# بررسی نقش مواد منفجره‌ی پلیمری (PBXs) در توسعه‌ی مواد منفجره‌ی غیر حسّاس روی شناورها

**ابوذر روئین‌تن**

استادیار و عضو هیئت‌علمی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین(علیه‌السلام)، abroeintan@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۷)

**چکیده:**

حوادث متعددی که در زمان انبارداری، حمل‌ونقل و استفاده از مواد منفجره و مهمات به وقوع پیوسته‌اند، نیاز به داشتن مواد منفجره و مهمات غیر حسّاس را الزامی کرده است. توسعه‌ی مواد پُرانرژیِ ایمن جهت تولید مهمات غیر حسّاس به‌منظور افزایش ایمنی، حفظ یا ارتقای عملکرد از تحقیقات مهم در زمینه‌ی مهندسی مواد منفجره است. یکی از روش‌های دست‌یابی به مواد منفجره‌ی غیر حسّاس، استفاده از مواد منفجره‌ی پلیمری به جای خرج‌های فعلی می‌باشد. خواص منحصر به فرد مواد منفجره‌ی پلیمری از جمله استحکام مکانیکی، خواص انفجاری، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، حسّاسیت کم به شوک و ضربه، عمر انبارداری بالا و ایمنی در حمل‌ونقل به‌ویژه در تجهیزات موجود روی شناورها منجر به توسعه این مواد شده است. در این مقاله، ضمن بررسی روش‌های دست‌یابی به مواد منفجره‌ی غیر حسّاس و پاسخ آنها به انواع خطرهای احتمالی، به نقش مواد منفجره‌ی پلیمری در کاهش حسّاسیت مواد منفجره و پاسخ برخی از انواع این نوع مهمات در آزمون‌های مهمات غیر حسّاس پرداخته می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:**

مواد منفجره‌ی پلیمری، مهمات غیر حسّاس، شناور، استحکام مکانیکی.

# Investigating the Role of Polymer Bonded Explosive in the Development of Insensitive Explosive Materials on Crafts

**Abouzar Roeintan**

Assistant professor of Imam Hossein University, abroeintan@gmail.com

(Submitted: 2017/Aug/5; Accepted: 2017/Aug/18)

**Abstract**

Multiple incidents, That took Place during The Storage, Transportation and use of explosive and ammunition, have required The having of explosives and insensitive ammunition. The development of safe energetic Materials is The major research in The field of explosive engineering for production of insensitive ammunition to increase safety, maintain or enhance performance one way to access to insensitive explosive. Materials are to use of Polymer bonded explosive instead of current expenditures. The unique Properties of The Polymer bonded explosive including Mechanical Strength, explosive Properties, high Thermal and chemical Stability, low Sensitivity to shock and hit, high storage life and safety in Transportation especially in available equipment on Craft, That led to the development of these Materials. In this paper, while in investigation of accessing methods for insensitive Materials and their response to possible risks, the role of Polymer bonded explosive in reducing the Sensitivity of explosive materials and the response of some types of this ammunition in insensitive ammunition tests also one discussed.

**KEYWORDS**

Polymer bonded explosive, insensitive ammunition, Craft, Mechanical Strength.

