Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University
Summer 2025, Vol. 42

Original Research

Enhancing the safety of HMX-based plastic explosives through encapsulation with Viton polymer

Mousa nazari [1] *, Majid akbari hojghan[2]

[1]Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology and Research Institute, Department of Chemical Engineering, Imam Hossein University, Tehran

[2] PhD Student in Chemical Engineering, Faculty and Research Institute of Engineering and Technology, Department of Chemical Engineering, Imam Hossein (AS) University, Tehran

ARTICLE INFO

Received: 2025.07.07

Accepted: 2025.08.14

Published: 2025.09.15

Keyword:

Plastic explosives (PBX), HMX, Viton, impact and friction sensitivity, encapsulation

***Corresponding Author:**

Mousa Nazari

Email:

mousanazari63@yahoo.com

ABSTRACT

Plastic explosives (PBXs) are advanced composites with a uniform dispersion of high-power explosives such as cyclotetramethylenetetranitramine (HMX) in a polymer matrix that are used in missile warheads, hollow charges, and advanced munitions due to their flexibility in shaping. With a density of 1.9 g/cm³, a detonation velocity of about 9100 m/s, and good thermal stability (melting point 277°C), HMX is one of the most powerful explosives; however, its high sensitivity to impact (7.4 joules) and friction (120 Newtons) poses serious safety challenges in production, transportation, and application. This research aimed to reduce the sensitivity of HMX by encapsulating its crystals with Viton polymer to improve safety while maintaining explosive power. HMX/Viton samples with a weight ratio of 98:2 and different HMX particle size ratios (fine to coarse: 50/50 and 60/40) were synthesized to investigate the effect of particle size distribution on mechanical properties and sensitivity. The encapsulation process was performed using a Viton solution in ethyl acetate and oven-dried. Impact and friction sensitivity tests showed that the sample with a ratio of 60/40 was optimal and did not react (explosion or spark) to an impact energy of 14.7 J (a 5 kg weight dropped from a height of 30 cm) and a friction force of 240 N. These results indicate a 98.6% reduction in impact sensitivity and 100% in friction sensitivity compared to pure HMX. Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analyses confirmed the uniform Viton coating and the preservation of the crystalline structure of β-HMX. This study demonstrates the success of Viton encapsulation in enhancing the safety of HMX and offers a novel solution for military and industrial applications.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)
تابستان 1404 ، دوره 42

مقاله پژوهشی

افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی مبتنی بر HMX از طریق کپسوله‌سازی با پلیمر وایتون

موسی نظری[1]، مجید اکبری هوجقان[2]

[1] استادیار، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

[2] دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: 1404/04/16

پذیرش مقاله: 1404/05/23

انتشار مقاله: 1404/06/24

کلید واژگان:

مواد منفجره پلاستیکی (PBX)، HMX، وایتون (Viton)، حساسیت به ضربه و اصطکاک، کپسوله‌سازی

چکیده

مواد منفجره پلاستیکی (PBXs) کامپوزیت‌هایی پیشرفته با پراکندگی یکنواخت مواد منفجره پرقدرت نظیر سیکلوتترامتیلن‌تترانیترامین (HMX) در بستر پلیمری هستند که به دلیل انعطاف‌پذیری در شکل‌دهی، در سرجنگی موشک‌ها، خرج‌های گود، و مهمات پیشرفته کاربرد دارند HMX با چگالی 1.9 g/cm^3، سرعت انفجار حدود 9100 m/s، و پایداری حرارتی مناسب (نقطه ذوب 277°C)، یکی از قوی‌ترین مواد منفجره است؛ اما حساسیت بالای آن به ضربه (7.4 ژول) و اصطکاک (120 نیوتن) چالش‌های ایمنی جدی در تولید، حمل‌ونقل، و کاربرد ایجاد می‌کند. این پژوهش با هدف کاهش حساسیت HMX از طریق کپسوله‌سازی بلورهای آن با پلیمر وایتون (Viton) انجام شد تا ضمن حفظ قدرت انفجاری، ایمنی بهبود یابد. نمونه‌های HMX/Viton با نسبت وزنی 98:2 و نسبت‌های مختلف

*نویسنده مسئول

موسی نظری

پست الکترونیکی:

mousanazari63@yahoo.com

اندازه ذرات HMX (ریز به درشت: 50/50 و 40/60) سنتز شدند تا اثر توزیع اندازه ذرات بر خواص مکانیکی و حساسیت بررسی شود. فرآیند کپسوله‌سازی با استفاده از محلول وایتون در اتیل استات و خشک‌سازی در آون انجام گرفت. تست‌های حساسیت به ضربه و اصطکاک نشان داد که نمونه با نسبت 40/60 بهینه است و در برابر انرژی ضربه 14.7 ژول (سقوط وزنه 5 کیلوگرمی از ارتفاع 30 سانتی‌متری) و نیروی اصطکاک 240 نیوتن هیچ‌گونه واکنشی (انفجار یا جرقه) نداشت. این نتایج حاکی از کاهش 98.6% در حساسیت به ضربه و 100% در حساسیت به اصطکاک نسبت به HMX خالص است. آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD)، و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) پوشش یکنواخت وایتون و حفظ ساختار کریستالی β-HMX را تأیید کردند. این مطالعه نشان‌دهنده موفقیت کپسوله‌سازی با وایتون در ارتقای ایمنی HMX است و راهکاری نوین برای کاربردهای نظامی و صنعتی ارائه می‌دهد.

