

بررسی استفاده از پلیمرها و نرم کننده‌های پراثری در ساخت مواد منفجره پلاستیکی حاوی HMX

امیر حضرتپور^{۱*}، سید عباس وزیری^۲، اکبر نسیمی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، ۳- کارشناس ارشد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

*Email: amirchem7@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۷)

چکیده

مواد منفجره پلاستیکی (PBXs) با بایندر خنثی علی‌رغم داشتن خواص مکانیکی خوب و حساسیت پایین، به علت داشتن مواد خنثی، محتوای انرژی پایینی دارند. بنابراین تحقیقاتی جهت جایگزینی سامانه بایندر خنثی با سامانه بایندر پراثری و اجزای انفجاری قوی‌تر در ساخت این مواد انجام می‌گیرد. استفاده از پلیمرهای پراثری و موادی مانند سیکلو تترامتیلن تترانیترامین (HMX) در PBXها می‌تواند این مشکل را تا حدود زیادی حل کند. یافته‌ها نشان می‌دهد استفاده از پلیمرهای پراثری مانند پلیمر گلیسیدیل آزید (GAP) و پلی (NIMMO) ویژگی‌های انفجاری و مکانیکی خوبی را به فرمولاسیون PBX می‌دهد اما در عین حال ممکن است سبب افزایش حساسیت این مواد نسبت به ضربه و اصطکاک شود. نکته مهم در ساخت PBXها، رسیدن به محتوای انرژی مناسب و همچنین حساسیت کم نسبت به ضربه و اصطکاک است. در این مقاله مشخصات برخی از پلیمرهای پراثری، سازگاری این پلیمرها با برخی از مواد منفجره رایج و آخرین تحقیقات در مورد استفاده از پلیمرها و نرم کننده‌های پراثری در ساخت مواد منفجره پلاستیکی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: مواد منفجره پلاستیکی، پلیمرهای پراثری، HMX، ویژگی‌های انفجاری، ویژگی‌های ایمنی.

Review of Using Energetic Polymers and Plasticizers in the making of Plastic Bonded Explosives Containing HMX

A. Hazratpoor*, S. A. Vaziri, A. Nasimi

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 06/15/2021, Accepted: 09/18/2021)

Abstract

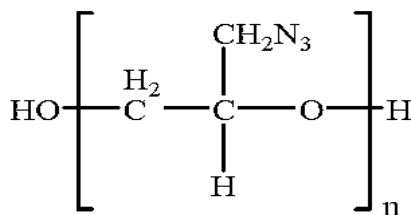
Plastic Bonded Explosives with inert binder despite having good mechanical properties and low sensitivity, because of containing inert materials, have low energy level. So investigations for replacing inert binder system with energetic binder system and high exploding components in the making of these materials are performing. It seems using energetic polymers and materials like Cyclotetramethylene tetranitramine (HMX) in Plastic Bonded Explosives can overcome this problem. Investigations show using energetic polymers like Glycidyl Aide Polymer and PolyNIMMO give good explosion and mechanical properties to PBXs but it may cause to increasing these formulations sensitivity to impact and friction. An important point in the making of PBXs is reaching to suitable energy level and also less sensitivity to impact and friction. In this article specifications of some energetic polymers, compatability of this polymers with some common explosives and last investigations about using energetic polymers and plasticizers in the making of Plastic Bonded Explosives was reviewed.

Keywords: Plastic Bonded Explosives, Energetic Polymers, HMX, Explosion Specifications, Safety Specification.

۱- مقدمه

۱-۲- پلیمر گلیسیدیل آزید (GAP)

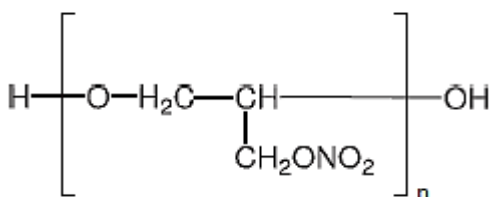
پلیمر گلیسیدیل آزید یا GAP یک پلیمر پرنرزی است که حساسیت بالایی نسبت به ضربه و اصطکاک در مقایسه با سایر پلیمرها دارد. با این وجود استفاده از این پلیمر سبب افزایش سطح انرژی فرمولاسیون پیشراهنه یا ماده منفجره پلاستیکی می‌شود. این ماده دارای دو نوع دو عاملی و سه عاملی است. GAP دو عاملی دارای چگالی 1.29 g/cm^3 و جرم مولکولی $500-5000 \text{ g/mol}$ است [۲]. همچنین این پلیمر سرعت انفجار 6638 m/s و فشار انفجار 12.9 GPa را بنا به گزارش نرم‌افزار EXPLO5 دارا است [۳]. در شکل (۱) ساختار مولکولی پلیمر پرنرزی GAP نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار مولکولی پلیمر گلیسیدیل آزید [۴].

۲-۲- پلی گلیسیدیل نیترات (PGN)

پلی گلیسیدیل نیترات نسبت به GAP پایدارتر بوده و از میزان انرژی بیشتری نیز برخوردار است. این پلیمر دو عاملی بوده و دارای جرم مولکولی $1000-3000 \text{ g/mol}$ و عدد هیدروکسیل 37 mgKOH/g است. همچنین سرعت انفجار این ماده 6476 m/s و فشار انفجار آن 14.4 GPa می‌باشد [۳ و ۴]. ساختار مولکولی PGN در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار مولکولی پلی گلیسیدیل نیترات [۲].

۳-۲- پلی (NIMMO)

پلی (۳- نیتراومتیل-۳- متیل)اکستان^۷ یا پلی (NIMMO) یکی دیگر از پلیمرهای پرنرزی است که از پایداری بیشتری برخوردار است. این

مواد منفجره پلاستیکی^۱ (PBXs) موادی هستند که در آن کریستال‌های ماده منفجره در لایه پلیمری خنثی یا پرنرزی قرار می‌گیرد تا از ایجاد آغازش زود هنگام در اثر اصطکاک، برش، ضربه یا غیره جلوگیری شود. PBXها به دلیل خاصیت شکل‌پذیری و خواص مکانیکی و حساسیتی بهتر کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند. از این مواد در ساخت سرچنگی موشک‌ها، تسلیحات نظامی زیر آب، برخی کارهای صنعتی و غیره استفاده می‌شود [۱]. اما مشکل PBXها پایین آمدن سطح انرژی در آن‌ها به دلیل استفاده از پلیمرها و نرم‌کننده‌های غیر پرنرزی می‌باشد. از این رو تحقیق‌های بسیاری به منظور بهبود عملکرد انفجاری PBXها هم‌زمان با حفظ ویژگی کم حساس بودن آن‌ها، در حال انجام است. با بررسی‌های صورت گرفته تاکنون از پلیمرهای پرنرزی نیتروسولولوز نرم شده^۲ (PNC)، پلی اتیلن گلیکول^۳ (PEG)، پلی (NIMMO)، پلیمر گلیسیدیل آزید^۴ (GAP) و پلی گلیسیدیل نیترات^۵ (PGN) در تهیه برخی مواد منفجره پلاستیکی استفاده شده است. هدف استفاده از این پلیمرها رسیدن به فرمولاسیونی است که ضمن افزایش انرژی فرمولاسیون، موجب افزایش زیاد حساسیت آن نشود.

برای دستیابی به PBXهایی با عملکرد انفجاری برابر یا بیشتر از ترکیبات بر پایه TNT، می‌باید از اجزای انفجاری پر قدرتی همانند سیکلوتترامتیلن تترانیترامین^۶ (HMX) نیز به همراه پلیمرهای پرنرزی در فرمولاسیون PBXها استفاده کرد. تاکنون در چند فرمولاسیون محدود، HMX همراه با بایندر پرنرزی استفاده شده است که ویژگی انفجاری و مکانیکی بهتر و در مواردی نیز حساسیت کمتری از خود نسبت به ترکیبات رایج نشان داده‌اند. در ادامه به مرور مشخصات و ساختار چند پلیمر پرنرزی و همچنین ماده HMX و فرمولاسیون‌های صنعتی و آزمایشگاهی تولید شده بر پایه این مواد و سپس به بررسی نتایج ارائه شده توسط محققین در مورد فرمولاسیون‌های تولید شده پرداخته می‌شود.

۲- بررسی مشخصات پلیمرهای پرنرزی و ماده منفجره

HMX

به پلیمرهایی که حاوی گروه‌های پرنرزی می‌باشند که هنگام سوختن میزان انرژی زیادی را آزاد می‌کنند، پلیمرهای پرنرزی می‌گویند. این ویژگی پلیمرهای پرنرزی بیانگر وجود گروه‌های فلوئور (F) یا نیترو (NO_2) یا نیترات (NO_3) یا آزید (N_3) در این مواد است [۲].