## ۱- مقدمه

اغلب، عواقب احتمالی ناشی از حوادث مهمات بسیار شدید است. در سال‌های اخیر، حوادث بسیاری نظیر از دست دادن جان بسیاری از انسان‌ها و خسارات به زیرسیستم‌های مربوطه به خصوص در طی تولید، انبارداری، انتقال و در حین استفاده از مهمات مختلف به ثبت رسیده است. یکی از حوادث معروف مرتبط با استفاده از سیستم‌های مهمات متداول، آتش‌سوزی در روی ناو هواپیمابر فورستال آمریکا می‌باشد (شکل ۱). در این حادثه که در سال ۱۹۶۷ میلادی اتفاق اُفتاد، بسیاری از بمب‌های هواپیماهای موجود در روی ناو منفجر شدند و موجب از بین رفتن ۶۴ هواپیما، کشته شدن ۱۳۴ نفر و نیز مجروح شدن ۱۶۱ نفر از پرسنل شد[۱]. صنایع مهمات‌سازی به خصوص در کشورهای صاحب تکنولوژی تسلیحاتی، تلاش‌های بسیاری را بر روی کاهش حسّاسیت مهمات خصوصاً در حوزه‌ی دریا، به دلیل رطوبت بسیار بالا متمرکز کرده‌اند. حاصل این تلاش‌ها به ایجاد مواد پُرانرژی با حسّاسیت پایین و مخاطرات زیست‌محیطی کمتر منجر شده است. به‌علاوه، بررسی پاسخ مهمات به محرک‌های حرارتی و مکانیکی خاص به منظور تعیین میزان حسّاسیت آنها از جمله موارد مهم در توسعه مهمات جدید می‌باشد. بنابراین، انجام آزمون‌هایی برای سنجش میزان حسّاسیت مهمات از اهمیت خاصی برخوردار است. این آزمون‌ها شامل آزمون‌های حرارت‌دهی (سریع و آهسته)، اصابت ترکش، اصابت گلوله، اصابت خرج شکل‌یافته و انفجار القایی می‌باشند. آزمایش‌های گسترده در سطح نیروی دریایی آمریکا حاکی از این موضوع است که مواد منفجره با پایه TNT زمانی که در معرض حرارت‌دهی یا انفجار القایی قرار می‌گیرند، احتمال وقوع واکنش‌های انفجاری در آنها افزایش می‌یابد. از این رو، استفاده از مواد منفجره پلیمری بر پایه‌ی یک بایندر پلیمری راه‌حل مناسبی برای کاهش خطرات احتمالی در محیط‌هایی با رطوبت بالا است. مواد منفجره کریستالی به خاطر ماهیت ترد و شکنندگی اجزای آن خواص مکانیکی خوبی نداشته، به طوری که این مواد اغلب مستعد شکنندگی و تُردی می‌باشند. این عوامل بر خواص بالستیکی و حسّاسیت آنها بسیار تأثیرگذار است. یکی از راه‌های افزایش خواص مکانیکی، وارد کردن یک بایندر پلاستیکی در این فرمولاسیون است. بایندر شامل یک ترکیب پیش پلیمر مایع، با قابلیت انجام واکنش شیمیایی با یک ترکیب شبکه‌ای‌ساز است که پایداری ابعادی محصولات واکنش را تأمین می‌نماید. در این مقاله، ضمن تعریف مهمات غیر حسّاس و توصیف انواع پاسخ مهمات به محرک‌های خطرناک، به اصول و روش‌های انجام این آزمون‌ها و نقش مواد منفجره پلیمری در کاهش حسّاسیت مهمات پرداخته می‌شود. به علاوه، نتایج تست‌های مهمات غیر حسّاس در خصوص برخی از انواع PBXs نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد[۲].

شکل(۱): حادثه‌ی ناو هواپیمابر فورستال آمریکا.

## ۲- مهمات غیر حسّاس و روش‌های دست‌یابی به آن

مهمات غیر حسّاس مهماتی هستند که نسبت به مهمات متداول، آسیب‌پذیری کمتری در مواجه با عوامل ناخواسته‌ی بیرونی از خود نشان می‌دهند. با توجه به خطرات سیستم‌های مهمات متداول، بایستی مفهوم مهمات غیر حسّاس مورد بررسی قرار گرفته و در سیستم‌های مهمات از جمله سوخت موتورهای راکت، سوخت‌های جامد موشک‌ها و بمب‌ها به کار گرفته شود. شیوه‌ی ایده‌آل برای تولید مهمات غیر حسّاس، توسعه‌ی مواد پُرانرژی غیر حسّاس می‌باشد. متأسفانه، فرآیند تولید مواد پُرانرژی غیر حسّاس اغلب با مشکلات گسترده‌ای همراه است. با این وجود، متخصصان درصدد سنتز مواد پُرانرژی با حسّاسیت کم و ایمنی بالا می‌باشند. به طور کلی، روش‌های دست‌یابی به مهمات غیر حسّاس برای کاهش خطرات احتمالی عبارتند از[۱]:

الف) استفاده از مواد اولیه‌ی پُرانرژی با حسّاسیت کم.