1- مقدمه

مواد منفجره پلاستیکی (Plastic Bonded Explosives; PBXs) گروهی از ترکیبات انفجاری پیشرفته هستند که از توزیع همگن مواد منفجره پرانرژی یا مخلوطی از آن‌ها همراه با افزودنی‌ها در یک ماتریس پلیمری تشکیل می‌شوند. این مواد به دلیل قابلیت شکل‌پذیری بالا، امکان تولید به روش‌های ریخته‌گری یا پرس‌کاری را فراهم می‌کنند و در اشکال متنوعی نظیر خرج‌های انفجاری سرجنگی بمب‌ها، موشک‌ها و خرج‌های گود هدفمند کاربرد دارند. مواد منفجره پرانرژی مانند سیکلوتری‌متیلن‌تری‌نیترامین (RDX)، سیکلوتترامتیلن‌تترانیترامین (HMX) و پنتااریتریتول‌تترانیترات (PETN) به طور گسترده در ماتریس‌های پلیمری نظیر لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی استفاده می‌شوند. PBXها به دلیل ویژگی‌هایی نظیر پایداری حرارتی بالا، حساسیت پایین، آسیب‌پذیری کم و خواص مکانیکی مطلوب شناخته می‌شوند. که از طریق کپسوله‌سازی بلورهای ماده منفجره در ماتریس پلیمری، ایمنی و کارایی آن‌ها بهبود می‌یابد.

برای بهینه‌سازی انرژی خروجی فرمولاسیون PBXها، کاهش درصد بایندر پلیمری (جزء چسباننده) به عنوان راهکاری کلیدی شناخته شده است. استفاده از سورفکتانت‌ها و کمک‌فرآیندها امکان کاهش نسبت بایندر را بدون تأثیر منفی بر فرآیندپذیری فراهم می‌کند (Wang et al, 2024)، به طور معمول، ماده منفجره بلوری 90 تا 95 درصد و ماتریس پلیمری 5 تا 10 درصد از جرم کامپوزیت را تشکیل می‌دهند (Chen et al, 2006). در ساختار PBX، بلورهای ماده منفجره با لایه‌ای از بایندرهای پلیمری و اجزای لاستیکی پوشش داده می‌شوند. این فرآیند کپسوله‌سازی ضمن پر کردن فضاهای خالی بین بلورها، نقش حفاظتی مهمی ایفا می‌کند و افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی را تضمین می‌کند. انعطاف‌پذیری زنجیره‌های پلیمری و توانایی آن‌ها در جذب فشار، انرژی منتقل‌شده به بلورها

در اثر ضربه را به طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و پایداری ماده منفجره را بهبود می‌بخشد (Guo et al, 2014)، (Gagliardi et al, 2008)، (Connors et al, 2014)

تاکنون، ترکیبات متعددی از PBXها بر پایه مواد منفجره نظیر RDX، HMX، TATB و HNS مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این میان، RDX و HMX به دلیل عملکرد مطلوب، هزینه تولید پایین و خواصی نظیر پایداری بالا و قدرت انفجاری برتر نسبت به مواد حاوی حلقه‌های نیتروژن‌دار، به عنوان پرکاربردترین مواد منفجره در PBXها شناخته می‌شوند. مواد منفجره تک‌حلقه‌ای مانند TATB و دوحلقه‌ای نیتروژن‌دار مانند HNS به دلیل پایداری حرارتی بهبودیافته از طریق کپسوله‌سازی، توجه زیادی را در توسعه PBXها جلب کرده‌اند. ماده NTO به دلیل حساسیت بسیار پایین، در تولید PBXهای ریخته‌گری استفاده شده و کاهش قدرت انفجاری ناشی از حضور آن ناچیز است. در حال حاضر، (HNIW) CL-20 به عنوان یکی از قدرتمندترین مواد منفجره شناخته می‌شود که با سرعت انفجار بالا و سازگاری مناسب با سایر اجزای فرمولاسیون مشخص است؛ با این حال، حساسیت بالای آن نیازمند اصلاح و بهبود از طریق کپسوله‌سازی است (Yan et al, 2012).

این پژوهش بر مطالعه فرآیند تجزیه حرارتی HMX ($C_4H_8N_8O_8$) متمرکز است. HMX با حساسیت پایین و نقطه ذوب 277 درجه سانتی‌گراد، به دلیل انرژی بالای تولیدی، در تسلیحات ضدزره نظیر گلوله‌های شدیدالانفجار ضدتانک و موشک‌های ضدزره کاربرد گسترده‌ای دارد. این ماده به دلیل توان تخریبی بالا، قابلیت نفوذ تسلیحات را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Wang et al, 2024). با وجود مزایایHMX، حساسیت بالای آن به ضربه و اصطکاک، چالش‌هایی را در ایمنی جابجایی و فرآیند تولید ایجاد می‌کند. برای رفع این مشکل، استفاده از بایندرهای پلیمری و فرآیند کپسوله‌سازی به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی پیشنهاد شده است. این بایندرها ضمن تضمین اشتعال‌پذیری مناسب در اثر تحریک چاشنی، مقاومت ماده را در برابر ضربات و اصطکاک‌های ناخواسته افزایش می‌دهند (Chen et al, 2006).