7- Poly(3-nitratomethyl-3-methyl) Oxetane

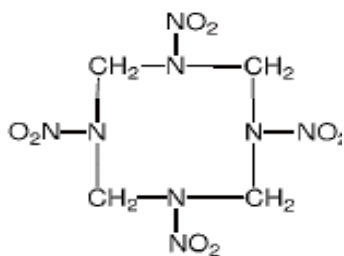
1- Plastic Bonded Explosive
2- Plastisized Nitro Cellulose
3- Poly Ethylene Glycol
4- Glycidyl Azide Polymer
5- Poly Glycidyl Nitrate
6- Cyclotetramethylene Tetranitramine

در جدول (۱) ویژگی‌های مختلف این پلیمرها با هم مقایسه شده است. با بررسی این ویژگی‌ها به خصوص ویژگی‌های مکانیکی نظیر چگالی و ویژگی‌های حساسیتی نظیر حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک می‌توان به میزان کارایی هر یک از پلیمرها جهت استفاده در مواد منفجره پلاستیکی پی برد.

۲-۵- سیکلو تترامتیلن تترانیترامین (HMX)

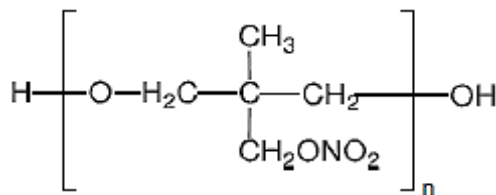
سیکلو تترامتیلن تترانیترامین (HMX) ماده منفجره‌ای با نقطه ذوب بالاست که اکتوژن نیز نامیده می‌شود. HMX دارای رنگ سفید با ساختار بلوری است و چهار پلی‌مورف مختلف دارد. نوع β پایدارترین حالت آن و دارای حداقل حساسیت است. در شکل (۵) ساختار مولکولی این ماده نشان داده شده است.

این ماده بین مواد منفجره‌ای که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیشترین ضربه انفجاری^۲ را دارا می‌باشد. به دلیل خواص انفجاری و پایداری بهتر، HMX نسبت به RDX^۳ ماده منفجره کارآمدتری است. در چگالی $1/9 \text{ g/cm}^3$ HMX β - دارای سرعت انفجار 9100 m/s و فشار انفجار $39/5 \text{ GPa}$ است [۲، ۵ و ۶].



شکل ۵- ساختار مولکولی سیکلو تترامتیلن تترانیترامین [۲].

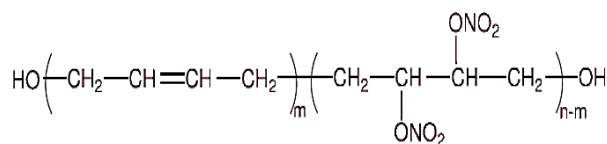
پلیمر دمای گذر شیشه‌ای پایینی داشته و با ترکیب با ایزوسیانات‌ها و قرار گرفتن در معرض حرارت، پخت می‌شود. این پلیمر دارای انواع دو عاملی و سه عاملی است که به ترتیب جرم مولکولی 17000 g/mol و 6500 دارند. در شکل (۳) ساختار مولکولی آن نشان داده شده است.



شکل ۳- ساختار مولکولی پلی (NIMMO) [۲].

۲-۴- پلی بوتادی‌ان نیتره شده با گروه‌های هیدروکسیل انتهایی (NHTPB)

پلی بوتادی‌ان نیتره شده با گروه‌های هیدروکسیل انتهایی^۱ یا NHTPB دارای گروه‌های NO_3 در ساختار خود است. این پلیمر هم ویژگی‌های الاستومری خوب HTPB و هم گروه‌های پراثری نیترات استر را با هم دارد و از این نظر دارای مزیت است. NHTPB دارای جرم مولکولی تقریبی 2500 g/mol است. ساختار مولکولی آن در شکل (۴) نشان داده شده است [۲].



شکل ۴- ساختار مولکولی پلی بوتادی‌ان نیتره شده با گروه‌های هیدروکسیل انتهایی [۲].

جدول ۱- ویژگی‌های مختلف پلیمرهای پراثری.

نام پلیمر	چگالی g/cm^3	گرانروی Poise (در 30°C)	$\Delta H_f, \text{ kJ/mol}$	$T_g(^\circ\text{C})$	حساسیت به دما $(^\circ\text{C})$	حساسیت به ضربه (J)	حساسیت به اصطکاک (N)
GAP	$1/30$ [۲-۴]	50 [۲]	117 [۷]	$45-4$ [۴]	120 [۲]	8 [۳]	$360 >$ [۳]
NHTPB	$1/20$ [۴ و ۲]	120 [۲]	-	$58-2$ [۲]	156 [۲]	بسیار غیر حساس [۲]	بسیار غیر حساس [۲]
Poly(NIMMO)	$1/26$ [۴ و ۲]	1350 [۲]	$335-7$ [۷]	$25-2$ [۲]	170 [۲]	بسیار غیر حساس [۲]	بسیار غیر حساس [۲]
Poly(GlyN)	$1/42$ [۲-۴]	163 [۲]	$285-7$ [۷]	$35-3, 4, 8$ [۸]	145 [۲]	10 [۳]	112 [۳]

2- Brisance
3- Cyclotrimethylene trinitramine

1- Nitrated Hydroxyl Terminated Polybutadiene

۳- انواع مواد منفجره پلاستیکی بر پایه بایندرها پراثری

پس از بررسی پلیمرهای پراثری و ماده HMX با توجه به بررسی‌های انجام شده در مقالات و پتنت‌ها لیست مواد منفجره پلاستیکی صنعتی که بر پایه بایندرها پراثری (نرم کننده‌های پراثری + پلیمرهای پراثری) ساخته شده‌اند در جدول (۲) ارائه شده است. برخی از این مواد منفجره پلاستیکی مانند CPX-413 هم اکنون نیز تولید و استفاده می‌شوند و تولید برخی دیگر مانند PBXN-105 به دلایلی همچون هزینه تمام شده بالا متوقف شده است [۹].

در تولید برخی از PBXها جهت کاربرد در بمب‌های زیر آبی از آلومینیم نیز استفاده شده است. پودرهای انفجاری رایج مورد استفاده در ساخت PBXها RDX یا HMX می‌باشد که دلیل آن خواص انفجاری و حساسیتی مناسب این مواد است. با این وجود تحقیقات همچنان در مورد استفاده از مواد منفجره بهینه‌تری مانند ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲- هگزانیتروهگزا ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲- آزا ایزو وورتزیتان^۱ (CL-20) در ساخت PBXها ادامه دارد [۱۰]. در جدول (۲) مواد منفجره پلاستیکی ساخته شده بر پایه بایندرها پراثری جمع‌آوری شده است. در تحقیقات انجام شده این مسئله مشخص شده است که به دلیل هزینه بالای پلیمر نیترو سلولوز نرم شده (PNC)، استفاده از آن کاهش یافته و از بایندرها غیر پراثری و یا پراثری جایگزین به جای آن استفاده می‌شود. همچنین مشخص شده دلیل کاهش

استفاده از پلیمر پراثری پلی اتیلن گلایکول (PEG) نیز کمبود تولید و دسترسی به نرم کننده (BDNPA/F) است زیرا وجود این نرم کننده در سامانه‌های بایندر دارای PEG ضروری است [۹].

۳-۱- نمونه PBXهای صنعتی ساخته شده بر پایه پلیمرهای پراثری و حاوی HMX ۳-۱-۱- CPX-413

ماده منفجره CPX-413 که متشکل از ۳۵ درصد HMX، ۴۵ درصد NTO، ۲۰ درصد پلی (NIMMO) و ۵ درصد نرم کننده K-10 است که توسط آژانس تحقیقات دفاعی انگلستان ساخته شده است و در طول انجام آزمایش‌های اتحادیه اروپا، آن را به‌عنوان ترکیب منفجره بسیار غیر حساس (EIDC^۲) طبقه‌بندی کرده‌اند. این ماده دارای سرعت انفجاری ۷/۹۹ km/s و فشار انفجاری ۲۷/۸ GPa است که در مقایسه با ترکیب B با سرعت انفجاری ۷/۹۱ km/s و فشار انفجاری ۲۶ GPa عملکرد بهتری نسبت به آن دارد [۱۱].

۳-۱-۲- PBXW-116

ماده PBXW-116 طبق گزارشات صورت گرفته شامل HMX و پلیمر پراثری نیتروسولوز نرم شده یا PNC می‌باشد، از درصد اجزای این ماده اطلاعات زیادی در دسترس نیست [۹].

جدول ۲- مواد منفجره پلاستیکی صنعتی ساخته شده بر پایه پلیمرهای پراثری.