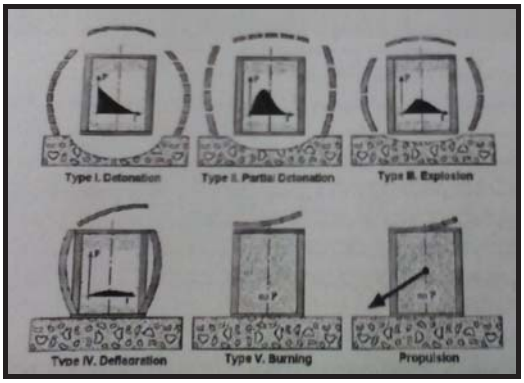
ب) بهینه‌سازی سیستم بسته‌بندی و حمل‌ونقل مهمات کامل، به نحوی که در صورت آغازش غیرعمدی مانع افزایش فشار گردد.

ج) اصلاح روش‌های عمل‌آوری.

د) جایگزینی خرج‌های انفجاری فعلی با ترکیبات ایمن‌تر مانند ترکیبات PBX.

### ۳- پاسخ مهمات به خطرات

نمای شماتیک انواع واکنش‌هایی که مهمات به دلیل قرار گرفتن در معرض خطرات خاص از خود نشان می‌دهند، به طور خلاصه، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دسته‌بندی، تراک (واکنش نوع ۱) به عنوان شدیدترین واکنش شناخته می‌شود. در این واکنش شوک شدیدی در محیط اطراف ایجاد می‌گردد. مرحله‌ی سوزش (واکنش نوع ۵) نیز دارای حداقل میزان شدت است که طی آن پوسته مهمات ممکن است جهت خروج گازهای احتراق پاره گردد. به طور کلی، در طراحی مهمات غیر حسّاس، عمدتاً برنامه‌ریزی برای رسیدن به واکنش نوع ۵ (سوزش) مدنظر می‌باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌های اصلاح پاسخ مهمات به محرک‌های مختلف، توسعه‌ی مواد منفجره‌ی پلیمری است. از این رو، در مقاله‌ی حاضر ضمن پرداختن به انواع آزمون‌های سنجش حسّاسیت مهمات، به مطالعه پاسخ برخی از انواع مواد منفجره‌ی پلیمری در مواجهه با آزمون‌های مهمات غیر حسّاس پرداخته‌شده است[۱].




شکل(۲): پاسخ‌های واکنش به تهدیدات مکانیکی و حرارتی مختلف.

### ۴- مواد منفجره‌ی پلیمری (PBXs) و توسعه‌ی مواد منفجره‌ی غیر حسّاس

خرج انفجاری اکثر مهمات رایج، از مواد منفجره بر پایه TNT تشکیل شده است که به صورت مذاب ریخته‌گری می‌شوند. این مهمات با وجود اینکه دارای عملکرد قابل قبولی می‌باشند اما حسّاسیت نسبتاً بالایی را در مقابل ضربه و دیگر خطرات احتمالی از خود نشان می‌دهند. به علاوه دمای فرآیند بایستی به منظور جلوگیری از تشکیل ترک به خوبی کنترل شود. به دلیل وجود چنین معایبی، در سال ۱۹۴۷ پژوهشگران در لوس آلاموس نخستین PBX را بر پایه‌ی RDX و پلی‌استایرن ایجاد کردند که بعداً با نام PBX-9205 نام‌گذاری شد. پس از آن در سال ۱۹۶۰ نسل دوّم مواد منفجره‌ی پلیمری برای دست‌یابی به ایمنی بیشتر و عملکرد بالاتر برای کاربرد در مهمات ایجاد شد. آنها حاوی RDX،HMX و برخی اجزای دیگر مانند Al بودند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب نوع بایندر بر استحکام، ایمنی و پایداری مواد منفجره پلیمری مؤثر است[۳]. مواد منفجره‌ی پلیمری عمدتاً با استفاده از پخش کردن اجزای منفجره در یک نوع مونومر مایع/ پیش پلیمر و سپس، ریخته‌گری مخلوط به داخل پوسته سرجنگی تهیّه می‌شوند[۵-۴]. به منظور کاهش وقوع حوادث خطرناک ناشی از محرک‌های مختلف، نیروی دریایی و هوایی آمریکا خرج‌های انفجاری خود را با PBX-103 و PBX-109 جایگزین کرده است[۶]. این دسته از مواد منفجره بسیار غیر حسّاس می‌باشند. با این حال توسعه انواع PBXها بر پایه‌ی مواد پُرانرژی با حسّاسیت کم به منظور استفاده در کاربردهای مختلف، از موضوعاتی است که پژوهشگران تلاش‌های زیادی در جهت نائل شدن به آن انجام می‌دهند[۷]. در جدول‌های ۱ تا ۳ فرمولاسیون برخی از انواع PBXهای مختلف آمده است[۸].