پلیمرهایی نظیر Viton، FEFO، BDNPA و Estane از جمله بایندرهای پرکاربرد در PBXهای پایه HMX هستند. در این پژوهش، پلیمر Viton به دلیل خواص مکانیکی و انعطاف‌پذیری مطلوب انتخاب شد. این پلیمر با ایجاد پوششی یکنواخت از طریق کپسوله‌سازی بر روی بلورهای HMX، فضاهای خالی بین بلورها را پر کرده و انرژی منتقل‌شده به بلورها در اثر ضربه را کاهش می‌دهد، که این امر به افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی کمک می‌کند. هدف این مطالعه، ایمن‌سازی HMX از طریق بهینه‌سازی فرمولاسیون پلیمری است که نه‌تنها ایمنی در جابجایی و استفاده را تضمین می‌کند، بلکه به پیشرفت‌های علمی و فنی در زمینه مواد منفجره پرانرژی منجر می‌شود.

برای بررسی اثر نسبت‌های مختلف بایندر و توزیع اندازه ذرات بر خواص مکانیکی و حساسیت،

نمونه‌های HMX/Viton با نسبت وزنی 98:2 (HMX به Viton) تهیه شدند. این نسبت به منظور حفظ حداکثر قدرت انفجاری و بهبود ایمنی افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی از طریق کپسوله‌سازی انتخاب شد. همچنین، تأثیر توزیع اندازه ذرات HMX (ریزدانه به درشت‌دانه) در نسبت‌های 50:50 و 60:40 بررسی شد تا اثر آن بر خواص مکانیکی و حساسیت نهایی مشخص شود. برای سنتز نمونه‌ها، از آب و حلال اتیل استات استفاده شد. پس از آماده‌سازی، آزمایش‌های حساسیت به ضربه و اصطکاک با هدف شناسایی نمونه بهینه و ارزیابی اثربخشی پوشش پلیمری انجام گرفت. همچنین، برای تأیید ساختار و مورفولوژی نمونه بهینه و اطمینان از پوشش یکنواخت Viton بر روی بلورهای HMX از طریق کپسوله‌سازی، آنالیزهای پیشرفته‌ای نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) انجام شد.

2- روش تحقیق

در این مطالعه تهیه‌نمونه های مختلف از لحاظ اندازه ذرات ماده HMX برای بررسی اثر نسبت‌های مختلف بایندر و توزیع اندازه ذرات بر خواص مکانیکی و حساسیت، نمونه‌های HMX/Viton با نسبت وزنی 98:2 (HMX به Viton) تهیه شدند. این نسبت به منظور حفظ حداکثر قدرت انفجاری و بهبود ایمنی افزایش ایمنی مواد منفجره پلاستیکی از طریق کپسوله‌سازی انتخاب شد. همچنین، تأثیر توزیع اندازه ذرات HMX (ریزدانه به درشت‌دانه) در نسبت‌های 50:50 و 60:40 بررسی شد تا اثر آن بر خواص مکانیکی و حساسیت نهایی مشخص شود. برای سنتز نمونه‌ها، از آب و حلال اتیل استات استفاده شد. پس از آماده‌سازی، آزمایش‌های حساسیت به ضربه و اصطکاک با هدف شناسایی نمونه بهینه و ارزیابی اثربخشی پوشش پلیمری انجام گرفت. همچنین، برای تأیید ساختار و مورفولوژی نمونه بهینه و اطمینان از پوشش یکنواخت Viton بر روی بلورهای HMX از طریق کپسوله‌سازی، آنالیزهای پیشرفته‌ای نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) انجام شد.

2-1- بخش تجربی

2-1-1- مواد اولیه و تجهیزات

مواد لازم عبارتند اند از HMX ریز و درشت با نسبت‌های 50/50 و 40/60 ، پلیمر Viton جهت پوششی‌دهی و کپسوله‌سازی استفاده می‌شود تا از این طریق فضاهای خالی موجود در بین بلورها پر شود. که در نهایت باعث ایمن‌سازی ماده منفجره HMX میشود ، حلال اتیل استات جهت ایجاد

فرمولاسیون HMX/Viton با توجه به ویژگی فراریت و آب و تجهیزات لازم جهت آماده‌سازی نمونه‌ها بشر، میکسر، بورت، هیتر و آون می‌باشد. کلیه مواد اولیه و تجهیزات به صورت تجاری تهیه شده‌اند.