مرجع	جز بایندر				جز انفجاری						نام PBX
	درصد سایر اجزای بایندر	درصد نرم کننده	درصد پلیمر	نرم کننده/ پلیمر	%TATB	%NTO	%AL	%AP	%RDX	%HMX	
[۹ و ۱]	۱/۳۵	۱۲/۹۲	۳/۱۳	PEG/(BDNPA/F)	-	-	۲۵/۸	۴۹/۸	۷	-	PBXN-105
[۹ و ۱]	۱/۹۵	۱۸/۵۵	۴/۵	PEG/(BDNPA/F)	-	-	-	-	۷۵	-	PBXN-106
[۹ و ۱]	۱/۹۵	۱۸/۵۵	۴/۵	PEG/(BDNPA/F)	-	-	۲۰	-	۵۵	-	PBXW-107(Q)
[۱۳]	-	۶	۴	CAB ^۳ (BDNPA/F)	-	-	۲۵	-	-	۶۵	PAX-3
[۱۴]	-	۲۵		PCP ^۴ (TMETN)	-	-	۳۳	-	-	۴۲	PBXIH-135 EB
[۹]	-	-	نامعلوم	PNC	-	-	-	-	-	نامعلوم	PBXW-116
[۹ و ۱]	-	-	نامعلوم	PNC	-	-	نامعلوم	-	-	-	PBXW-117
[۹ و ۱]	۱/۵۰	۲۵/۵۰	۶	PNC	-	-	۲۷	۴۰	-	-	PBXN-103
[۱۱ و ۱۲]	-	-	۲۰	PolyNIMMO/K-10	-	۴۵	-	-	-	۳۵	CPX-413
[۱۱]	-	-	۲۵	نامعلوم	۴۰	-	-	-	-	۳۵	۸۹۶۳

1- 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane

2- Extremely Insensitive Detonating Composition

3- Cellulose Acetate Butyrate

4- Polycaprolactone Polymer

۳-۱-۳- ماده منفجره پلاستیکی ۸۹۶۳

این ماده طبق گزارشات صورت گرفته متشکل از ۳۵ درصد HMX، ۴۰ درصد TATB و ۲۵ درصد پلیمر پراثری نامعلوم است که در کشور آمریکا تولید شده است و دارای سرعت انفجاری ۸/۱۴ km/s و فشار انفجاری ۲۹/۲ GPa می‌باشد، با توجه به این مشخصات عملکرد آن بهتر از ترکیب B و CPX-413 است [۱۲].

۳-۲- نمونه PBXهای آزمایشگاهی ساخته شده بر پایه پلیمرهای پراثری و حاوی HMX

علاوه بر PBXهای تولید شده حاوی HMX که در جدول (۱) ذکر شد، برخی محققین در مقیاس آزمایشگاهی نیز PBXهایی بر پایه پلیمرهای پراثری و حاوی HMX تولید کرده‌اند.

کریم الشراوی^۱ و همکاران وی در دانشگاه پچینگ^۲ در تحقیقی که انجام داده‌اند سه فرمولاسیون مختلف با استفاده از مواد منفجره HMX، RDX و PETN تولید کرده‌اند که در هر فرمولاسیون بایندر PU بر پایه GAP به کار رفته است. بعد از تولید فرمولاسیون‌ها، مشخصات انفجاری و حساسیتی آن‌ها را با ترکیب B مقایسه کرده‌اند تا کارایی هر یک مشخص شود [۱۵]. در این فرمولاسیون میزان ماده انفجاری ۸۶٪ و میزان بایندر (پلیمر+ نرم کننده) به اضافه عامل پخت ایزوفرون دی‌ایزوسیانات (IPDI) ۱۴٪ بوده است. تمام مواد در این آزمایش خالص بوده و فرمولاسیون‌ها با استفاده از روش ریخته‌گری تحت خلأ آماده شده‌اند. فرآیند اختلاط در محفظه ۵ کیلوگرمی با دو دیواره زاکتی^۴ انجام شده است که مایع در گردش آن را می‌توان سرد یا گرم کرد. محفظه مجهز به مخلوط کن عمودی با سه تیغه چرخنده به حالت مداری است. پیش پلیمر مورد استفاده در این کار GAP است. جهت تولید فرمولاسیون‌ها ابتدا پیش پلیمر در راکتور قرار گرفته و تا دمای ۶۰°C گرم شده است، سپس ماده منفجره خالص خشک به چهار بخش تقسیم شده و هر بخش در طول اختلاط بدون خلأ به مدت هشت دقیقه اضافه و همزده شده است. بعد از اضافه شدن بخش چهارم ماده انفجاری، مخلوط کن به مدت ۱۸ دقیقه برای جلوگیری از حضور حباب‌های هوا در نمونه مخلوط، تحت خلأ نگهداری شده است. در پایان عامل پخت (IPDI) اضافه شده و اختلاط در زمان کوتاهی انجام و سپس مخلوط در قالب لوله‌ای پلی وینیل کلرید (PVC) ریخته شده و عمل پخت این فرمولاسیون‌ها در ۶۰-۵۵°C و به مدت ۱۲ روز انجام شده است. سه فرمولاسیون PBX (۸۶٪ ماده انفجاری + ۱۴٪ بایندر) دارای بایندر مشابه GAP اما پرکننده‌های انفجاری متفاوت HMX، RDX و PETN هستند به

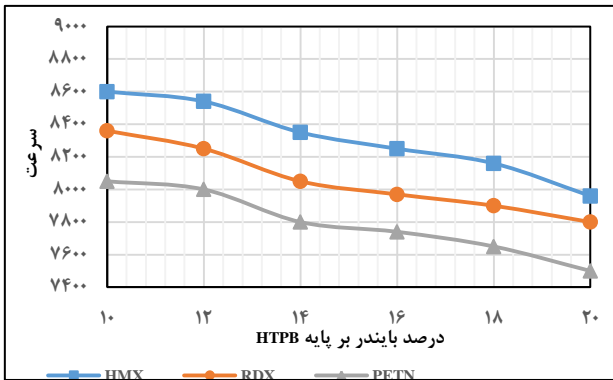
همین دلیل تحت اسامی PBXHG4، PBXRG4 و PBXPG4 نام گذاری شده‌اند [۱۵]. نمونه‌های PBX در لوله‌های PVC با قطر داخلی ۲mm و طول ۱۹۰mm آماده شده‌اند. جهت اندازه‌گیری سرعت انفجار فرمولاسیون‌ها زمان عبور موج انفجار از فاصله مشخص بین دو فیبر لیزری بر حسب (m/s) محاسبه گشته است. نتایج به‌دست آمده از آزمون حساسیت ترکیب B (۴۰٪ TNT + ۶۰٪ RDX) و فرمولاسیون‌های PBX در جدول (۳) لیست شده است. برای PBXHG4 حساسیت به فشار به میزان ۴۲/۵٪ نسبت به ترکیب B کاهش یافته است. PBXRG4 و PBXHG4 با حداکثر نیروی اصطکاک (۳۶۰ N) به نقطه آغاز نرسیده‌اند اما PBXPG4 به دلیل حساس بودن PETN به نقطه آغاز رسیده است. PBXها دمای آغازش کمتری را نسبت به ترکیب B نشان می‌دهند. در بین فرمولاسیون‌های تولید شده PBXHG4 حساسیت دمایی نزدیک‌تری به حساسیت دمایی ترکیب B دارد [۱۵]. سرعت انفجار^۵ یکی از کمیت‌های مهمی است که نشان دهنده میزان انرژی به‌دست آمده از ماده منفجره است. از نتایج به‌دست آمده دریافت می‌شود که اجزای بایندر تأثیر قابل توجهی بر سرعت انفجاری فرمولاسیون‌های PBX دارد. مقادیر سرعت انفجار (D) برای ترکیب B و فرمولاسیون‌های PBX در جدول (۵) ارائه شده‌اند. سرعت انفجار برای PBXRG4، ۶/۹٪ برای PBXPG4، ۳٪ و برای PBXHG4، ۱۱٪ در مقایسه با ترکیب B افزایش داشته است. ضربه انفجاری یکی دیگر از کمیت‌های مهم در بررسی مواد منفجره است که نشان دهنده میزان قدرت ماده منفجره در متلاشی کردن سرجنگی و ایجاد ترکش می‌باشد و با رابطه $B = F \times \rho \times D$ تعریف می‌شود. در این رابطه B ضربه انفجار [N/(m.s)]، چگالی ρ [kg/m³]، حرارت انفجار [J/kg] و D سرعت انفجار [m/s] می‌باشد. البته در این آزمایش میزان ضربه انفجاری نمونه‌ها به صورت تجربی به‌دست آمده است. میزان این کمیت برای PBXPG4، ۶/۹٪ برای PBXRG4، ۹/۲٪ و برای PBXHG4، ۲۱/۳٪ در مقایسه با ترکیب B افزایش داشته است. در جمع بندی می‌توان گفت این فرمولاسیون‌ها به خصوص PBXHG4 که ضربه انفجاری بیشتری دارد، قابل استفاده به‌عنوان بار انفجاری اصلی در سرجنگی‌های با حساسیت کم و ضربه انفجاری بالا به جای ترکیب B هستند [۱۵].