جدول (۱): فرمولاسیون مواد منفجره‌ی پلیمری قابل ریخته‌گری[۸].

| کد خرج | اجزاء اولیه | | | |
|---|---|---|---|---|
| | HMX(٪) | RDX(٪) | AP(٪) | Al(٪) |
| PBXN-101 | ۸۲ | - | | |
| PBXN-102 | ۵۹ | - | | ۲۳ |
| PBXN-103 | - | - | ۴۰ | ۲۷ |
| PBXN-104 | ۷۰ | - | - | - |
| PBXN-105 | - | ۷۰ | ۴ | ۲۵ |
| PBXN-106 | - | ۷۵ | - | - |
| PBXN-107 | - | ۸۶ | - | - |
| PBXN-109 | - | ۶۴ | - | ۲۰ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| PBXN-110 | ۸۸ | – | – | – |
| PBXW-107 | – | ۵۵ | – | ۲۰ |

جدول(۲): فرمولاسیون مواد منفجره‌ی پلیمری قابل تزریق و قالب‌گیری[۸].

| کد خرج | اجزای اولیه | | | |
|---|---|---|---|---|
| | HMX(٪) | RDX(٪) | AP(٪) | Al(٪) |
| PBXN-201 | ۸۳ | – | ۱۲ | ۵ |
| PBXN-301 | – | ۸۰ | – | – |

جدول(۳): فرمولاسیون مواد منفجره‌ی پلیمری قابل پرس[۸].

| کد خرج | اجزاء اولیه | | | |
|---|---|---|---|---|
| | HMX(٪) | RDX(٪) | AP(٪) | Al(٪) |
| PBXN-1 | – | ۶۸ | – | – |
| PBXN-3 | ۸۶ | – | – | – |
| PBXN-4 | – | – | ۹۴ | – |
| PBXN-5 | ۹۵ | – | – | – |
| PBXN-6 | – | ۹۵ | – | – |
| PBXN-7 | – | ۳۵ | – | ۶۰ |

## ۵- عوامل تأثیرگذار در حسّاسیت مواد منفجره‌ی پلیمری

برای تولید مواد منفجره‌ی پلیمری غیر حسّاس که در مقابل حرارت و ترکش آسیب‌پذیری کمی دارند، بایستی مقاومت مکانیکی را افزایش داد. زیرا با افزایش مقاومت مکانیکی احتمال ایجاد ترک در ترکیب منفجره کاهش می‌یابد. به طور کلی، عوامل مختلفی بر حسّاسیت مواد منفجره‌ی پلیمری تأثیرگذارند که در اینجا به آن پرداخته شده است[۹].

### ۵-۱- فرآیند تولید

روش تولید مواد منفجره‌ی پلیمری علاوه بر اینکه بر خواص مکانیکی تأثیرگذار است، بر حسّاسیت نیز مؤثر است. بسته به خصوصیات فیزیکی فرمولاسیون، از روش‌های مختلفی برای شارژ و پُر کردن فرمولاسیون ماده‌ی منفجره به درون قالب استفاده می‌شود که شامل ریخته‌گری و پرس و تزریق می‌باشند. به طور کلی، فرآیند تولید نامناسب در یک خرج PBX می‌تواند به ایجاد ترک و جدایش پوسته منجر شود که خود زمینه‌ساز افزایش آسیب‌پذیری مهمات در مقابل خطرات مختلف می‌باشد[۹].