2-1-2- تهیه فرمولاسیون

برای تهیه نمونه ، 98%از HMX و 2%Viton را جهت انتخاب نمونه مطلوب انتخاب شد. در ادامه دو نمونه A_1 وA_2 از HMX های با اندازه ذرات ریز و درشت به ترتیب با درصد های 50/50، و 40/60 در ادامه به منظور کاهش حساسیت نمونه ها پلیمر Viton اضافه می‌شود. از انجا که Viton به حالت جامد می‌باشد، در ابتدا نیاز به تهیه محلول لاکی Viton و اتیل استات است. از جهتی به هر سه نمونه در بشر مقداری آب به HMX اضافه نموده و از یک میکسر نیز جهت ایجاد یکنواختی استفاده می‌شود و با استفاده از هیتر افزایش دما انجام می‌گردد و به آرامی مقداری از محلول لاکی را با استفاده از بورت به نمونه ها اضافه می‌شود و به مدت 20 دقیقه حرارت داده می‌شود تا اتیل استات با توجه به ویژگی فرار بودن اتیل استات ماده Viton به صورت کامل بین ذرات HMX قرار گیرد. در ادامه آب را از نمونه ها جدا کرده و با استفاده از خشک کن نمونه های نهایی آماده می‌شود.

2-1-3- تست های حساسیت و آنالیزهای مشخص یابی

- **حساسیت به ضربه**

حساسیت PBX به ضربه برای فرمولاسیون‌ها مختلف، معمولاً، با سامانه فال هامر[1] اندازه‌گیری می‌گردد. در این روش، ابتدا دو فویل آلومینیومی بر روی یک سندان فلزی، از جنس استیل،که سخت‌کاری شده است، کشیده شده و سپس نمونه PBX مورد نظر (معمولاً به جرم 20 mg) بین دو فول مذکور قرار داده می‌شود. در ادامه نمونه در معرض ضربه چکشی به جرم 2 کیلوگرم، بصورت سقوط آزاد از ارتفاعات مختلف، قرار می‌گیرد. با توجه به ارتفاع سقوط وزنه، نمونه از نظر آغازش یا عدم آغازش (بصورت چشمی) تحت نظر قرار گرفته می‌شود. ارتفاعی که نمونه در اثر ضربه وزنه دچار آغازش شود، معیاری از میزان حساسیت نمونه در برابر ضربه است(Yan et al, 2012). در شروع آزمون ابتدا بطور سعی و خطا یک ارتفاع دلخواه برای سقوط چکش در نظر گرفته شده و در مراحل بعدی (پس از انجام 25 تا 30 آزمایش)، با توجه به رویت یا عدم رویت آغازش ارتفاع سقوط با گام 5 cm، به ترتیب، کاهش یا افزایش داده می‌شود. فرض اصلی حاکم بر این آزمون از این قرار است که چنانچه در آزمایش انجام شده در ارتفاع معیین (E) انفجار رخ دهد، در این صورت انفجار در ارتفاع‌های بالاتر (e)،

[1]Fall Hammer Apparatus

نیز رخ خواهد داد؛ و چنانچه در آزمایش انجام شده در ارتفاع معیین (N)، انفجاری رخ ندهد، در این صورت انفجار در ارتفاع‌های پایین‌تر (n)، نیز رخ نخواهد داد. درصد وقوع انفجار نمونه از طریق شمارش نقاط (E) و (e) برای ارتفاع در نظر گرفته شده، و تقسیم این تعداد بر تعداد کل نقاط (E)، (e)، (N) و (n) بدست می‌آید.

$$Percentage\ of\ explosion\ = \frac{Points\ (E)+(e)}{Points\ (E)+(e)+(N)+(n)} \quad (1)$$

ارتفاع 50 درصدی انفجار (h50) با استفاده از یک روش آماری محاسبه می‌گردد. این ارتفاع از رسم ارتفاع سقوط بر حسب درصد انفجار بدست می‌آید. نمودار حساسیت (که در اصطلاح F of I نامیده می‌شود) از روی h_{50} ماده تتریل[1]، به عنوان ماده استاندارد، محاسبه می‌گردد (Yan et al, 2012).

$$\text{F of I of an explosive}\ = \frac{h_{50}\ of\ given\ explosive \times 70}{h_{50}\ of\ tetryl} \quad (2)$$

- **حساسیت به اصطکاک**

حساسیت PBX در برابر تنش‌های اصطکاکی با استفاده از سامانه استاندارد ژولیوس پیترس (بارگذاری تا مقدار بیشینه 36 کیلوگرم) اندازه‌گیری می‌گردد. ابتدا یک کاغذ کربنی روی صفحه‌ای از جنس پورسیلین قرار داده می‌شود. بازوی بارگذاری با یک پین ثابت نگهداشته می‌شود و به آرامی به پایین، به سمت کاغذ کربنی، حرکت می‌کند تا به نقطه تماس بین صفحه و پین برسد. پین ثابت شده بر روی بازوی بارگذاری با دقت روی نمونه (با وزن 20 mg) گذاشته می‌شود. وزنه‌ای متناسب بطور منطقی بر روی یک شیار مشخص از بازوی بارگذاری قرار داده می‌شود تا از این طریق نیروی اصطکاکی، با عنایت به جدول تنظیم اولیه‌ی دستگاه، نمونه‌ی مورد نظر به جایگاه آزمایش منتقل می‌گردد. در حین انجام آزمون، صفحه‌ی چینی واقع در زیر پین، حرکات رفت و برگشتی و جلو و عقب را در مسیری به طول 10 میلی‌متر بر روی سطح نمونه آغاز می‌کند. در طول هر آزمایش، چنانچه پدیده‌ی انفجار در نمونه مشاهده گردد، میزان بار اصطکاکی اعمال‌شده ثبت خواهد شد. در صورتی که در پنج آزمایش پی‌درپی هیچ‌گونه انفجاری رخ ندهد، مقدار بار اعمال‌شده در این آزمایش‌ها به عنوان حد نهایی و آستانه‌ی حساسیت اصطکاکی ماده در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که پین و صفحه، برای اطمینان از صحت نتایج، در هر آزمایش با نمونه‌های نو جایگزین می‌شوند(Maeno and Fukunaga, 1994).