در تحقیق دیگری کریم الشراوی و هانی فودا^۶ فرمولاسیون‌هایی بر پایه مواد منفجره HMX، RDX و PETN با سامانه بایندر بر پایه HTPB و GAP تولید کرده‌اند و سپس پارامترهای انفجاری را با استفاده از کد ترموشیمیایی EXPLO5 و به‌صورت تجربی محاسبه کرده‌اند. درصد نمونه‌های استفاده شده در PBXها شامل فرمولاسیون‌های حاوی HMX، RDX و PETN با بایندر بر پایه HTPB یا GAP به همراه نام هر یک از آن‌ها در جدول (۴) ذکر شده است [۱۶].

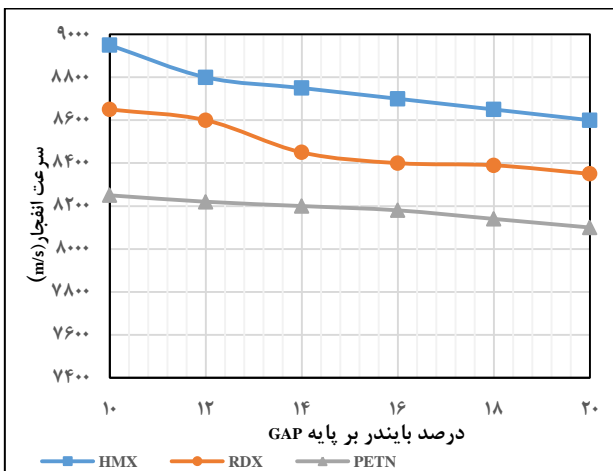
1- Karim Elsharkawy
2- Beijing
3- Isophoron Diisocyanate
4- Wall Jacket

5- Velocity of Detonation
6- Hany Fouda

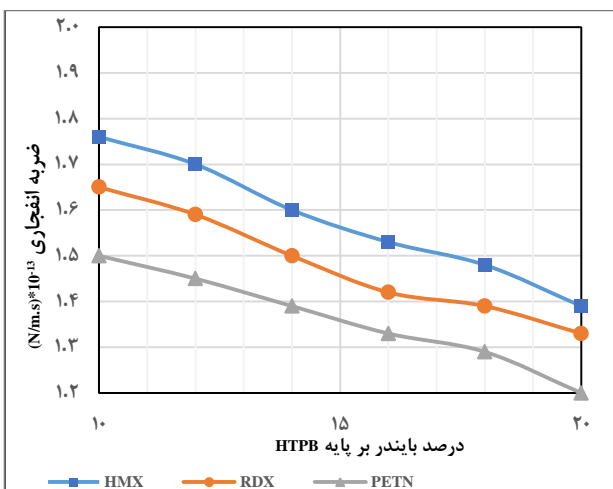
است که نشان دهنده کارایی بهتر GAP است. دلیل این مسئله، بالا بودن انرژی و چگالی پلیمر HTPB نسبت به پلیمر HTPB می‌باشد.



شکل ۶- تأثیر درصد بایندر بر پایه HTPB بر سرعت انفجار فرمولاسیون‌های PBX [۱۶].



شکل ۷- تأثیر درصد بایندر بر پایه GAP بر سرعت انفجار فرمولاسیون‌های PBX [۱۶].



شکل ۸- تأثیر درصد بایندر بر پایه HTPB بر ضربه انفجاری فرمولاسیون‌های PBX [۱۶].

بعد از تولید فرمولاسیون‌ها، الشراوی و فودا نتایجی را در مورد ویژگی انفجاری و همچنین ویژگی حساسیت فرمولاسیون‌های تولید شده به دست آورده‌اند. این نتایج در جدول‌های (۵ و ۶) ارائه شده است. با استفاده از این نتایج می‌توان تفاوت خواص انفجاری و حساسیتی فرمولاسیون‌های تولید شده بر پایه پلیمرهای پرنرزی و خنثی را مورد مقایسه قرار داد. در جدول (۵) خواص انفجاری با استفاده از کد ترموشیمیایی EXPLO5 به دست آمده است. همچنین در این جدول ضربه انفجاری با استفاده از حاصل ضرب چگالی در حرارت انفجار در سرعت انفجار محاسبه شده است.

با توجه به اطلاعات موجود در جدول (۵) مشخص می‌شود چگالی PBXRG4، ۳/۴٪ بیشتر از PBXRT4 است که نشان می‌دهد استفاده از پلیمری مانند GAP سبب افزایش چگالی فرمولاسیون مذکور نسبت به فرمولاسیون ساخته شده بر پایه HTPB شده است. در مورد سرعت انفجار نیز به همین صورت بوده و میزان این کمیت برای PBXHG4، ۴/۷٪ نسبت به PBXHT4 بیشتر بوده است، که بار دیگر نشان دهنده عملکرد بهتر پلیمر پرنرزی است.

طبق اطلاعات موجود در جدول (۶) کاهش حساسیت به ضربه و نیز کاهش حساسیت به اصطکاک در فرمولاسیون‌های PBX نسبت به ترکیب B مشاهده می‌شود. انتظار می‌رود با استفاده از پلیمر خنثی در مقایسه با پلیمر پرنرزی میزان حساسیت بیشتر کاهش یابد، اما در برخی موارد این مسئله برعکس شده و میزان کاهش حساسیت با استفاده از پلیمرهای پرنرزی بیشتر از پلیمرهای خنثی بوده است. طبق نتایج به دست آمده در سایر ویژگی‌ها مانند ضربه انفجاری نیز ترکیبات بر پایه GAP ویژگی و بهبود مناسبی نسبت به سایر فرمولاسیون‌ها و ترکیب B دارند. همچنین با استفاده از کدهای ترموشیمیایی (مانند کد ترموشیمیایی EXPLO5) نیز می‌توان با دقت نسبتاً خوبی تغییر خواصی مانند چگالی، سرعت انفجار و فشار CJ^۱ را با تغییر درصد بایندر در فرمولاسیون به دست آورد.

برای نمونه تغییرات خواص انفجاری PBX‌هایی که در تحقیق قبلی بر پایه GAP یا HTPB تولید شده است، با توجه به تغییر درصد بایندر به کار رفته در فرمولاسیون، توسط کد ترموشیمیایی EXPLO5 محاسبه و در شکل‌های (۹-۶) نشان داده شده است [۱۶].

در تحلیل این نمودارها می‌توان به موضوع کاهش سرعت انفجار و ضربه انفجاری مواد منفجره پلاستیکی با افزایش درصد بایندر در فرمولاسیون اشاره کرد. اما مسئله مهم شیب این کاهش می‌باشد که هر چقدر کمتر باشد نشان دهنده کارایی بهتر بایندر است. با توجه به نمودارها شیب کاهش چگالی، سرعت و ضربه انفجاری در نمونه‌های ساخته شده با GAP نسبت به نمونه‌های ساخته شده با HTPB کمتر

1- Chapman-Jouguet Pressure

جدول ۳- نتایج حساسیت و عملکرد ترکیب B و فرمولاسیون‌های PBX بر پایه GAP [۱۵].

نام ماده منفجره	ضربه انفجار (kP)	سرعت انفجار (m/s)	حساسیت به دما (°C)	حساسیت به اصطکاک (N)	حساسیت به ضربه (J)
ترکیب B	۱۰۵۹	۷۶۳۸	۲۳۹	۲۲۰	۱۲
PBXRG4	۱۱۵۷	۸۱۶۵	۲۳۲	>۳۶۰	۱۹/۸
PBXHG4	۱۲۸۵	۸۴۸۰	۲۳۴	>۳۶۰	۱۷/۱
PBXPG4	۱۱۳۲	۷۸۶۷	۲۲۸	۲۳۸	۱۵/۳

جدول ۴- ترکیب درصد نمونه‌های PBX [۱۶].