### ۵-۲- اثر اندازه‌ی ذرات

اندازه‌ی ذرات اثر به سزایی بر حسّاسیت مواد منفجره، خصوصاً در مقابل ضربه دارد. ذرات کریستالی با ابعاد کوچک‌تر، زمانی که در فرمولاسیون‌های مواد منفجره استفاده می‌شوند، حسّاسیت را کاهش می‌دهند. فاز احتراق، یک عامل تعیین‌کننده در انفجار ذره‌ای است. عواملی که بر احتراق اثرگذار هستند، حسّاسیت به ضربه را تعیین می‌کنند. مرکز فعال در یک دانه‌ی کریستالی نقطه‌ی آغازش می‌باشد. هرچه کریستال بزرگ‌تر باشد، مرکز فعال راحت‌تر تشکیل می‌شود. به علاوه، هرچه ابعاد کریستال‌ها کوچک‌تر باشند، ساختار پُل‌مانند بین دانه‌های کریستالی راحت‌تر تشکیل می‌شود. بنابراین، باعث ثبات بیشتر ساختار شده و موجب حسّاسیت پایین دانه‌های کریستالی به ضربه می‌شود[۹].

### ۵-۳- اثر نقص بلور

نقص موجود در ساختار کریستالی پُرکننده‌ی پُرانرژی در یک ترکیب انفجاری حسّاسیت مواد منفجره را خصوصاً در مقابل شوک افزایش می‌دهد. این مسئله توسط مواد منفجره‌ی پلیمری بر پایه HMX بررسی شده است. در این مثال خاص، با افزایش چگالی بلور از ۱/۸ به ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب توسط فرآیند تبلور مجدّد، فشار آغازش شوک از ۴/۱ به ۶/۸ گیگا پاسکال افزایش می‌یابد[۹].

### ۵-۴- اثر چگالی

بین چگالی بلور یک ماده منفجره و حسّاسیت به شوک رابطه مستقیمی وجود دارد. این موضوع بر روی نمونه‌های PBX تهیه شده با پایه HMX به اثبات رسیده است، به طوری که هرچه چگالی بلور بالاتر باشد، کیفیت بلور نیز بالاتر است. در نتیجه، حسّاسیت به شوک کاهش می‌یابد. علاوه بر عوامل فوق که به آن اشاره شد، عوامل دیگری

نظیر توزیع اندازه‌ی ذره‌ی مواد کریستالی، شکل و هندسه شارژ، فرمولاسیون و عوامل محیطی نیز می‌توانند بر حسّاسیت مواد منفجره پلیمری تأثیرگذار باشند. بنابراین، این موارد در تولید PBXها بایستی مورد توجه قرار گیرند[۹].

## ۶- انواع آزمون‌های سنجش میزان حسّاسیت مهمات و پاسخ مواد منفجره‌ی پلیمری به این آزمون‌ها

یک ماده‌ی منفجره‌ی ایده‌آل، علاوه بر داشتن عملکرد بالا بایستی در حین حمل‌ونقل و استفاده به حد کافی غیر حسّاس باشد[۱۰]. عموماً آسیب‌پذیری مهمات علاوه بر اینکه به شدت تحت تأثیر خصوصیات مواد منفجره قرار دارد، به خصوصیات فیزیکی سرجنگی، شرایط محیطی و کیفیت خرج مواد منفجره نیز وابسته می‌باشد. عموماً محرک‌های مکانیکی و حرارتی، مهمات را در حین انبارداری و حمل‌ونقل و شرایط محیطی (رطوبت بالا) تهدید می‌کنند. از آزمون‌های مختلفی به منظور سنجش میزان حسّاسیت مهمات استفاده می‌شود که عبارتند از:

۱. آزمون حرارت‌دهی آهسته.
۲. آزمون حرارت‌دهی سریع.
۳. آزمون اصابت گلوله.
۴. آزمون اصابت ترکش.
۵. آزمون اصابت خرج شکل‌یافته.
۶. آزمون انفجار القایی.