[1]tetry

2-1-4- آنالیز SEM

آنالیز SEM ، یا میکروسکوپ الکترونی روبشی، یک فن تصویربرداری توانمند است که به منظور بررسی دقیق سطح مواد در ابعاد میکروسکوپی و نانومتری به کار می‌رود. این روش با بهره‌گیری از یک شعاع الکترونی متمرکز، تصاویری با بزرگنمایی بسیار بالا از سطح نمونه ارائه می‌دهد و اطلاعات ارزشمندی راجع به ریخت‌شناسی (شکل و ساختار سطحی)، ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی مواد در اختیار می‌گذارد. اگرچه آنالیز SEM به طور مستقیم برای تعیین سینتیک تجزیه حرارتی مواد منفجره مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، اما می‌تواند نقش بسزایی در تکمیل و تفسیر یافته‌های حاصل از آنالیزهای حرارتی در مورد این مواد ایفا نماید. در ادامه، نحوه‌ی کاربرد SEM در این زمینه شرح داده می‌شود. چنانچه از مواد افزودنی یا پوشش‌هایی به منظور تغییر رفتار حرارتی ماده منفجره استفاده شود، SEM می‌تواند برای بررسی نحوه‌ی توزیع و تأثیر این مواد بر روی سطح ماده‌ی منفجره به کار گرفته شود(Dunlap and & Adaskaveg, 1997).

2-1-5- آنالیز XRD

آنالیز XRD، یا پراش پرتو ایکس، یک فن بی‌نظیر و بسیار پرکاربرد در شناسایی فازهای کریستالی موجود در انواع مواد گوناگون به شمار می‌رود. در حقیقت، یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین کارکردهای XRD، تعیین ترکیبات و فازهای بلوری موجود در یک نمونه‌ی مورد مطالعه است، XRD قادر است دگرگونی‌های موجود در ساختار کریستالی ماده‌ی اولیه یا محصولات حاصل از تجزیه را نیز آشکار سازد. این تغییرات می‌تواند شامل تغییر در ابعاد بلورک‌ها، دگرگونی در پارامترهای شبکه کریستالی و کاهش یا افزایش شدت پیک‌های پراش باشد. همچنین، همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، XRD می‌تواند برای شناسایی محصولات جامد ناشی از تجزیه حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. این داده‌ها برای تعیین مسیرهای واکنش و مکانیسم تجزیه از اهمیت بسزایی برخوردارند. با بررسی تأثیر تغییر سرعت گرمایش و انجام آنالیز XRD، می‌توان چگونگی تأثیر آن را بر تغییرات فازی و ساختاری مورد ارزیابی قرار داد. به همین ترتیب، انجام تجزیه حرارتی در محیط‌های گازی مختلف (مانند هوا، نیتروژن یا آرگون) و بررسی محصولات حاصل با استفاده از XRD، می‌تواند نقش اتمسفر را بر مکانیسم تجزیه آشکار سازد. در نهایت، اگر از مواد افزودنی یا کاتالیزورهایی به منظور تغییر رفتار حرارتی ماده استفاده شود، XRD می‌تواند برای بررسی اثرات آن‌ها بر ساختار و فازهای تشکیل‌شده به کار گرفته شود و بدین ترتیب، تأثیر عوامل گوناگون بر فرآیند تجزیه حرارتی مورد مطالعه قرار گیرد(Khan,et al, 2020).

2-1-6- آنالیز FT-IR

آنالیزFT-IR، یا طیف‌سنجی فروسرخ با تبدیل فوریه، ابزاری توانمند است که ما را در شناسایی دگرگونی‌های شیمیایی که در جریان تجزیه حرارتی رخ می‌دهند، یاری می‌رساند FT-IR، طیفی از میزان جذب یا عبور نور فروسرخ توسط نمونه را ارائه می‌دهد. این طیف، حاوی اطلاعات ارزشمندی در خصوص گروه‌های عاملی موجود در ساختار ماده است. با بررسی طیف FT-IR نمونه، پیش و پس از اعمال حرارت در دماهای گوناگون، می‌توان تغییرات ایجاد شده در گروه‌های عاملی را مشاهده نمود. همچنین، با مقایسه‌ی طیف‌های FT-IR در دماهای مختلف، می‌توان تحولات شیمیایی نظیر شکل‌گیری یا حذف گروه‌های عاملی جدید، تغییر در ساختار شیمیایی از طریق جابه‌جایی یا تغییر شدت پیک‌ها را رصد کرد. در پاره‌ای از موارد نیز، می‌توان با تحلیل طیف FT-IR ، محصولات حاصل از تجزیه را شناسایی نموده، مکانیسم واکنش را تعیین و پایداری حرارتی ماده را مورد ارزیابی قرار داد(Friese et al, 2020) .

