HTA-3 مشابه تورپکس می‌باشد [۷] و می‌توان آن را از طریق افزودن TNT، AI و سیلیکات کلسیم به اکتول تا رسیدن به درصد مورد نظر نیز تهیه نمود [۶].

تورپکس در اواخر سال ۱۹۴۰ با HBX^۴، سپس در دهه ۱۹۶۰ با H-6 جایگزین شد. چون این ترکیبات دارای آمونیوم نیترات نمی‌باشند لذا همچون DBX جاذب رطوبت نیستند [۱]. ترکیبات HBX ترکیبات انفجاری قابل ریخته‌گری حاوی آلومینیوم هستند و به دو نوع HBX-1 و HBX-3 تقسیم بندی می‌شوند. HBX-1 در طی جنگ جهانی دوم و با اصلاح تورپکس و غیر حساس کردن آن تولید شد و با اعمال تغییرات و اصلاحات بعدی، ترکیب HBX-3 تهیه گردید. در این ترکیبات، از اکس D-2 به عنوان غیر حساس کننده استفاده می‌شود. HBX-3 با نام تورپکس نیز شناخته می‌شود، هرچند که در فرمولاسیون اندکی متفاوت می‌باشند [۹].

معرفی ترکیبات HBX

ترکیبات HBX در دو نوع A و B تولید می‌شوند که نوع B، از مواد منفجره بازبایی شده (یا ترکیب B) تولید می‌گردد ولی نوع A، از مواد منفجره تازه تولید شده، ساخته می‌شود. در جدول (۱)، ترکیب درصد ترکیبات آلومینیوم دار مذکور، که در کشورهای مختلف تولید و مصرف می‌شوند ارائه شده است [۱۲-۱۰].

از ترکیبات HBX-1 و HBX-3 به عنوان خرج اصلی در مهمات زیر آبی و اژدرها، کلاهک موشک و همچنین به عنوان خرج تخریبی در مین‌ها، بمب‌ها و خرج‌های گود استفاده می‌شود. ترکیبات مذکور به صورت قالبی در برش‌دادن فولاد نیز به کار می‌روند. در جدول (۲)، مشخصات فیزیکی، شیمیایی و انفجاری ترکیبات HBX ارائه شده است [۱۲-۱۰]. H-6 یکی از ترکیبات HBX می‌باشد و از استاندارد ارائه شده برای HBX پیروی می‌کند [۱۳].

۴- High Blast Explosive

۱- Torpex

۲- Depth Bomb Explosive

۳- Depth bombs

جدول ۱- ترکیب درصد فرمولاسیون های حاوی آلومینیوم (۱۰-۱۲).

اجزا (درصد وزنی)	HBX-1	HBX-3	H-6	Torpex	Hexonal	HTA-3
HMX یا RDX	۴۰	۳۱	۴۵	۴۲	۴۰	۴۹*
TNT	۳۸	۲۹	۳۵	۴۰	۴۲	۲۹
آلومینیوم	۱۷	۳۵	۲۰	۱۸	۱۵	۲۲
واکس	۵	۵	۵	-	۳	-
کلرید کلسیم	+	+	+	-	-	-

* این ترکیب به جای RDX حاوی HMX می باشد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی، شیمیایی و انفجاری ترکیبات HBX [۱۴].

مشخصات	مقادیر	مشخصات	مقادیر
حساسیت به ضربه، وزنه ۲ کیلوگرم روش B. M (cm)	۴۲	قدرت انفجار (نسبت به TNT) در هوا:	
دانسیته ریخته گری (g/cm ³)	۱/۷۶-۱/۸۱	پیک فشار	۱۲۲
پاندول بالستیک ^۱ (%TNT)	۱۳۸	ضریان	۱۲۵
آزمون Trauzl (%TNT) (بلوک سربی)	۱۴۶	انرژی	۱۴۶
سرعت انفجار (m/s)	۷۴۹۵	در زیرآب:	
حساسیت به بوستر (گرم تریل)	۱۰ (پرس شده)	پیک فشار	۱۱۶
در ۸۳ درجه سانتیگراد	۴/۵	ضریان	۱۲۷
در ۹۵ درجه سانتیگراد	۲/۳	انرژی	۱۵۳

۲- تئوری و مبانی علمی

افزایش آلومینیوم به مواد منفجره، اولین بار در سال ۱۸۹۹ توسط اسکیلز^۲ از آلمان، جهت افزایش کارایی ترکیبات انفجاری پیشنهاد شد و در سال ۱۹۰۰ توسط روث^۳ ثبت اختراع گردید. در سال ۱۹۰۲ گروه CSE^۴ نتایج نسبتاً مطلوبی از مخلوط AN^۵ ۸۳٪، پودر ذغال نارگیل ۳٪، AI ۲۴٪ و AN^۶ ۷۰٪، پودر ذغال نارگیل ۵٪، AI ۲۵٪ بدست آوردند. نتایج بهتری با جایگزین کردن قسمتی از AN توسط مواد منفجره قوی مانند TNT و NG به دست آمد. همچنین تحقیقات صورت گرفته در قبل و هنگام جنگ جهانی اول در اتریش و آلمان، نتایج مطلوبی با مواد منفجره حاوی آلومینیوم نشان داد. مدتی بعد از

جنگ جهانی اول که محدودیت‌های ناشی از هزینه و تولید آلومینیوم برطرف شد، استفاده از آلومینیوم در مواد منفجره صنعتی و نظامی شروع گردید. ترکیبات انفجاری آلومینیوم دار تا حد گسترده تری در طی جنگ جهانی دوم توسط کشورهای درگیر، مخصوصاً در مهمات‌های زیرآبی (مانند مین‌های دریایی و اژدها) استفاده شد. همچنین مشخص شد که ترکیبات مذکور در بمب های هوایی^۶ تأثیرگذارترند [۱۵]. از آن زمان تا کنون، مکانیزم عملکرد آلومینیوم توسط تعداد زیادی از محققین بررسی شده است. عده‌ای ادعا کرده اند که آلومینیوم در انفجار واقعی دخالت ندارد اما بلافاصله بعد از آن با محصولات ناشی از انفجار مانند دی‌اکسید کربن و آب واکنش می‌دهد.