### ۶-۱- آزمون‌های حرارت‌دهی آهسته

حرارت‌دهی، فرآیند پیچیده‌ای است که به عوامل محیطی مختلفی مانند سرعت حرارت‌دهی، میزان و شدت حبس‌شدگی مواد منفجره، حجم آزاد (فضای خالی) وابسته می‌باشد[۱۱]. آسیب‌های حرارتی اغلب اثر بسیار مهمی بر حسّاسیت مواد منفجره دارد. اغلب آزمون‌های مخاطرات حرارتی به طور جدّی در اواسط سال ۱۹۷۰ به عنوان بخشی از برنامه مهمات غیر حسّاس در آمریکا مورد بررسی قرار گرفتند. به علت ماهیّت تخریبی این آزمون‌ها، ضروری است که از تجهیزات مصرفی با ارزان‌ترین نوع تجهیزات نظارتی استفاده شود. این آزمون‌ها معمولاً شامل مجموعه‌ای از ترموکوپل‌ها می‌باشد که در وضعیت‌های مختلفی نصب می‌شوند. دوربین‌های فیلم‌برداری و گیج‌های اندازه‌گیری موج شوک تولیدشده حاصل از انفجار، در اطراف محل آزمون قرار می‌گیرند. به طور کلی، با توجه به شدت و وضعیت قرار گرفتن مهمات در معرض تهدیدات حرارتی، این آزمون‌ها به دو دسته آزمون حرارت‌دهی آهسته و سریع تقسیم می‌شوند. آزمون حرارت‌دهی آهسته برای شبیه‌سازی شرایطی که مواد پُرانرژی و یا مهمات در معرض افزایش آهسته دما قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود.

### ۶-۲- آزمون‌های حرارت‌دهی سریع

هدف از انجام این آزمون، شبیه‌سازی شرایطی است که طی آن مهمات ممکن است تحت آتش دشمن، در طی استفاده یا در طول مدت انبارداری، در معرض آتش مستقیم قرار گیرند. در این آزمون، ماده آزمون به صورت معلق بالای تشتک یا آتشدان حاوی سوخت در حال سوزش قرار می‌گیرد. در آتشدان، سوخت مناسبی که شعله آن تا حدود ۲۰ دقیقه یا زمانی که برای واکنش کامل مهمات لازم است بسوزد، ریخته می‌شود. عموماً از سوخت‌های هیدروکربنی مایع مناسب استفاده می‌شود[۱۲].

### ۶-۳- آزمون اصابت گلوله

خصوصیات مکانیکی مواد پُرانرژی و آسیب‌های مکانیکی اغلب اثر بسیار مهمی بر حسّاسیت مواد منفجره دارند. از این رو، با توسعه‌ی مواد منفجره‌ی پلیمری و بهبود خصوصیات مکانیکی، این نوع خرج‌ها در مقایسه با خرج‌های متداول رفتار قابل قبولی در برابر مخاطرات احتمالی نظیر ضربه و ترکش از خود نشان می‌دهند[۱۳]. آزمون اصابت گلوله به منظور بررسی واکنش مهمات به شلیک حاصل از سلاح‌های سبک استفاده می‌شود[۱۴]. در این آزمون نمونه، معمولاً توسط شلیک ماکزیمم سه گلوله کالیبر نیم، ضد زره از یک سلاح نفوذی که دارای سرعت دهانه ۸۵۳ متر بر ثانیه است، مورد اصابت قرار می‌گیرد. گلوله‌ها به طور پی‌درپی در فواصل زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه به منظور شبیه‌سازی نواخت ۶۰۰ تیر در دقیقه، شلیک می‌شوند[۱۵].

### ۶-۴- آزمون اصابت ترکش

آزمون اصابت ترکش به منظور بررسی واکنش مهمات به اصابت حاصل از ترکش‌های با سرعت بالا که ممکن است از منابعی مانند انفجار بمب‌ها یا پوسته مهمات ایجاد می‌گردند، انجام شود[۱۶]. در این آزمون، ماده آزمون توسط یک شبیه‌ساز که ترکش‌های با سرعت بالا تولید می‌کند، تحت اصابت قرار می‌گیرد. این آزمون نسبت به آزمون اصابت گلوله با یک تک‌گلوله با سرعت و جرم مشابه، به علت شرایط ابتدایی بسیار شدید ممکن است به وقایع بزرگ‌تری منجر شود[۱۷].