3- یافته ها

3-1- نتایج حساسیت به ضربه و اصطکاک

پس از آماده‌سازی نمونه‌های مورد نظر، آن‌ها به آزمایشگاه جهت انجام تست‌های حساسیت به ضربه و اصطکاک منتقل شدند تا میزان پایداری و ایمنی آن‌ها در برابر این عوامل ارزیابی گردد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها که به ترتیب در جداول 1 و 2 ارائه شده‌اند، نشان می‌دهند که نمونه‌ی دوم با شناسه‌ی (A_2)، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، از بالاترین سطح ایمنی برخوردار بوده و کمترین میزان حساسیت را در برابر ضربه و اصطکاک از خود نشان داده است. این یافته‌ی مهم، نمونه‌ی (A_2) را به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای انجام آنالیزهای حرارتی تکمیلی معرفی می‌نماید، زیرا اطمینان حاصل می‌شود که این نمونه در طول فرآیندهای حرارتی مورد بررسی، از پایداری لازم برخوردار بوده و خطرات احتمالی ناشی از حساسیت به ضربه و اصطکاک به حداقل می‌رسد. به این ترتیب، انتخاب نمونه‌ی (A_2) به عنوان اولویت برای آنالیزهای حرارتی، گامی اساسی در جهت کسب نتایج دقیق و قابل اعتماد خواهد بود.

جدول1- حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک

کد نمونه	حساسیت به ضربه	حساسیت به اصطکاک

A_2(40/60)	سقوط وزنه 5 کیلوگرمی در ارتفاع 30 سانتی متری (14.7 ژول)	240 N بدون جرقه و نور

جدول2- مقادیر میزان اصطکاک محاسبه شده بر اساس درصدهای مختلف HMX

نیروی اعمال شده (برحسب کیلوگرم)	فرمولاسیون	دانسیته (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	سختی
5000	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	1/56	56
	HMX ریز به درشت 50 /50 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	1/54	56
7000	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	1/63	58
	HMX ریز به درشت 50 /50 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	1/61	57

59	1/67	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	8000
57	1/66	HMX ریز به درشت 50 /50 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	
62	1/678	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	9000
61	1/68	HMX ریز به درشت 50 /50 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	
63	1/701	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	10000
63	1/69	HMX ریز به درشت 50 /50 (92%) DOA (6%) Viton (2%)	
65	1/717	HMX ریز به درشت 60 /40 (92%) DOA (6%)	11000

		(2%) Viton	
64	1/702	HMX ریز به درشت 50 (92%) 50/ (6%) DOA (2%) Viton	

بررسی‌های حساسیت به ضربه که با 30 بار تکرار انجام شد، نشان داد که سقوط یک وزنه دو کیلوگرمی از ارتفاع 40 سانتی‌متری، نیرویی معادل 15 ژول را اعمال می‌کند. این میزان نیرو، در مقایسه با HMX خالص (با حساسیت 7.4 ژول)، نمایانگر کاهش چشمگیر 198.6 درصدی در حساسیت به ضربه است. افزون بر این، نتایج آزمایش‌های حساسیت به اصطکاک حاکی از آن است که این ماده تحت نیروی اصطکاکی 24 کیلوگرم-نیرو (معادل 240 نیوتون) واکنش نشان می‌دهد، در حالی که HMX خالص به نیروی 120 نیوتون حساس است. این امر بیانگر کاهش 200 درصدی در حساسیت به اصطکاک می‌باشد. بنابراین، می‌توان اذعان نمود که پوشاندن ماده منفجره HMX با الاستومر اکریلیک وایتون، به طور مؤثری از میزان حساسیت آن در برابر ضربه و اصطکاک می‌کاهد. نتایج به وضوح گویای کاهش قابل توجه در هر دو نوع حساسیت این ماده می‌باشند.

3-2- نتایج آنالیزهای مشخص‌یابی

3-2-1- بررسی نتایج آنالیز FT-IR

بر اساس شکل1 و 2 و3 ارائه شده از آنالیز FT-IR ماده وایتون، طیف حاصل، الگوهای جذبی منحصربه‌فردی را در نواحی مختلف طول موج نشان می‌دهد که بازتاب‌دهنده پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی موجود در ساختار پلیمری وایتون است. شدت و موقعیت پیک‌های جذبی، اطلاعات ارزشمندی در مورد نوع و فراوانی این پیوندها ارائه می‌دهد. با بررسی دقیق این طیف می‌توان اثرات متقابل وایتون با سایر مواد موجود در نمونه را نیز مورد ارزیابی قرار داد.