۶- Aerial bombs

۱- Bureau of mines

۲- Ballistic Mortar

۳- Escapes

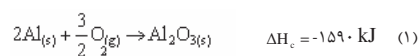
۴- Roth

۵- Commission des substances explosives

انفجار^۴ (Q) شناخته شده است. اگر این محصولات بعداً جدا شوند و اجازه پیدا کنند که در حضور اکسیژن کافی برای تشکیل موادی مانند کربن دی اکسید، آب و غیره بسوزند، حرارت خارج شده به حرارت انفجار اضافه می‌شود و برابر حرارت احتراق^۵ خواهد بود. در نتیجه مقدار حرارت احتراق برای ترکیباتی که اکسیژن کافی برای اکسایش کامل ندارند، بیشتر از حرارت انفجار است.

حرارت انفجار Q را می‌توان با افزودن یک سوخت دیگر به اجزای ماده منفجره کاهش داد. ماده افزودنی باید حرارت احتراق بالایی داشته باشد. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است این قبیل سوخت‌ها در عناصر سبک جدول یافت می‌شوند. در میان عناصر جامد، بریلیم بیشترین حرارت احتراق را دارد و به دنبال آن بور و آلومینیوم است. آلومینیوم، عنصر نسبتاً مفید و ارزان است و از آن می‌توان برای افزایش عملکرد اجزای ماده منفجره استفاده کرد.

اکسایش آلومینیوم، فوق العاده گرم‌زا است و همان طور که در واکنش زیر نشان داده شده است، ۱۵۹۰ kJ - حرارت تولید می‌کند:



جدول ۳- حرارت احتراق برخی از عناصر سبک [۱۹]

عنصر	جرم اتمی (g/mol)	آنتالپی احتراق (kJ/mol)	آنتالپی احتراق (kJ/g)
بریلیم	۹/۰	-۶۰۲/۱	-۶۶/۹
بور	۱۰/۸	-۶۳۵	-۵۸/۸
لیتیم	۶/۹	-۲۹۳/۹	-۴۲/۶
آلومینیوم	۲۷/۰	-۸۳۴/۳	-۳۰/۹
منیزیم	۲۴/۳	-۶۰۲/۶	-۲۴/۸
روی	۶۵/۴	-۲۵۳/۲	-۵/۴

۴- Heat of Explosion
۵- Heat of Combustion

هاید^۱ و اشمیت^۲ نشان دادند که آلومینیوم نه تنها با اکسیژن بلکه با نیتروژن نیز واکنش داده و تولید نیتریسد می‌کند (Al + N = AlN + 80 kcal). این به معنی آن است که بر خلاف کاری که قبلاً در طی جنگ جهانی اول صورت می‌گرفت، لازم نیست مواد منفجره حاوی آلومینیوم با موازنه اکسیژن مثبت ساخته شود و حتی بهتر است این موازنه مقداری منفی گردد. مزیت اضافی افزودن آلومینیوم آن است که Al_2O_3 تشکیل شده در حین واکنش به صورت جامد باقی نمی‌ماند و تبخیر می‌شود، لذا حجم کلی و فشار گازها بیشتر است. این امر، ناشی از این حقیقت است که نقطه جوش Al_2O_3 برابر $2980^\circ C$ است، در حالی که دمای ناشی از انفجار معمولاً بالای $4500^\circ C$ می‌باشد. تنها ترکیبات آلومینیومی که ممکن است در انفجار به همراه گونه‌های اکسیدی تشکیل شود AlN و AlH_3 می‌باشند. Al_4C_3 فقط در حالت جامد وجود دارد و با تبخیر تفکیک می‌گردد.

سارتریوس^۳ در سال ۱۹۵۲ اثر تعدادی از فلزات و شبه فلزات را به عنوان امکان جایگزین شدن آنها با آلومینیوم در ترکیبات انفجاری بررسی کرد و متوجه شد که هیچ کدام از آن‌ها حتی منیزیم به خوبی آلومینیوم عمل نمی‌کند. او معتقد بود که آلیاژهای بریلیم در این زمینه امید بخش بوده و نیاز به بررسی بیشتر دارد. سیلیکون از نقطه نظر قدرت و سرعت انفجار نسبت به آلومینیوم کمی مطلوب تر بود و اگر قیمت آن کمتر از آلومینیوم بود، می‌توانست در این زمینه کاربرد داشته باشد [۱۵].

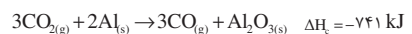
۲-۱- ترموشیمی مواد منفجره حاوی آلومینیوم

ماهیت محصولات انفجار به مقدار اکسیژن قابل دسترس در حین واکنش بستگی دارد. در مورد مواد منفجره ای مانند TNT که اکسیژن کافی در مولکول خود ندارند محصولاتی مانند کربن، مونوکسید کربن و گاز هیدروژن که به‌طور کامل اکسید نشده‌اند تشکیل می‌شوند. انرژی آزاد شده در حین تشکیل این محصولات به عنوان حرارت

۱- Haid
۲- Schmidt
۳- Sartorius

در یک ترکیب انفجاری، آلومینیوم با محصولات گازی، ویژه ترکیباتی که کمبود اکسیژن دارند ترکیب می شود:

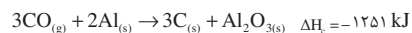
(۲)



(۳)



(۴)