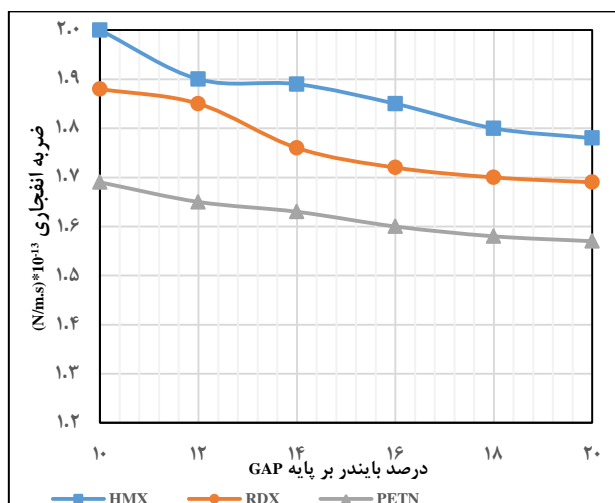
نام PBX	درصد وزنی				
	PU(HTPB)	PU(GAP)	RDX	HMX	PETN
PBXRT4	۱۴	-	۸۶	-	-
PBXHT4	۱۴	-	-	۸۶	-
PBXPT4	۱۴	-	-	-	۸۶
PBXRG4	-	۱۴	۸۶	-	-
PBXHG4	-	۱۴	-	۸۶	-
PBXPG4	-	۱۴	-	-	۸۶

جدول ۵- مشخصات انفجاری نمونه‌های PBX بر پایه HTPB و GAP [۱۶].

ماده منفجره	ویژگی‌ها		
	F[kj/kg]	B[N/m.s]*10 ⁻¹³	D[m/s]
RDX	۱۲۶۲	۲/۰۴	۸۹۱۳
HMX	۱۲۳۷	۲/۱۷	۹۱۰۰
PETN	۱۲۲۵	۱/۸۳	۸۴۸۷
PBXRT4	۱۰۹۸	۱/۴۹	۸۰۵۳
PBXHT4	۱۰۶۱	۱/۵۹	۸۳۳۳
PBXPT4	۱۰۷۲	۱/۳۸	۷۸۰۷
PBXRG4	۱۱۹۶	۱/۷۶	۸۴۶۲
PBXHG4	۱۱۷۵	۱/۸۷	۸۷۴۶
PBXPG4	۱۱۶۶	۱/۶۳	۸۱۹۲

جدول ۶- نتایج حساسیت ترکیب B و فرمولاسیون‌های PBX بر پایه HTPB و GAP [۱۶].

ماده منفجره	اصطکاک (N)	ضربه (J)	حساسیت به دما (°C)
Comp-B	۲۲۰	۱۲	۲۳۹
PBXRT4	>۳۶۰	۲۲	۲۳۰
PBXHT4	>۳۶۰	۱۹/۱	۲۵۳
PBXPT4	۲۵۶	۱۷/۷	۲۴۳
PBXRG4	>۳۶۰	۱۹/۸	۲۳۲
PBXHG4	>۳۶۰	۱۷/۱	۲۳۴
PBXPG4	۲۳۸	۱۵/۳	۲۲۸



شکل ۹- تأثیر درصد بایندر بر پایه GAP بر ضربه انفجاری فرمولاسیون‌های PBX [۱۶].

در تحقیق دیگری زیبقنیف چیلک^۱ و روبرت ژورکیفیز^۲ چند ترکیب بر مبنای مواد منفجره ۱،۱-دی آمینو ۲،۲-دینیترو اتن^۳ (FOX7) و سیکلو تترامیلین تترانیترا مین (HMX) با استفاده از چند پلیمر از جمله پلیمر پرانرژی پلی (NIMMO) ساخته‌اند. نسبت جرمی FOX7/HMX ثابت و برابر ۷۰/۳۰ بوده است. در این تحقیق ویژگی‌های حساسیت مشخص شده و علاوه بر آن سرعت انفجار به صورت تجربی تنها برای نمونه FOX_{sc}/HMX_{sc}+Poly(NIMMO)/Silicone محاسبه شده که میزان آن 6960 ± 70 m/s در چگالی $1/55$ g/cm³ بوده است. جدول (۹) شامل درصد ترکیب نمونه‌ها، مقدار تئوری سرعت انفجار (VOD) و فشار CJ (P_{CJ}) است که با استفاده از کد ترموشیمیایی چیتا^۴ محاسبه شده است. اضافه کردن پلی (NIMMO) به عنوان پلیمر پرانرژی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد ماده منفجره پلاستیکی دارد. با این وجود، ترکیبات MV FOX_{sc}/HMX_{sc}+Poly(NIMMO)/Silicone چگالی کمی دارند که این عامل باعث کاهش سرعت انفجار آن‌ها شده است. در جدول (۷) نتایج به دست آمده ارائه شده است [۱۷].

1- Zbigniew Chylek
2- Robert Jurkiewicz
3- 1,1-Diamino-2,2-dinitroethene
4- Cheetah

پلیمرهای خنثی است. افزایش مقدار این ماده در ترکیب، سبب کاهش پایداری آن شده اما بهبودهایی در پارامترهای انفجاری ترکیب مانند سرعت انفجار ایجاد می‌کند.

همان‌طور که بیان شد اضافه کردن روغن سیلیکون و استفاده از مواد انفجاری مانند FOX7 و HMX در دستیابی به ترکیباتی با ویژگی‌های فیزیکی و پایداری مناسب مهم است. PolyNIMMO به‌عنوان نوعی ترکیب با گروه‌های نیترات استر، از نظر دمایی حساس‌تر نسبت به

جدول ۷- ترکیب درصد و مشخصات حساسیتی و انفجاری ترکیبات FOX/HMX+Poly(NIMMO) [۱۷].

ردیف	نام ترکیب	درصد پلیمر (٪وزنی)	چگالی (g/cm ³)	سرعت انفجار (m/s)	فشار CJ (GPa)	حساسیت به ضربه (J)	حساسیت به اصطکاک (N)
۱	FOX _{sc} /HMX _{sc} +Poly(NIMMO)	۲۴/۸	۱/۵۶	۷۵۸۵	۲۲/۲	۱۴	>۳۶۰
۲	FOX _{sc} /HMX _{sc} +Poly(NIMMO)/PIB(1:1)	۲۳/۱	۱/۵۳	-	-	۲۰	
۳	FOX _{sc} /HMX _{sc} +Poly(NIMMO)/Silicone HV(1:1)	۲۷	۱/۵۴	-	-	۲۱/۵	
۴	FOX _{sc} /HMX _{sc} +Poly(NIMMO)/Silicone MV(1:1)	۲۸/۶	۱/۵۵	۶۸۳۰	۱۹/۵	۲۰/۵	

توجه به تحقیقات انجام شده تا به حال از نرم‌کننده‌های پُرانرژی TMETN^۶، TEGDN^۷، BTTN و BuNENA در ساخت مواد منفجره پلاستیکی و پیشرانها استفاده شده است [۲۲-۲۰]. برای مثال در گزارشی از پلیمر پُرانرژی GAP به همراه نرم‌کننده‌های پُرانرژی TMETN و TEGDN و ماده HMX استفاده شده است.

در این پتنت با نام "ماده منفجره با بایندر پُرانرژی" می‌آید. چنان^۸ و همکارانش به بررسی PBXهای قابل پخت بر پایه GAP و حاوی نرم‌کننده‌های پُرانرژی TMETN و TEGDN و ماده منفجره HMX یا RDX پرداخته‌اند. ویژگی‌های مکانیکی، عدم حساسیت و طول عمر بهتری برای این ترکیب در مقایسه با ترکیب‌های گذشته به دست آمده است [۲۳]. با توجه به نتایج ارائه شده در این پتنت، فرمولاسیون تولید شده چگالی بالایی داشته و ویژگی‌های مکانیکی و طول عمر خوبی نیز دارد. درصد ترکیب اجزای به کار رفته در این فرمولاسیون به صورت جدول (۹) است.

جدول ۹- ترکیب درصد فرمولاسیون METN+TEGDN+HMX+GAP [۲۳].

درصد وزنی	جز به کار رفته
۶۰±۱۰	HMX کلاس A یا (RDX)
۲۰±۵	HMX کلاس E یا (RDX)
۸۰±۲	مجموع بار جامد
۸±۱	GAP
۱±۰/۵	IPDI یا HMDI یا N-100
۸/۰۵±۱	TMETN
۲±۰/۵	(BDNPF/A یا) TEGDN
۰/۳±۰/۵	MNA و 2-NDPA
۰/۱±۰/۲	TPB یا اکتانویک اسید

علاوه بر موارد ذکر شده محققین در مورد چندین سامانه بایندر تحقیق کرده و گزارش داده‌اند که GAP در ترکیب با تری‌اتیلن گلیکول دینیترات (TEGDN) نرخ سوختن و انرژی بالاتری نسبت به بایندهای بر پایه HTPB^۱، CTPB^۱، PMA^۲، PGA^۳ و PDMS^۴ دارند. همچنین بایندر GAP/TEGDN در مقایسه با دیگر سامانه‌های بایندر دارای دمای تجزیه کمتری است [۱۸].