۱. پیک‌های شاخص HMX در ترکیب: NO_2 Stretching (نیترو گروه): $1520cm^{-1}$:کشش نامتقارن NO_2 (پیک شدید و مشخصه اصلی HMX) و $1350cm^{-1}$: کشش متقارن NO_2 (پیک شدید دوم). N-N Stretching (پیوند نیتروژن-نیتروژن): cm^{-1} 950–1050: کشش پیوند N-N در ساختار حلقوی HMX (پیک‌های متوسط). C-N Stretching

(پیوند کربن-نیتروژن): $1250\ cm^{-1}$: کشش پیوند C-N (ممکن است با پیک‌های Viton همپوشانی جزئی داشته باشد).

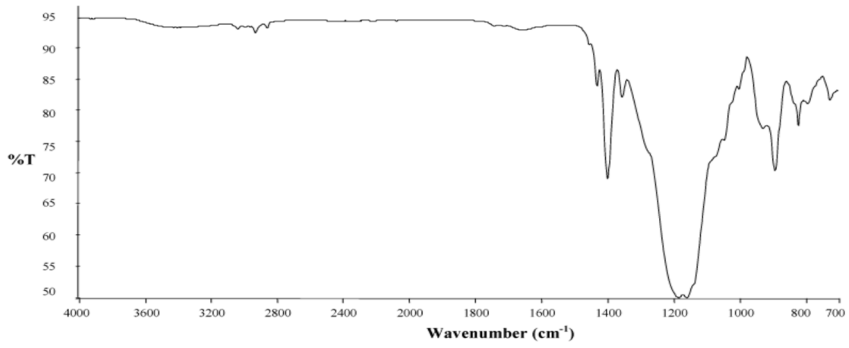
۲. پیک‌های شاخص Viton در ترکیب: C-F Stretching (پیوند کربن-فلوئور): cm^{-1} 1150–1250: پیک‌های قوی و پهن مربوط به کشش C-F (مشخصه اصلی Viton). و cm^{-1} 700–800: کشش خمشی C-F (پیک‌های ضعیف‌تر). C-H Stretching (پیوند کربن-هیدروژن): cm^{-1} 2900، کشش C-H (اگر بخش‌های غیرفلورینه در Viton وجود داشته باشد).

۳. تغییرات و تأثیرات ترکیب HMX/Viton: کاهش شدت پیک‌های HMX، پیک‌های NO_2 (cm^{-1} 1520و 1350) N -N و (cm^{-1}) 1000 با شدت کمتری نسبت به HMX خالص مشاهده میشوند (به دلیل رقیق سازی توسط Viton).

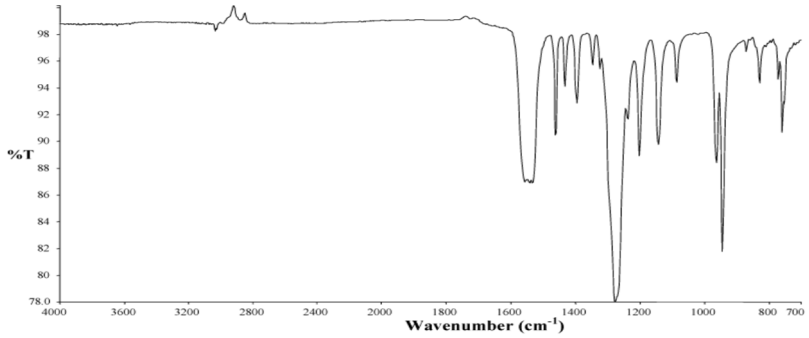
افزایش پیک‌های C-F: پیک‌های قوی در محدوده cm^{-1} 1150–1250 و cm^{-1} 700–800نشان‌دهنده حضور Viton در ترکیب هستند. پیک C-N درHMX $1250cm^{-1}$ ممکن است با پیک‌های C-F Viton $1250\ cm^{-1}$همپوشانی جزئی داشته باشد که منجر به پیک پهنتر در این ناحیه میشود.

2-2-3- بررسی ناخالصی‌ها یا واکنش‌ها

عدم وجود پیک‌های جدید: اگر پیک‌های غیرمنتظرهای در محدوده cm^{-1} 1600-1750 (مربوط به C=O یا O-H) دیده نشود، نشان‌دهنده عدم تجزیه یا واکنش شیمیایی بین HMX و Viton است. بنابراین، با توجه به وضوح پیک‌های مشخص شده، نتایج حاصل از آنالیز قابل اعتماد و معنادار خواهند بود.



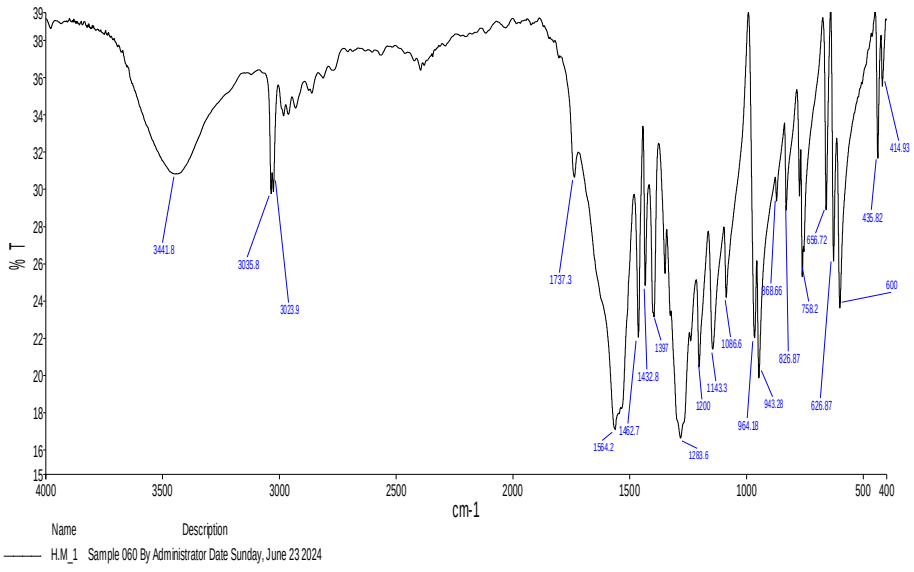
شکل1- آنالیز FT-IR برای ماده Viton (Mattos,et al, 2009)