در دو واکنش اول، حجم گاز تغییر نمی کند، یعنی سه مول به سه مول تبدیل می شود. در نتیجه افزایش حرارت خروجی از اکسایش آلومینیوم حضور فشارهای بالا را طولانی می کند. از این اثر در ترکیبات انفجاری برای انفجار هوایی، بالا بردن و پرت کردن ۲ و ایجاد حباب های بزرگ در زیر آب استفاده می شود. هرچند که، برای افزایش مقدار آلومینیوم به ترکیب انفجاری محدودیت وجود دارد. به طور کلی با افزایش مقدار آلومینیوم، حرارت (Q) افزایش یافته ولی حجم گاز (V) کاهش می یابد و در مقدار آلومینیوم ۱۸٪ مقدار قدرت انفجار (QxV) ماکزیمم می شود. در مورد سایر اجزای ماده منفجره حاوی آلومینیوم اثر مشابهی مشاهده می شود که در آن ها نیز قدرت انفجار در فرمولاسیون های حاوی ۱۸-۲۵٪ آلومینیوم به ماکزیمم مقدار خود می رسد [۱۶].

۲-۲- بررسی روش های مختلف تولید ترکیبات HBX

کامپوزیت های منفجره پر انرژی که به روش ریخته گری تهیه می شود، حداقل شامل یک جزء منفجره هستند که نقطه ذوب مناسب داشته و به عنوان نوعی ماده ی زمینه برای نگهداری پودر یا کریستال های جامد منفجره ی دیگر عمل می کند. این نکته مهم است که ذوب و ریخته گری ذرات فوق، منجر به هسته زایی بیشتر نشود. بنابراین معمول است که از مواد ویژه ای که با این تمایل مقابله کند، استفاده

شود. یک فرآورده ی ویژه در این مورد ترکیب D-2 می باشد [۱۷] و [۱۸]. از پلیمرهای مختلف به ویژه پلی اورتان ها می توان به این منظور استفاده نمود. این پلیمرها باعث کاهش حساسیت و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت نیز می گردند [۱۹]. یکی از معایبی که در این قبیل فرمولاسیون ها مشاهده می شود، تمایل تننشینی پودر آلومینیوم موجود در فرمولاسیون است. برای مقابله با این تمایل می توان از مواد سوسپانسیون کننده مانند صمغ عربی یا آرابینوگالاکتان^۳ استفاده نمود [۲۰]. اکثر فرمولاسیون های حاوی آلومینیوم، تمایل به جذب آب دارند. بنابراین افزایش نوعی عامل جاذب رطوبت در کنار پودر آلومینیوم، تاثیر بسزایی در کاهش واکنش آب با پودر آلومینیوم دارد. از جمله ای این مواد که در این گونه فرمولاسیون ها و حتی در ترکیبات گروه B مورد استفاده قرار می گیرند، می توان به منیزیم سولفات، کلسیم کلرید یا منیزیم پرکلرات اشاره نمود [۲۰].

روش های تولید فرمولاسیون های بر پایه TNT و به کارگیری آن (شارژ مهمات با استفاده از فرمولاسیون های انفجاری) به دو دسته کلی تقسیم می گردند:

- ۱- روش هایی که فرمولاسیون انفجاری حاصل بلافاصله بعد از تولید در سرجنگی یا مهمات مورد نظر شارژ می گردد؛
- ۲- روش هایی که فرمولاسیون حاصل پس از تولید، نگهداری و حمل و نقل می گردد و در زمان و مکان مناسب با روش ریخته گری در سرجنگی یا مهمات مورد نظر شارژ می گردد. در ادامه به بررسی اجمالی هر یک از این روش ها خواهیم پرداخت.

۲-۲-۱- روش شارژ مستقیم

در این روش، به یک ذوب کننده مجهز به همزن، RDX و TNT (به شکل ترکیب B) افزوده می گردد. همچنین مقدار اضافی TNT جهت تصحیح مقدار TNT در فرمولاسیون بکار می رود. پر کردن مواد به روش فوق به این علت انجام می شود که مواد منفجره ی پراثری حساس مانند RDX یا HMX را نمی توان در حالت خشک بدون غیرحساس سازی منتقل نمود [۲۲]. در پایان، پودر آلومینیوم به ماده

۳- Arabinogalactan(AG)

۱- Air Blast

۲- Lifting and Heaving

مذاب افزوده شده و دما را ثابت نگه داشته و همزدن مخلوط ادامه می‌یابد تا فرایند ریخته گری انجام گردد. در این روش، پودر آلومینیوم در حالت خشک به ذوب کننده اضافه می‌شود. غبار آلومینیوم در هوا، طی فرایند تولید ممکن است بر روی سطوح افقی نشسته و در صورتی که سریعاً زدوده نشود، ممکن است در نتیجه‌ی اغتشاشات و رطوبت موجود در محیط، ایجاد انفجار کند.

۲-۲-۲- روش های شارژ غیر مستقیم

در روش‌های شارژ غیر مستقیم نمونه تولیدی به صورت گرانول تهیه، و در زمان و مکان مناسب در مهمات مورد نظر شارژ می‌گردد. در زیر، انواع روش‌های شارژ غیر مستقیم از منابع مختلف، ارائه شده است.

۲-۲-۱- تولید با استفاده از محیط دوغابی

هدف این روش ایجاد فرایندی است که در آن کامپوزیت‌های منفجره آلومینیوم دار تولید شود و معایبی را که مصرف کننده‌ها با آن روبرو می‌شوند، حذف کرده یا به حداقل برساند. مزیت‌های این روش عبارتند از:

- ۱- عدم نیاز به انتقال پودر آلومینیوم از منطقه عملیاتی به دست مصرف کننده؛
- ۲- کاهش تعداد اجزاء به یک یا دو جزء، تا امکان کنترل تحلیلی قبل از عملیات ذوب کردن به وجود آید؛
- ۳- تولید فراورده‌هایی به شکل گرانول‌هایی که غبار ایجاد نکرده و ترجیحاً کروی بوده و دارای خصوصیت سیالی باشند [۲۳].