در پتنتی با عنوان "ترکیبات انفجاری فشرده با عملکرد بالا" آقای پُل سی. بریثویت^۵ و همکارانش به صورت تئوری به بررسی شاخص‌های انفجاری و چگالی ترکیب‌های تئوری بر پایه پلیمر پُرانرژی PGN پرداخته‌اند. محاسبات رایانه‌ای خواص انفجاری (فشار CJ و سرعت انفجار) PBXهای حاوی HMX و بر پایه PGN، در جدول (۸) خلاصه شده است [۱۹].

جدول ۸- عملکرد انفجاری فرمولاسیون‌های HMX+PGN [۱۹].

سرعت انفجار (m/s)	فشار CJ (GPa)	چگالی (g/cm ³)	ترکیب
۸۸۴۱	۳۷/۱۹	۱/۸۴	PGN ^۱ /۱۰/HMX ^۲ /۹۰
۸۹۴۲	۳۸/۴۰	۱/۸۷	PGN ^۱ /۵/HMX ^۲ /۹۵

همان‌طوری که این محاسبات مشخص می‌کند، پیشرفت خواص آشکاری با استفاده از PGN در مواد منفجره پلاستیکی به دست می‌آید. این عملکرد بالا نتیجه موازنه اکسیژن خوب PGN، گرمای تشکیل مناسب و چگالی بالای آن است.

علاوه بر مواردی که در مثال‌های قبل ذکر شد گاهی از نرم‌کننده‌های پُرانرژی نیز در ساخت مواد منفجره پلاستیکی استفاده می‌شود. با

- 1- Carboxyl Terminated Polybutadiene
- 2- Poly Methyl Acrylate
- 3- Poly Glycolic Acid
- 4- Polydimethylsiloxane
- 5- Paul C. Braithwaite

6- Trimethylol Ethane Trinitrate
7- Triethylene Glycol Dinitrate
8- May L. Chan

ترکیب مواد با یکدیگر است، در صورتی که دمای تجزیه ترکیب پایین‌تر از دمای تجزیه ماده باشد و همچنین اختلاف این دما هر چقدر زیادتر باشد نشان دهنده عدم سازگاری و خطرناک بودن ترکیب مواد با یکدیگر است زیرا احتمال تجزیه ترکیب در دمای پایین‌تر وجود دارد [۲۴].

در تحقیقی آقای لنین کوان لیاو^۲ و همکارانش سازگاری پلی (NIMMO) با مواد پرانرژی RDX، HMX، NG^۳، NC^۴ و همچنین Al را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای تهیه نمونه‌های آزمون DSC، ابتدا ۲g از ماده منفجره را در ۱۰ml حلال استون^۵ و اتیل استات^۶ با نسبت حجمی ۱:۲ حل کرده‌اند، سپس ۴g پلی (NIMMO) را در ۲۰ml حلال مشابه حل نموده‌اند. در نهایت محلول‌های به‌دست آمده از پلی (NIMMO) و ماده منفجره را با نسبت حجمی برابر ۱:۱ ترکیب کرده‌اند و با تبخیر شدن حلال ترکیب‌هایی با ۵۰٪ پلی (NIMMO) به علاوه ۵۰٪ ماده منفجره به‌دست آورده‌اند [۲۵]. از نمونه‌های ۲mg و از نرخ حرارت $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ در دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی استفاده شده است. در شکل‌های (۱۳-۱۰) نمودارهای DSC پلی (NIMMO)، برخی مواد منفجره رایج و ترکیب آن‌ها با هم نشان داده شده است.

برای تعیین بهتر سازگاری مواد منفجره با یکدیگر محققین اقدام به تهیه استاندارد کرده‌اند که در جدول (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد اختلاف بین بزرگ‌ترین پیک گرمادهی پلی (NIMMO) با ترکیب آن معیاری جهت سنجش سازگاری آن‌ها با هم است. برای مثال بزرگ‌ترین پیک گرمادهی پلی (NIMMO) در دمای $218/2^{\circ}\text{C}$ بوده و بزرگ‌ترین پیک گرمادهی ترکیب پلی (NIMMO) با HMX در $218/1^{\circ}\text{C}$ بوده است، اختلاف این دو پیک $0/1^{\circ}\text{C}$ بوده و به صفر بسیار نزدیک است که در نهایت طبق جدول (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت پلی (NIMMO) با HMX سازگاری خوبی دارد. لازم به ذکر است برای محاسبه ΔT_p در این جدول، دمای تجزیه ماده اولیه (T_{p1}) و دمای تجزیه ترکیب (T_{p2}) در نظر گرفته می‌شود.

اختلاف بین بزرگ‌ترین پیک گرمادهی یا دمای تجزیه پلی (NIMMO) با بزرگ‌ترین پیک گرمادهی یا دمای تجزیه ترکیب پلی (NIMMO) با RDX طبق شکل (۱۰) برابر $10/3^{\circ}\text{C}$ است که طبق جدول (۱۱) مشخص می‌شود پلی (NIMMO) با RDX سازگاری مناسبی دارد.

پژوهش‌های دیگری نیز توسط محققین در مورد سازگاری پلیمر پرانرژی GAP با مواد منفجره رایج و همچنین سازگاری

برای تولید این ماده منفجره پلاستیکی ابتدا پلیمر GAP، نرم کننده‌های TMETN و TEGDN به کاسه اختلاط مخلوط کن با تیغه همزن عمودی اضافه شده‌اند. سپس ماده منفجره HMX یا RDX به آرامی با ذرات درشت (کلاس A) و ذرات ریز (کلاس E) به‌صورت متوالی به مخلوط کن افزوده و پایدار کننده MNA و 2-NDPA در مرحله بعد اضافه شده‌اند. همه اختلاط‌ها در دمای $(60 \pm 2/8)^{\circ}\text{C}$ و با شرایط خلأ کمتر از 5mm Hg انجام شده است. عامل پخت N-100 بعد از اضافه شدن تمام مواد جامد و کاتالیست‌های TPB و اسید اکتانویک در مرحله آخر به ترکیب اضافه گشته‌اند. اختلاط برای ۳۰ دقیقه دیگر ادامه یافته و ماده منفجره تحت خلأ قالب گیری شده است. برای آماده سازی، نمونه‌ها سه تا پنج روز در آن پخت و در دمای $(48/89 \pm 5/55)^{\circ}\text{C}$ قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های مکانیکی و انفجاری ماده منفجره تولید شده به‌صورت جدول (۱۰) است [۲۳].

جدول ۱۰- ویژگی‌های مکانیکی و انفجاری فرمولاسیون [۲۳] TMETN+TEGDN+HMX+GAP

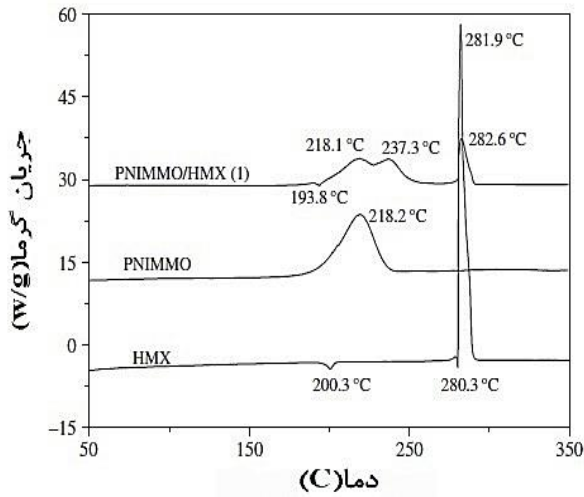
ویژگی	اندازه
حساسیت به ضربه (وزنه ۲/۵ kg)	۱۷-۱۹ cm
چگالی	$1/74\text{ g/cm}^3$
سرعت انفجار	۸۳۶۰ m/s
دمای گذر شیشه‌ای (Tg)	-55°C
فشار انفجار	۳۰/۹ GPa

۴- بررسی سازگاری پلیمرهای پرانرژی با برخی مواد منفجره رایج جهت استفاده در ساخت PBX

در اینجا به‌صورت خلاصه به بررسی سازگاری پلیمرهای GAP، PGN و پلی (NIMMO) با سایر مواد پرانرژی پرداخته می‌شود. برای بررسی سازگاری مواد پرانرژی با یکدیگر روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها بررسی نمودار گرماسنجی روبشی تفاضلی یا DSC^۱ این مواد است. نمودار DSC (جریان گرما-دما) هر ماده یا ترکیب دارای پیک‌های گرمادهی یا گرماگیری است. جهت بررسی سازگاری بین ماده با ترکیب آن اختلاف دمای بین بزرگ‌ترین پیک گرمادهی ماده با بزرگ‌ترین پیک گرمادهی ترکیب را در نظر می‌گیرند. هر چه این اختلاف به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده سازگاری بیشتر ماده با ترکیب است زیرا این دماهای بیشینه پیک نشان دهنده دمای تجزیه ماده اولیه و دمای تجزیه ترکیب می‌باشد. اگر دمای تجزیه ترکیب بالاتر از دمای تجزیه ماده باشد نشان دهنده سازگاری و بی‌خطر بودن