### ۶-۵- آزمون اصابت خرج شکل‌یافته

یک استوانه از ماده‌ی منفجره با یک حفره‌ی خالی در یک انتها و یک چاشنی در انتهای دیگر آن خرج شکل‌یافته نامیده می‌شود. حفره‌ی خالی با اشکال هندسی مختلف باعث می‌شود که انرژی ناشی از انفجار بر روی محور تمرکز یابد. این تمرکز می‌تواند فشارهای بسیار بزرگی در بخش توخالی خرج ایجاد نماید و چنانچه یک بلوک فلزی در مقابل حفره و در معرض این فشار متمرکز قرار گیرد، تا عمق قابل‌توجهی سوراخ می‌شود. سوراخ ایجادشده توسط یک خرج حفره‌دار از خرج بدون حفره که جرم بیشتری هم دارد، عمیق‌تر است[۱۹].

### ۶-۶- آزمون انفجار القایی

در یک کارخانه یا انبار حاوی مواد پُرانرژی، در صورت رخ دادن یک حادثه انفجاری، به منظور اجتناب از آسیب‌های بیشتر به علت وقوع واکنش‌های زنجیره‌ای، بایستی از انفجار القایی جلوگیری شود. از این رو، درک انفجار القایی مواد پُرانرژی از نظر مهندسی ایمنی بسیار با اهمیت می‌باشد. هدف از این آزمون این است که ببینیم آیا انفجار یکی از مهمات باعث انفجار هم‌زمان، یا تقریباً به طور همزمان در دیگر مهمات مجاور خواهد شد یا نه. به منظور شبیه‌سازی چنین شرایطی، در این آزمون یکی از مهمات به طور عمدی منفجر شده و بقیه‌ی مهمات برای واکنش آزاد گذاشته می‌شوند. در این آزمون یک خرج‌دهنده در دسته‌ای از خرج‌ها با آرایشی خاص منفجر می‌شود. به علاوه، نتایج آزمون انفجار القایی برای چند نمونه ماده منفجره نشان می‌دهد که فرمولاسیون PBX، در هنگام مواجه با انفجار القایی واکنشی از خود نشان نمی‌دهند[۱۸].

## ۷- نتیجه‌گیری

مواد منفجره غیر حسّاس موادی هستند که علاوه بر حفظ کارایی و نیازمندی‌های عملیاتی در میدان نبرد، هنگامی که در معرض اثرات خطرناک مکانیکی و یا حرارتی قرار می‌گیرند، احتمال آغازش غیرعمدی آنها در سلاح و سیستم‌های لجستیکی- پشتیبانی بسیار پایین می‌باشد. یکی از روش‌های دست‌یابی به مواد منفجره غیر حسّاس، استفاده از مواد منفجره‌ی پلیمری (PBXs) به جای خرج‌های انفجاری فعلی می‌باشد. به دلیل ماهیت فرمولاسیون و خواص مطلوب مکانیکی خرج‌های PBX در مقایسه با خرج‌های متداول، پاسخ مواد منفجره پلیمری در برخورد با مخاطرات احتمالی از شدت کمتری برخوردار است. این مواد در مواجهه با آزمون حرارت‌دهی آهسته و سریع در مقایسه با خرج‌های انفجاری رایج، به علت کاهش واکنش‌های شدید، فرآیند تجزیه آهسته‌تری را از خود نشان می‌دهند. به علاوه، استحکام زیاد و خواص مکانیکی ناشی از طبیعت الاستومری مواد منفجره‌ی پلیمری موجب پایداری بیشتر این مواد در مقابل ترک‌خوردگی و ضربه‌های محیطی شدید می‌شود. به طور کلی، آزمون‌های مواد منفجره غیر حسّاس زمانی که به طور تطبیقی برای مواد منفجره پلیمری و مواد منفجره متداول به کار برده شوند، نتایج بسیار مفیدی به دست خواهند داد. با انجام چنین آزمون‌هایی حسّاسیت انواع مختلف فرمولاسیون‌های PBX به خوبی قابل سنجش خواهد بود. انتظار می‌رود با بهینه کردن فرآیند تولید PBXها و استفاده از اجزاء مناسب در فرمولاسیون، حسّاسیت مواد منفجره‌ی پلیمری کاهش یابد. در این خصوص، برخی از مواد منفجره پلیمری مانند PBX-9205 و PBX-109 اغلب آزمون‌های غیر حسّاس را با موفقیت طی نموده‌اند. بنابراین، استفاده از چنین فرمولاسیون‌هایی تا حد زیادی احتمال رخداد حوادث خطرناک احتمالی را کاهش می‌دهد. با توجه به خواص منحصر به فرد مواد منفجره پلیمری از جمله استحکام مکانیکی، خواص انفجاری، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، حسّاسیت کم به شوک و ضربه، عمر انبارداری بالا و ایمنی در حمل‌ونقل، می‌توان از آن‌ها در انواع سرجنگی موشک‌ها، مین‌های دریایی، ... و به دلیل حسّاسیت پایین