الف- محصول دوجزیبی

فرایند حاضر در اصل بر اساس این واقعیت است که پودر آلومینیوم که ایجاد غبار می‌کند، توسط یک واکنش به عنوان بایندر با RDX پیوند داده و به شکل گرانول‌های بدون غبار در می‌آید. اینچنین فرایند گرانول سازی در زیر آب انجام شده و لازم است که پودر آلومینیوم نیز برای مقاومت در مقابل آب تحت عملیات قرار گیرد. به روش مشابه گرانول‌های TNT تهیه می‌شوند که به آن بر اساس نیاز NC مرطوب و لیستین افزوده می‌شوند. هر دو نوع گرانول را می‌توان به صورت

جداگانه در خرج انفجاری مورد استفاده قرار داد و یا هر دو جزء را برای تهیه HBX ها مورد استفاده قرار داد [۲۳].

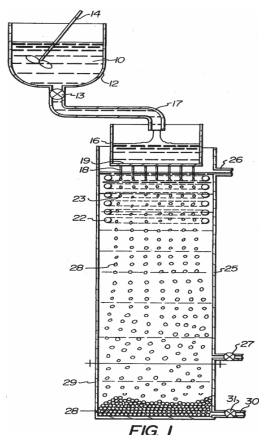
ب- تولید یک مرحله ای به صورت دوغاب و تزریق مذاب TNT / آلومینیوم

این روش، مدت زمان زیادی است که برای گرانوله کردن کامپوزیت‌های پایه TNT شناخته شده است که حاوی مواد منفجره بلوری نیز هستند [۲۳]. سطح آلومینیوم در حالت خالص با لایه نازکی از اکسید آلومینیوم پوشیده شده است و می‌تواند از آلومینیوم در مقابل آب و اکسیژن محافظت کند ولی این لایه به آسانی در محلول‌هایی که خاصیت اسیدی یا بازی ضعیف دارند، حل می‌شود. علاوه بر خطر تولید گاز هیدروژن در حین عملیات مرطوب، احتمال آزاد شدن گاز هیدروژن در اثر مجاورت گرانول‌های فوق با محیط مرطوب نیز وجود دارد. برای مرتفع نمودن این مشکل سعی شده که پودر آلومینیوم به وسیله اسید ایزواستتاریک یا اسید استتاریک، پوشیده شده و غیر حساس شود. لازم به ذکر است که پودر آلومینیوم غیر حساس شده به وسیله واکس، تمایل شدیدی به کلوخه‌ای شدن دارد و منجر به تولید محصول غیرهمگن می‌گردد [۲۴].

طبق فرایند حاضر، گرانول‌های ابتدایی در مرحله اول به روش معمولی گرانولاسیون مرطوب در آب به دست می‌آیند که در این مرحله مقدار تجربی از TNT به همراه تمامی اجزاء بجز پودر آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفته‌است. در مرحله دوم گرانول‌های اولیه به دست آمده در آب به صورت سوسپانسیون درآمده و پودر آلومینیوم با مقدار باقی‌مانده TNT مخلوط شده و به سوسپانسیون فوق افزوده می‌شود. سپس مخلوط سرد شده و پودر آلومینیوم بروی گرانول‌های اولیه باقی می‌ماند. در مرحله تولید گرانول‌های اولیه، قبل از افزایش TNT، مواد منفجره هگزوزن یا اکتوزن به همراه واکس به آب اضافه می‌شوند. مقدار TNT اولیه و دمای مناسب برای مراحل مختلف فرایند به وسیله آزمایش به دست می‌آید. هرچند به عنوان یک قاعده می‌توان گفت که مقدار مناسب TNT اولیه تقریباً ۲۰ درصد مقدار کل TNT مورد استفاده می‌باشد [۲۵]. در صورتی که ابتدا کریستال‌های ماده منفجره با لایه نازکی از واکس اکسازولین پوشیده شود، توزیع یکنواخت‌تری از

حتی اگر از لیگنوسولفونات استفاده نشود، تا مدت ۵۰ روز هیچگونه گازی از قرص های مواد منفجره در مجاورت با آب 20°C آزاد نمی‌شود(شکل ۱)[۲۷].

در این روش، ابتدا در هابر^۲ ذوب کننده (۱۲)، TNT ذوب شده و بقیه‌ی اجزا، مانند روش مستقیم، به آن افزوده می‌گردد. سپس دما تا دمای بالاتر از نقطه ذوب (83°C تا 91°C) افزایش می‌یابد. هابر (۱۲) به شیر تخلیه مجهز است. مخلوط، توسط یک همزن (۱۴) یکنواخت نگه داشته می‌شود. سپس مخلوط مذاب وارد یک مجرای گرم (۱۴) می‌شود. زیر این حفره، صفحه مشبکی (۱۹) قرار دارد که نازل‌ها (۱۸) بر روی آن و با سه قطر متفاوت، در اطراف دواپری بر روی این صفحه تعبیه شده‌اند. در این روش، عامل محدود کننده درصد RDX و آلومینیوم و میزان ویسکوزیته ترکیب مذاب است که به آن امکان می‌دهد که از درون نازل‌ها با قطر مناسب عبور نموده و وارد حمام آب سرد شود. گرانول‌هایی که به این طریق حاصل می‌شوند، دارای قطری در حدود ۱-۵ mm هستند که به آسانی جریان می‌یابند. اگر کامپوزیت انفجاری مذاب خیلی ویسکوز باشد، سرعت تولید کاهش یافته و مواد منفجره در نازل‌ها لخته می‌شوند[۲۰].



شکل ۱- شمای فرایند تولید با استفاده از سردسازی مخلوط همگن[۲۳].