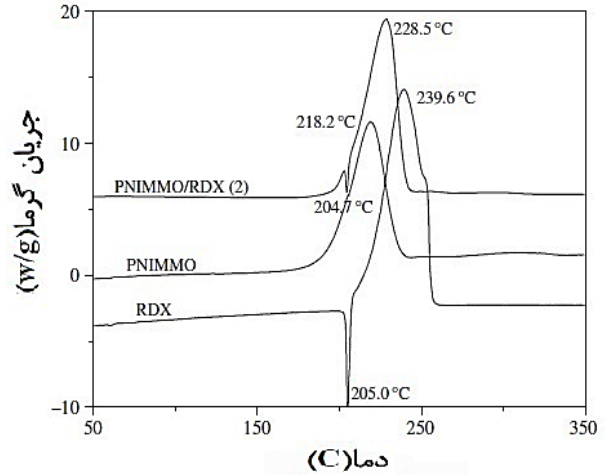
2- Lin-Quan Liao
3- Nitroglycerin
4- Nitrocellulose
5- Acetone
6- Ethyl Acetate

1- Differential Scanning Calorimetry

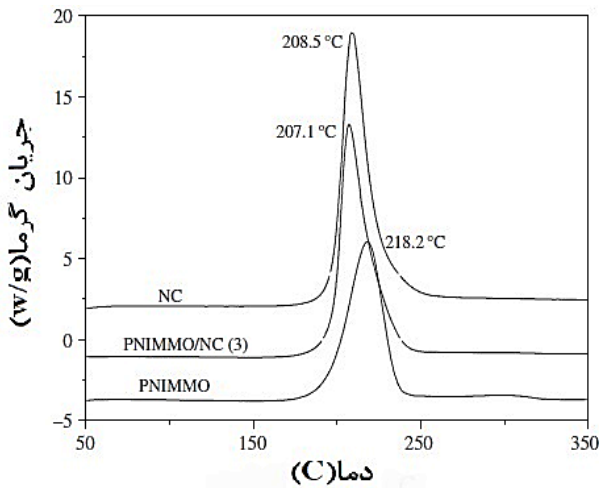


شکل ۱۲- نمودار DSC پلی (NIMMO)، HMX و پلی (NIMMO)+HMX [۲۵].

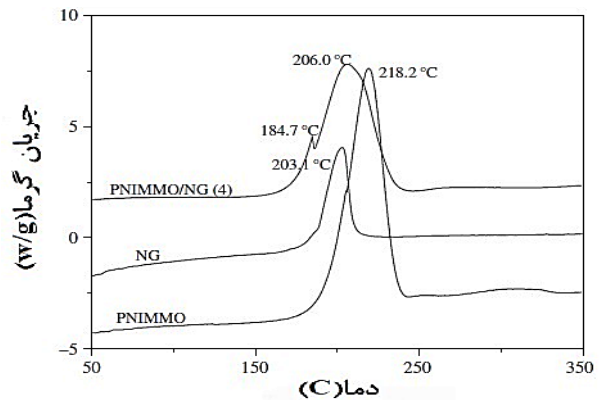
پلی (NIMMO) و PGN با نرم کننده‌های پرائرزی^۱ BDNPA،^۲ BTN، BuNENA و DEGDN انجام شده است. در جدول (۱۲) دمای بزرگ‌ترین پیک گرمادهی یا دمای تجزیه پلیمرها و ترکیب آن‌ها با مواد دیگر و میزان سازگاری آن‌ها بیان شده است.



شکل ۱۰- نمودار DSC پلی (NIMMO)، RDX و پلی (NIMMO)+RDX [۲۵].



شکل ۱۳- نمودار DSC پلی (NIMMO)، NC و پلی (NIMMO)+NC [۲۵].



شکل ۱۱- نمودار DSC پلی (NIMMO)، NG و پلی (NIMMO)+NG [۲۵].

جدول ۱۱- استانداردهای سازگاری مواد پرائرزی در ترکیب با مواد دیگر [۲۴-۲۹].

نکات مورد توجه	طبقه‌بندی	$\Delta T_p / ^\circ C^*$
ترکیب این مواد جهت ساخت فرمولاسیون منفجره بدون خطر است	سازگاری مناسب ترکیب مواد	A کوچک‌تر یا برابر ۲
بدون خطر بودن استفاده از مواد در کوتاه مدت، استفاده دراز مدت از مواد در فرمولاسیون مناسب نیست	سازگاری متوسط یا حساسیت ضعیف ترکیب مواد	B ۳-۵
جهت استفاده در فرمولاسیون منفجره توصیه نمی‌شود	سازگاری ضعیف یا حساس بودن ترکیب مواد	C ۶-۱۵
خطر، تحت هیچ شرایطی از این مواد با هم استفاده نشود	عدم سازگاری یا خطرناک بودن ترکیب مواد	D >۱۵

* ΔT_p اختلاف دمای بین بزرگ‌ترین پیک گرمادهی ماده با بزرگ‌ترین پیک گرمادهی ترکیب $(T_{p1} - T_{p2})$ است.

1- Bis (2,2-dinitropropyl)Acetal
2- Butanetriol Trinitrate

جدول ۱۲- دمای تجزیه پلیمرها و ترکیب آن‌ها با مواد دیگر در نمودار DSC.

مرجع	وضعیت سازگاری	دما			نرخ گرمادهی (°C/min)	نام مواد	
		$\Delta T_p / ^\circ C$	$T_{p2} / ^\circ C$	$T_{p1} / ^\circ C$		ترکیب	ماده اولیه
[۲۷]	سازگاری متوسط	۴/۹	۲۲۵/۳	۲۳۰/۲	۲	HMX/GAP	GAP
		۴/۱	۲۳۹/۴	۲۴۳/۵	۵		
	سازگاری بسیار ضعیف یا عدم سازگاری	۲۹/۹	۲۰۰/۳	۲۳۰/۲	۲	RDX/GAP	GAP
		۸/۹	۲۳۴/۶	۲۴۳/۵	۵		
	سازگاری ضعیف	۶	۲۲۴/۲	۲۳۰/۲	۱	CL-20/GAP	GAP
[۲۵]	سازگاری ضعیف	۱۱/۱	۲۰۷/۱	۲۱۸/۲	۱۰	NC/PNIMMO	PNIMMO
	سازگاری ضعیف	۱۲/۲	۲۰۶	۲۱۸/۲	۱۰	NG/PNIMMO	PNIMMO
	سازگاری مناسب	-۰/۳	۲۱۸/۵	۲۱۸/۲	۱۰	Al/PNIMMO	PNIMMO
[۲۴]	سازگاری مناسب	۱/۸	۲۱۲/۲	۲۱۴	۱۰	PGN/BDNPA	PGN
	سازگاری مناسب	۰/۷	۲۱۳/۳	۲۱۴	۱۰	PGN/BTTN	PGN
	سازگاری مناسب	۱/۳	۲۱۲/۷	۲۱۴	۱۰	PGN/BuNENA	PGN
	سازگاری مناسب	-۱/۲	۲۱۵/۲	۲۱۴	۱۰	PGN/DEGDN	PGN
[۲۶]	سازگاری مناسب	۰/۹	۲۱۵/۵	۲۱۶/۵	۱۰	PNIMMO/BDNPA	PNIMMO
	سازگاری مناسب	۰/۱	۲۱۶/۳	۲۱۶/۵	۱۰	PNIMMO/BuNENA	PNIMMO
	سازگاری مناسب	-۰/۷	۲۱۷/۱	۲۱۶/۵	۱۰	PNIMMO/DEGDN	PNIMMO
	سازگاری مناسب	۱/۹	۲۱۴/۶	۲۱۶/۵	۱۰	PNIMMO/BTTN	PNIMMO

۵- نتیجه‌گیری

فرمولاسیون‌های ساخته شده بر پایه PolyNIMMO و حاوی FOX7 و HMX نسبت به فرمولاسیون‌های ساخته شده بر پایه GAP حساسیت کمتری دارند.

ترکیبات PBX ساخته شده بر پایه PolyNIMMO (با چگالی ۱/۲۶g/cm³) به دلیل چگالی پایین این پلیمر، چگالی و در نتیجه سرعت انفجار کمتری دارند.