در برابر رطوبت بالا به صورت خاص در تجهیـزات موجـود روی شناورها استفاده نمود.

**منابع:**


[1] Bekir, N., ‘‘One and two dimensional numerical simulation of deflagration to detonation transition phenomenon solid energetic materials,’’ A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, 2010.

[2] Anders, H., ‘‘Continuous production of LOVA propellant and cast-cured pbx for insensitive munitions at bofors explosive,’’ Swedish. 72-90, 1994.

[3] http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/explosive-compositions.htm

[4] Jinn, S. L., ‘‘Thermal properties and shelf life of HMX-HTPB based plastic bonded explosive,’’ Thermo chemical acta, pp. 392-393, 2002.

[5] Jinn, S. L., ‘‘Thermal properties and shelf life of HMX-HTPB based plastic bonded explosive,’’ Thermo chemical acta, pp., 153-156, 2002.

[6]http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/im.htm

[7] Paul, W., ‘‘Insensitive ammunition for the artillery,’’ Rheinmetall waffe munition, 2008.

[8] http://ja.wikipedia/wiki/org.

[9] بیـات، یـدالله، ابریشـمی، فاطمـه، «مـواد منفجـره‌ی پلیمری بـر پایـه‌ی HMX»، انتشـارات دانشـگاه صـنعتی مالک‌اشتر، ۱۳۸۶.

[10] Badgujar, D. M., ‘‘Advances in science and technology of review,’’ Journal of hazardous materials, pp. 289-305, 2008.

[11] Harold, W., and Paul, G., ‘‘Validation experiment for modeling slow cook-off,’’ Navesea indian head division, 2002.

[12] http://www.imemge.org/res/immemts.

[13] Gert, S., and Richard, B., ‘‘Thermal and mechanical damage of PBXs,’’ At the TNO Prins Maurits Laboratory, Mar 23, 2015

[14] Chales, R., ‘‘Hazard assessment tests of explosive munitions under MIL-STD-2015, shock and vibration information analysis center SAVICA,’’ USA, June, 2004.

[15] Arisawa, H., ‘‘A study of response mechanism of gun propellants at bullet impact,’’ Journal of japan explosive society, Vol. 60, No 4, pp. 184-190, 1999.

[16] Jonas, A. Z., ‘‘Explosive effects and applications,’’ US army resaron laboratory, pp. 321-339, 1998.

[17] Barrington, L. M., ‘‘Full scale insensitive munitions testing of the cartridge case,’’ DSTO-TR, 1994.

[18] علوی‌نیا، علی، احمدی‌کیا، حسـین، حجتـی، اصـغر، «تحلیل عددی انفجار و تشکیل جت در خرج گود»، مجله علمی پژوهشی مواد پُرانرژی، سال دوّم، شماره ۲، ۱۳۸۶.

[19] Nicolas, M. M., ‘‘Insensitive munitions testing for the m81681 mm infrared mortar cartridge,’’ Energy material technology symposium, 2006.