واکس غیرحساس کننده بر روی کریستال های مواد منفجره هگزوزن یا اکتوزن باقی خواهد ماند. حضور واکس اکسازولین تمایل به کلوخه‌ای شدن را که حتی در پودر آلومینیوم معمولی (غیر حساس نشده) وجود دارد، کاهش می‌دهد. این تمایل کلوخه‌ای شدن، در هنگام ذوب دوباره‌ی مواد منفجره برای انجام فرایند ریخته‌گری، خود را نشان می‌دهد[۲۶].

هنگامی که TNT اولیه اضافه می‌شود (TNT مذاب) بایستی امکان انجام گرانولاسیون در مخلوط آب با دمای پایین‌تر از $80-82^{\circ}\text{C}$ را داشته باشیم (دمایی کمتر از نقطه ذوب TNT). در هنگام افزایش TNT مذاب ثانویه (به همراه پودر آلومینیوم) به سوسپانسیون، دمای مخلوط باید حدودا $72-73/5-72$ باشد. پس از انجام گرانولاسیون نهایی، گرانول‌های به دست آمده را می‌توان فیلتر و خشک نمود. با مخلوط نمودن پودر آلومینیوم با TNT یک لایه از TNT بر روی این پودر باقی مانده و مانند یک لایه محافظ عمل می‌کند. علاوه بر این روش، زمان تماس پودر آلومینیوم در آب نسبت به زمانی که پودر آلومینیوم مستقیماً و در یک مرحله با سایر اجزاء مخلوط می‌شوند، تا ۷۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در این روش، امکان استفاده از پودر آلومینیوم معمولی فراهم می‌شود و خطر استفاده از این پودر در مقیاس صنعتی را به حداقل می‌رساند و همچنین تمایل کلوخه‌ای شدن پودر آلومینیوم در حضور واکس را کاهش می‌دهد[۲۴]. روش فوق، با افزایش مقدار کمی (حدوداً ۰/۰۲ درصد آلومینیوم) از یک عامل فعال سطحی^۱ ویژه، به آب حاوی سوسپانسیون اصلاح می‌شود. این عوامل فعال سطحی از ملکول‌های با زنجیره طولانی و سطح فعال به وسیله گروه فسفات در یک انتها تشکیل شده‌اند که تمایل شدیدی برای چسبیدن به سطح آلومینیوم داشته و به طور مؤثر از تماس آب با آن جلوگیری نموده و از تولید گاز هیدروژن جلوگیری می‌کنند[۲۶].

۲-۲-۲-۲- تولید گرانول با استفاده از سرد سازی مخلوط

همگن

در این روش برای حذف واکنش بین پودر آلومینیوم و آب یا بخار آب، از آمونیوم لیگنوسولفونات(عامل غیرفعال کننده) با غلظت حدود ۰/۱ درصد وزنی استفاده می‌گردد. تست های بعدی نشان می‌دهد که

۲- Hopper

۱- Surface Active Agent

۳- بخش تجربی

۳-۱- لوازم و تجهیزات مورد نیاز

تجهیزات اصلی بکار رفته عبارتند از :

- ظرف ذوب TNT و اختلاط TNT و آلومینیوم (حدود ۱ لیتری)؛
- یک کریستالیزور مجهز به همزن، گویل، ژاکت و گاز کش (حدود ۱۰ لیتر)؛
- سیستم فیلتراسیون (ناچ) به ظرفیت تقریبی ۵ کیلوگرم ؛
- کندانسور هایی برای تبرید حلال خروجی از کریستالیزور؛
- مبدل جهت تامین آب گرم مورد نیاز؛
- فن گاز کش.

۳-۲- روش تولید

- ۱- ابتدا ۲/۵ لیتر آب به یک راکتور ۱۰ لیتری مجهز به همزن و ژاکت منتقل می شود؛
- ۲- دور همزن در حدود ۲۵۰-۲۰۰ rpm تنظیم شده و دمای آب تا ۹۰ °C افزایش می یابد؛
- ۳- بیج ۴۰۰ گرمی از هگزوزن به همراه ۰/۰۶ گرم واکس اکسازولین حل شده در کلروتن^۱ به آب با دمای ۹۰ °C افزوده می شود (دمای افزایش نباید بالاتر از نقطه ذوب واکس باشد)؛
- ۴- پس از تبخیر حلال کلروتن، تمامی واکس بر روی هگزوزن باقی می ماند. در این هنگام ۵۰ گرم واکس پارافین (بیز واکس^۲) به مخلوط اضافه می شود؛
- ۵- پس از انجام غیر حساس سازی هگزوزن، دمای مخلوط تا ۸۰ °C کاهش می یابد و در این مرحله ۸۰ گرم از TNT به آن افزوده می شود؛
- ۶- پس از گرانوله شدن اولیه، دمای مخلوط تا ۷۵-۷۰ °C کاهش می یابد. پس از آن حدود ۳۲۰ گرم از TNT مذاب (۱۱۰ درجه سانتیگراد) که با ۱۵۰ گرم پودر آلومینیوم مخلوط شده است، به سوسپانسیون فوق افزوده می شود؛
- ۷- هنگامی که گرانول های نهایی تشکیل شدند، بیج حاصل تا دمای ۵۰ °C سرد شده و درون یک ناچ فیلتر می شود.

^۱- Chlorotene or 1,1,1-trichloroethane
^۲- Bees Wax

۳-۳- بهینه سازی مقدار پارامترهای مختلف

با توجه به اینکه در فرایند منتخب باید از مخلوط آلومینیوم در مذاب TNT استفاده نمود و فراهم نمودن این شرایط در مقیاس آزمایشگاهی بسیار مشکل می باشد، بنابراین در مقیاس آزمایشگاهی فقط پارامترهای اساسی روش مورد بررسی قرار می گیرند تا محدوده مورد استفاده در مقیاس پایلوت بدست آید و در واقع بهینه سازی نهایی در مقیاس پایلوت صورت می گیرد. در این مرحله پارامترهای زیر مورد بررسی و بهینه سازی قرار می گیرند:

- ۱- نسبت مواد جامد و آب؛
- ۲- دور همزن؛
- ۳- دمای افزایش TNT جهت ایجاد پوشش اولیه؛
- ۴- مقدار TNT جهت ایجاد پوشش اولیه؛
- ۵- دمای مخلوط در هنگام افزایش سوسپانسیون TNT/Al ؛
- ۶- دمای افزایش سوسپانسیون TNT/Al.