با توجه به تحقیقات انجام شده پلیمری مانند پلی (NIMMO) با HMX سازگاری مناسبی دارد، GAP نیز سازگاری متوسطی با HMX دارد و می‌تواند در ساخت مواد منفجره پلاستیکی با عمر کوتاه همراه با HMX استفاده شود.

PGN و پلی (NIMMO) با نرم کننده‌های پرانرژی سازگاری مناسبی دارند. PGN و پلی (NIMMO) از میان نرم کننده‌های پرانرژی با BuNENA و DEGDN سازگاری بیشتری دارند و می‌توانند در ساخت مواد منفجره پلاستیکی با عمر بلند همراه با آن‌ها استفاده شوند.

GAP با مواد منفجره RDX و CL-20 سازگاری ضعیفی دارد، لذا استفاده از GAP همراه با این مواد در ساخت مواد منفجره پلاستیکی خطرناک بوده و توصیه نمی‌شود.

با بررسی تحقیقات انجام شده توسط محققین، مشخص شد از پلیمرهای پرانرژی PNC، PGN، پلی (NIMMO) و GAP در ساخت مواد منفجره پلاستیکی استفاده شده است. همچنین با بررسی داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده و همچنین کدهای رایانه‌ای (مانند EXPLO5) استفاده شده توسط محققین، مشخص شد فرمولاسیون‌های ساخته شده بر پایه GAP خواص انفجاری بهتری دارند.

در میان پلیمرهای پرانرژی PGN با چگالی ۱/۴۲g/cm³ بیشترین چگالی را دارد، همچنین در میان این مواد PolyNIMMO با دمای آغازش ۱۷۰°C کمترین حساسیت به دما و همچنین کمترین حساسیت به ضربه و اصطکاک را داراست.

تمام PBX‌های ساخته شده بر پایه GAP و حاوی HMX یا RDX یا PETN نسبت به فرمولاسیون رایج ترکیب B (RDX/TNT ۴۰/۶۰٪) میزان سرعت انفجار، فشار انفجار و ضربه انفجاری بیشتری دارند. فرمولاسیون‌های PBX ساخته شده بر پایه GAP و حاوی HMX نسبت به فرمولاسیون‌های ساخته شده بر پایه GAP و حاوی RDX، ۳٪ و نسبت به فرمولاسیون‌های ساخته شده بر پایه GAP و حاوی PETN، ۶٪ سرعت انفجار بیشتری دارد.

مراجع

- [1] Antić, G.; Džingalašević, V. "Characteristics of Cast PBX with Aluminum"; Scientific Technical Review, 2006, 56, 52-58.
- [2] Agrawal, J. P. "High Energy Materials: Propellants, Explosives And Pyrotechnics"; John Wiley & Sons, Weinheim, 2010.

- [3] Hartdegen, V. "Energetic Polymers and Plasticizers Based on Organic Azides, Nitro Groups and Tetrazoles"; Ph.D. Thesis, Ludwig Maximilians University, München, 2016.
- [4] Provas, A. "Energetic Polymers and Plasticisers for Explosive Formulations-A Review Of Recent Advances"; DSTO-TR-0966.
- [5] Zukas, J. A.; Walters, W. P. "Explosive Effects and Applications"; Springer, New York, 1998.
- [6] Akhavan, J. "The Chemistry of Explosives"; Royal Society of Chemistry, 2011.
- [7] Badgular, D. M.; Talawar, M. B.; Zarco, V. E.; Mahulikar, P. P. "New Directions in the Area of Modern Energetic Polymers: An Overview"; *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, 53, 371-387.
- [8] Provas, A. "Formulation and Performance Studies of Polymer Bonded Explosives (PBX) Containing Energetic Binder Systems. Part 1"; DSTO-TR-1397.
- [9] Carleone, J. "Tactical Missile Warheads"; American Institute of Aeronautics & Astronautics; Washington, DC, 1993.
- [10] Samudre, S. S.; Nair, U. R.; Gore, G. M.; Sinha, R. K.; Sikder, A. K. "Studies on an Improved Plastic Bonded Explosive (PBX) for Shaped Charges"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 2009, 34, 145-150.
- [11] Agrawal, J. P. "Some New High Energy Materials and their Formulations for Specialized Applications"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 2005, 30, 316-328.
- [12] Cumming, A. S. "Results from Research Collaboration-A Review over 20 Years"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 2009, 34, 187-193.
- [13] Paraskos, A. J. "Energetic Polymers: Synthesis and Applications, in *Energetic Materials*"; Springer, 2017.
- [14] Meeker, D. H.; Green, B. J. "Concealed Amalgamated Explosive Neutralizer and Method of Manufacture"; US 9714199 B2.
- [15] Elsharkawy, K.; Guo, L.; Fouda, H. "Experimental Studies on Improved Plastic Bonded Explosives Materials (PBXs) for Controlled Fragmentation Warheads"; *MATEC Web of Conf.* 2017, 1-6.
- [16] Elsharkawy, K.; Fouda, H. "Synthesis and Characterization of Advanced PBXs Materials Based on GAP and HTPB"; *Adv. Mater. Prod.* 2016, 1, 41-48.
- [17] Chylek, Z.; Jurkiewicz, R. "Investigation of the Properties of Polymer Bonded Explosives Based on 1, 1-Diamino-2, 2-dinitroethene (FOX-7) and 1, 3, 5, 7-Tetranitro-1, 3, 5, 7-tetraazacyclooctane (HMX)"; *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* 2016, 13, 859-870.
- [18] Nazare, A. N.; Asthana, S. N.; Singh, H. "Glycidyl Azide Polymer (GAP)-an Energetic Component of Advanced Solid Rocket Propellants-A Review"; *J. Energ. Mater.* 1992, 10, 43-63.
- [19] Braithwaite, P. C.; Lund, G. K.; Wardle, R. B. "High Performance Pressable Explosive Compositions"; US 5587553.
- [20] Landsem, E.; Jensen, T. L.; Hansen, F. K.; Unneberg, E.; Kristensen, T. E. "Neutral Polymeric Bonding Agents (NPBA) and Their Use in Smokeless Composite Rocket Propellants Based on HMX-GAP-BuNENA"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 2012, 37, 581-591.
- [21] Talawar, M. B.; Sivabalan, R.; Anniyappan, M.; Gore, G. M.; Asthana, S. N.; Gndhe, B. R. "Emerging Trends in Advanced High Energy Materials"; *Combust. Explos. Shock Waves*, 2007, 43, 62-72.
- [22] Lusby, C. A.; Ferguson, D. C.; Husband, D. M. "Friction and Impact Sensitivity Of Formulations Containing Glycidyl Azide Polymer"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 1995, 20, 27-31.
- [23] Chan, M. L.; Roy, E. M.; Turner, A. "Energetic Binder Explosive"; US 5316600.
- [24] Shee, S. K.; Reddy, S. T.; Athar, J.; Sikder, A. K.; Talawar, M. B.; Banerjee, S.; Khan, M. A. S. "Probing the Compatibility of Energetic Binder Poly-Glycidyl Nitrate with Energetic Plasticizers: Thermal, Rheological and DFT Studies"; *RSC Advances*, 2015, 5, 101297-101308.
- [25] Liao, L. Q.; Wei, H. J.; Li, J. Z.; Fan, X. Z.; Zheng, Y.; Ji, Y. P.; Fu, X. L.; Zhang, Y. J.; Liu, F. L. "Compatibility of PNIMMO with some Energetic Materials"; *J. Therm. Anal. Calorim.* 2011, 109, 1571-1576.
- [26] Shee, S. K.; Shah, P. N.; Athar, J.; Dey, A.; Soman, R. R.; Sikder, A. K.; Pawar, S.; Banjee, S. "Understanding the Compatibility of the Energetic Binder PolyNIMMO with Energetic Plasticizers: Experimental and DFT Studies"; *Propellants. Explos. Pyrotech.* 2017, 42, 167-174.
- [27] Hussein, A. K.; Zeman, S.; Elbeih, A.; "Thermo-analytical Study of Glycidyl Azide Polymer and its Effect on Different Cyclic Nitramines"; *Thermochimica Acta.* 2018, 660, 110-123.
- [28] Li, B.; Niu, H.; Zhang, J.; Li, G.; Luo, Y.; Zheng, J.; "Probing the Compatibility and Interaction of Energetic Binders Based on 3, 3-bis (azidomethyl) Oxetane with Some Explosives"; *J. Sci.* 2018, 67, 132-140.
- [29] Li, H.; Yang, Y.; Pan, J.; Wang, W.; Pan, R.; Zhu, W. "Synthesis, Characterization and Compatibility Studies of Poly (DFAMO/NIMMO) with Propellant and PBX Ingredients"; *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* 2018, 15, 85-99.