۳-۳-۱- بهینه سازی نسبت مواد جامد و آب

انتخاب نسبت آب به مواد جامد در تولید مواد منفجره گرانول در محیط دوغابی پارامتر مهمی است که بهینه سازی آن، امکان افزایش ظرفیت تولید در مقیاس های بالا را فراهم می کند و بستگی به شکل راکتور، شکل و سرعت همزن دارد. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی اثر نسبت مواد جامد به آب بر اندازه گرانول ها و میزان آلومینیوم آزاد ارائه شده است. نتایج نشان داد که در حجم های دوغاب بالاتر نیاز به سرعت های بیشتر همزن می باشد همچنین توزیع اندازه گرانول های تهیه شده تمایل به مقادیر پایین تر را نشان می دهد. بطور کلی پیشنهاد می گردد که نسبت آب به RDX در محدوده ۵-۷ برابر باشد.

۳-۳-۲- بهینه سازی دور همزن

میزان تاثیر سرعت همزن بر کیفیت محصول وابسته به شکل و طراحی کریستالیزور، حجم دوغاب و شکل همزن می باشد.

۳-۳-۳- بهینه سازی دمای افزایش TNT جهت ایجاد پوشش

اولیه

دمایی که در آن TNT اولیه جهت ایجاد گرانول‌های اولیه افزوده می‌گردد، تاثیر بسزایی در کیفیت محصول دارد. اگر دما در این مرحله فاصله زیادی از نقطه انجماد TNT داشته باشد، باعث ایجاد گرانول‌های غیریکنواخت می‌گردد. اگر دما در این مرحله بیش از نقطه انجماد TNT باشد، باعث ایجاد محصول کلوخه‌ای در اثر سرد کردن مخلوط می‌گردد (زیرا TNT تمایل به کاهش حجم دارد). از طرفی اگر دمای این مرحله خیلی کمتر از نقطه انجماد TNT باشد باعث ایجاد مستقیم گرانول‌های TNT بدون جذب RDX و پودر آلومینیوم می‌گردد. بنابراین دمای مورد استفاده باید در حدود نقطه انجماد TNT و ترجیحا قدری کمتر از این دما باشد.

تغییر سرعت هم زدن دوغاب در محدوده ۶۰۰-۱۵۰ rpm با توجه به طراحی خاص کریستالیزور و همزن موجود نشان داد که در سرعت‌های بالاتر اندازه دانه بندی تمایل به مقادیر کوچکتر دارد. در جدول (۵) نتایج حاصل از بررسی اثر دور همزن بر اندازه گرانول‌ها و میزان آلومینیوم آزاد ارائه شده است. در این آزمایشات از ۴۰۰ g RDX و نسبت آب به مواد جامد حدود ۷ استفاده گردید. نتایج بیانگر این است که افزایش بی رویه دور همزن باعث پوشش ناقص آلومینیوم موجود در فرمولاسیون می‌گردد (زیرا دانسیته آلومینیوم بیشتر از سایر اجزاء می باشد و در اثر نیروی گریز از مرکز حاصل از همزن تمایل به رانده شدن بیشتری به اطراف ظرف واکنش دارد). بنابراین میزان بهینه دور همزن در محدوده ۱۵۰ تا ۲۰۰ rpm انتخاب گردید.

جدول ۴- بررسی اثر نسبت مواد جامد به آب.

ردیف	مواد جامد اولیه (RDX گرم)	حجم آب اولیه (لیتر)	نتایج
۱	۴۰۰	۱/۵	دانه بندی یکنواختی حاصل نشد و مواد بصورت کلوخه ای تشکیل می‌شود.
۲	۴۰۰	۲	دانه بندی نسبتا یکنواختی حاصل شد.
۳	۴۰۰	۲/۵	دانه بندی نسبتا یکنواختی حاصل شد.
۴	۴۰۰	۳	دانه بندی یکنواختی حاصل شد.
۵	۴۰۰	۳/۵	دانه بندی نسبتا یکنواختی حاصل شد.
۶	۴۰۰	۴	دانه بندی یکنواخت نمی باشد و همزدن با کیفیت مناسب صورت نمی‌گیرد.

جدول ۵- بررسی اثر دور همزن بر اندازه گرانول ها و میزان آلومینیوم آزاد.

ردیف	دور همزن (دور بر دقیقه)	نتایج
۱	۱۰۰	اندازه گرانول ها بسیار بزرگ و شبیه به کلوخه مواد می‌باشد.
۲	۱۵۰	دانه بندی نسبتا یکنواختی حاصل شد.
۳	۲۰۰	دانه بندی نسبتا یکنواختی حاصل شد.
۴	۲۵۰	مقداری از محصول بصورت پودر وجود دارد.
۵	۳۰۰	محصول پودری و پودر آلومینیوم آزاد زیادی ایجاد گردید.

در جدول (۶)، نتایج حاصل از بررسی اثر دمای افزایش TNT اولیه کیفیت محصول ارائه شده است. در این آزمایشات از ۴۰۰ گرم RDX، نسبت آب به مواد جامد حدود ۷ و دور همزن ۲۰۰ دور بر دقیقه استفاده گردید. با توجه به نتایج، مطابق پیش بینی صورت گرفته، دمای بهینه در این مرحله ۲ تا ۳ درجه زیر نقطه انجماد TNT می‌باشد. بنابراین میزان بهینه دما در این مرحله در محدوده ۸۰ درجه سانتیگراد انتخاب گردید.

۳-۳-۴ - بهینه سازی مقدار TNT جهت ایجاد پوشش اولیه

مقدار TNT که جهت ایجاد گرانول‌های اولیه افزوده می‌گردد تاثیر بسزایی در کیفیت محصول دارد. اگر مقدار TNT در این

مرحله خیلی زیاد باشد باعث ایجاد گرانول‌های غیریکنواخت در این مرحله می‌گردد و اگر مقدار TNT در این مرحله خیلی کم باشد، باعث عدم ایجاد مناسب گرانول‌های اولیه و تولید محصول نهایی کلوخه‌ای می‌گردد. در این مرحله مقادیر نزدیک به مقدار توصیه شده در پنتنت مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول (۷) نتایج حاصل از بررسی اثر مقدار افزایش TNT اولیه کیفیت محصول ارائه شده است. در این آزمایشات از ۴۰۰ گرم RDX، نسبت آب به مواد جامد حدود ۷، دور همزن ۲۰۰ دور بر دقیقه و دمای افزایش TNT اولیه ۸۰ درجه سانتیگراد استفاده گردید. بنابراین مقدار بهینه TNT در این مرحله حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کل TNT می‌باشد.

جدول ۶- بررسی اثر دمای افزایش TNT اولیه بر کیفیت محصول.

ردیف	دمای افزایش TNT اولیه (درجه سانتیگراد)	نتایج
۱	۷۵	گرانول های تشکیل شده کوچک بوده و مقدار عمده آن از TNT بود.
۲	۸۰	گرانول های اولیه تشکیل شدند.
۳	۸۵	گرانول های اولیه با ابعاد بزرگتر از مرحله قبل تشکیل شد.
۴	۹۰	بعد از سرد نمودن مخلوط، محصول کلوخه‌ای تشکیل گردید.

جدول ۷- بررسی اثر مقدار TNT اولیه بر کیفیت محصول.

ردیف	مقدار TNT اولیه (گرم)	نتایج
۱	۵۰	میزان تشکیل گرانول های اولیه مناسب نبود (RDX آزاد بسیار زیادی وجود داشت).
۲	۸۰	گرانول های اولیه تشکیل شد ولی مقدار زیادی از محصول نهایی بصورت پودری بود.
۳	۱۰۰	میزان تشکیل گرانول های اولیه نسبتا مناسب بود.
۴	۱۵۰	گرانول های اولیه تشکیل شدند ولی مقداری پودر آلومینیوم آزاد وجود داشت.
۵	۲۰۰	در مرحله افزایش پودر آلومینیوم مخلوط یکنواختی ایجاد نگردید (محصول حاوی مقدار زیادی پودر آلومینیوم آزاد می باشد).

۳-۳-۵- بهینه سازی دمای مخلوط در هنگام افزایش

سوسپانسیون TNT/Al

اگر دمای تشکیل گرانول‌های نهایی فاصله زیادی از نقطه انجماد TNT داشته باشد، باعث ایجاد گرانول‌های غیریکنواخت می‌گردد. اگر دما در این مرحله بیش از نقطه انجماد TNT باشد، باعث ایجاد محصول کلوخه‌ای در اثر سرد کردن مخلوط می‌گردد زیرا TNT تمایل به کاهش حجم دارد. از طرفی اگر دمای این مرحله خیلی کمتر از نقطه انجماد TNT باشد، باعث ایجاد مستقیم گرانول‌های TNT/Al بدون جذب RDX می‌گردد. بنابراین دمای مورد استفاده باید در حدود نقطه انجماد TNT و ترجیحاً مقداری کمتر از این دما باشد. در جدول (۸) نتایج حاصل از بررسی اثر دمای افزایش سوسپانسیون TNT/Al بر کیفیت محصول ارائه شده است. در این آزمایشات از ۴۰۰ گرم RDX، نسبت آب به مواد جامد حدود ۷ و دور همزن ۲۰۰ rpm استفاده گردید. با توجه به نتایج، دمای بهینه در این مرحله حدود ۷۵°C می‌باشد.

۳-۳-۶- بهینه سازی دمای افزایش مخلوط TNT/Al

دو محدوده دمایی برای سوسپانسیون انفجاری مذاب مورد بررسی قرار گرفت. اولین محدوده دمایی از دمای ذوب TNT (۸۱°C) تا ۸۶°C است که در آن ویسکوزیته سوسپانسیون نسبتاً بالا بوده و با دما به شدت تغییر می‌کند. محدوده دمایی دومی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، از دمای ۹۰°C تا ۹۳°C است که ویسکوزیته آن کمتر بوده و نسبتاً ثابت است.

نتایج نشان می‌دهد که اگر اندازه یکنواختی از گرانول‌ها مورد نیاز باشد، دمای سیال تا حدی که برای فرایند امکان داشته باشد، بالاتر نگه داشته شود. دلیل این امر را می‌توان با مشاهده تشکیل گرانول‌ها توضیح داد. در دمای کمی بالاتر از دمای ذوب TNT (۸۶°C - ۸۳°C) ویسکوزیته نسبتاً بالا بوده و سرعت جریان مواد کند می‌باشد و بنابراین گرانول‌های حاصل بزرگتر و غیر یکنواخت تر هستند. زمانی که دمای مذاب بالا است (بالاتر از ۹۰°C) ویسکوزیته مذاب به حدی کاهش می‌یابد که مذاب بصورت پیوسته جریان می‌یابد و در اثر درگیر شدن در جریان آب به قطرات نسبتاً یکنواختی تفکیک می‌گردند از طرفی به دلیل زمان بیشتر جهت تشکیل گرانول، در این حالت گرانول‌های ایجاد شده دارای اندازه‌های یکنواخت تر و کروی شکل می‌باشند. بنابراین محدوده دمای ۹۰°C تا ۱۰۰°C جهت افزایش سوسپانسیون TNT/Al مورد استفاده قرار گرفت.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اهمیت کاربرد پودر آلومینیوم در کامپوزیت‌های HBX و به طور کلی در مواد منفجره، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای مؤثر در فرایند تولید ترکیبات HBX-1 که بصورت گرانول و در محیط دوغابی تهیه می‌گردند مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفت و مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر بر کیفیت محصول از قبیل نسبت مواد جامد و آب، دور همزن، دمای افزایش TNT جهت ایجاد پوشش اولیه، مقدار TNT جهت ایجاد پوشش اولیه، دمای مخلوط در هنگام افزایش سوسپانسیون TNT/Al و دمای افزایش سوسپانسیون TNT/Al تعیین گردیدند. در نهایت یک ترکیب انفجاری HBX با خواص انفجاری مطلوب به دست آمد.

جدول ۸- بررسی اثر دمای مخلوط در هنگام افزایش سوسپانسیون TNT/Al.

ردیف	دمای افزایش TNT/Al (درجه سانتیگراد)	نتایج
۱	۷۰	گرانول‌های تشکیل شده کوچک بوده و مقدار عمده آن از TNT/Al بود.
۲	۷۵	محصول نهایی با اندازه و ترکیب درصد نسبتاً مناسب ایجاد گردید.
۳	۸۰	گرانول‌های محصول با ابعاد بزرگتر از مرحله قبل تشکیل شدند.
۴	۸۵	بعد از سرد کردن مخلوط محصول بصورت کلوخه‌ای و با ابعاد بزرگ تشکیل شدند و مقداری RDX آزاد وجود داشت.

۵- منابع

- [1]. Lefranc, A. "Expertise of Nanometric Aluminum Powder on the Detonation Efficiency of explosives.": 32nd Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 36-1, 2001.
- [2]. Fedoroff, B. T.; Shffield, O. E. "Torpex"; In Encyclopedia of Explosives and Related items; Picatinny Arsenal: New Jersey; part 2007, Vol.9, T324, 1960.
- [3]. U.S. Army Material Command. "Properties of explosives of military interests" In Engineering Design Handbook, Explosive Series; Headquarters, U.S. Army Material Command; 359-363, 1967.
- [4]. Fedoroff, B. T.; Shffield, O. E. "HTA"; In Encyclopedia of Explosives and Related items Picatinny Arsenal: New Jersey; part 2007, Vol.1, D19, 1960.
- [5]. Ulsteen, K. "Process for the preparation of aluminum-containing high-energy explosive compositions.": US patent 4,376,083, 1983.
- [6]. Fedoroff, B. T.; Shffield, O. E. "HTA"; In Encyclopedia of Explosives and Related items Picatinny Arsenal: New Jersey; part 2007, Vol.7, H176, 1960.
- [7]. U.S. Army Material Command. "Properties of explosives of military interests" Engineering Design Handbook, Explosive Series; Headquarters, U.S. Army Material Command; 178-181, 1967.
- [8]. "HBX compositions.": Military specification; Mil-E-46495A;1990.
- [9]. The usenet FAQ Archives "Pyrotechnics, Explosives and Fireworks."http://www.faqs.org/docs/air/tpyry.html.
- [10]. Mil-E-22267A, Military specification, 22 Apr. 1988.
- [11]. Fedoroff, B. T.; Shffield, O. E. "HBX (high blast explosives)"; Encyclopedia of Explosives and Related items; Picatinny Arsenal: New Jersey; part 2007, Vol.7, H23-H35, 1960.
- [12]. U.S. Army Material Command "Properties of explosives of military interests"; Engineering Design Handbook, Explosive Series; Headquarters, U.S. Army Material Command; 156-163, 1967.
- [13]. Fedoroff, B. T.; Shffield, O. E. "Encyclopedia of Explosives and Related items"; Picatinny Arsenal: New Jersey; part 2007, Vol7, H1, 1960.
- [14]. "MILITARY EXPLOSIVES.": TECHNICAL MANUAL; DEPARTMENT OF THE ARMY; Washington D.C., 1990.
- [15]. Kwok, Q. S. M.; Fouchard, R. C.; Turcotte, A. M. "Characterization of aluminum nanopowder compositions. ": Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 27, 229-240, 2002.
- [16]. زاکلین اخوان، ترجمه دهنوی و بزاز "مواد منفجره (تاریخچه، تئوری، شیمی و تولید)". انتشارات دانشگاه امام حسین (علیه السلام)، چاپ اول، ۸۳-۱۱۲، ۱۳۸۰.
- [17]. Spencer, A. F. "Melt-castable explosive composition.": US patent 4,747,892, 1988.
- [18]. Aubert, S. A. "Desensitized explosive composition.": US patent 4,705,582, 1987.
- [19]. Ampleman, G., Brousseau, P. "Insensitive melt cast explosive compositions containing energetic thermoplastic elastomers.": US patent 6,562,159 B2, 2003.
- [20]. William Voigt, H.; Stanhope, N.J. "Process for suspending particulate additives in molten TNT.": US patent 4,000,021, 1976.
- [21]. Dawson, J. W.; Westheimer, F. H. "Aluminized explosives.": US patent 2,982,641, 1961.
- [22]. Ampleman, G.; Brousseau, P.; Thiboutot, S. "Insensitive melt cast explosive compositions containing energetic thermoplastic elastomers.": US patent 6,562,159, 2003.
- [23]. Ulsteen, K. "Process for the preparation of aluminum-containing high-energy explosive compositions." US patent 4,376,083, 1983.
- [24]. Plauson, R. A.; McBride, W.; Mary, E. "Method for bomb manufacture.": US patent 3,998,676, 1976.
- [25]. Gustav, N. "Method of manufacturing explosives.": US patent 2,852,360, 1958.
- [26]. Back, S.; Nyqvist, J. O. "Method for the manufacture of composite explosives.": US patent 4,714,572, 1987.
- [27]. Drolet, F.; Laverth, R.R. "Development of a Method to produce high Energy Blasting Prill.": NTIS, ADA074705, 1976.