شکل2- آنالیز FT-IR برای ماده HMX (Mattos,et al, 2009)

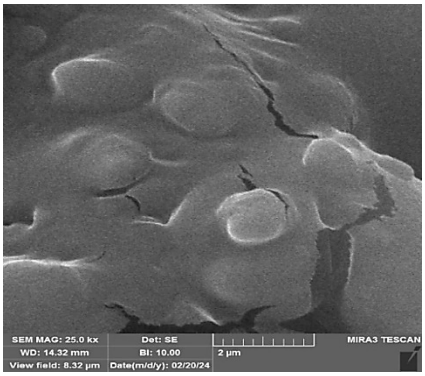
3-2-3- بررسی نتایج آنالیز SEM[1] جهت موفقیت آمیز بودن مورفولوژی سطح

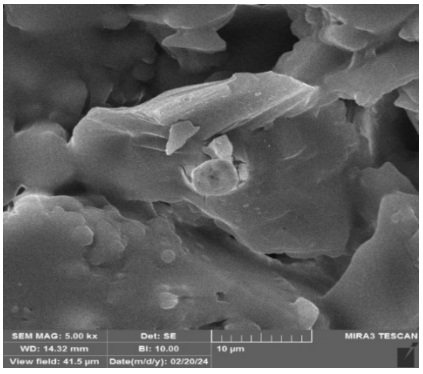
بیش از آنکه به بررسی ویژگی‌های حرارتی، جنبشی و ترمودینامیکی نمونه بپردازیم، انجام آنالیز SEM برای ارزیابی کیفیت پوشش پلیمری در میان ساختار ماده منفجره HMX و اطمینان از ایجاد ایمنی لازم، امری ضروری است. همان‌طور که در شکل4 مشاهده می‌شود، سطح HMX در بزرگنمایی‌های مختلف مورد تصویربرداری قرار گرفته است. بررسی سطح نمونه با استفاده از SEM، پوشش مناسب و اتصال مؤثر ذرات جامد در زمینه پلیمری را به منظور تأمین ایمنی نشان می‌دهد و تجمع و پیوند ذرات به خوبی قابل مشاهده است.

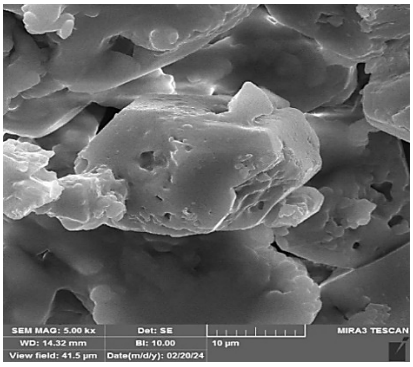


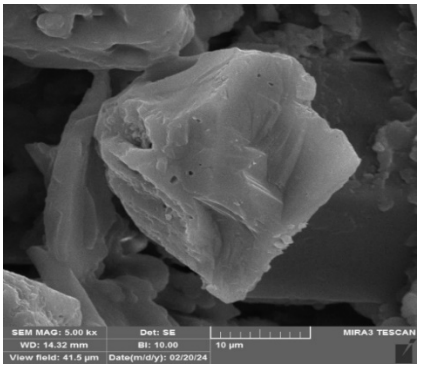
[1] Scanning Electron Microscopy

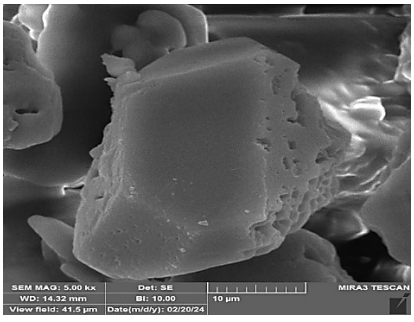
شکل 3- آنالیز FT-IR ماده HMX/VITON

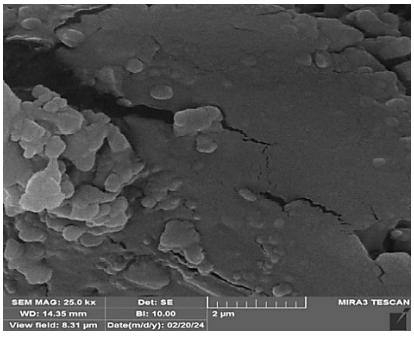


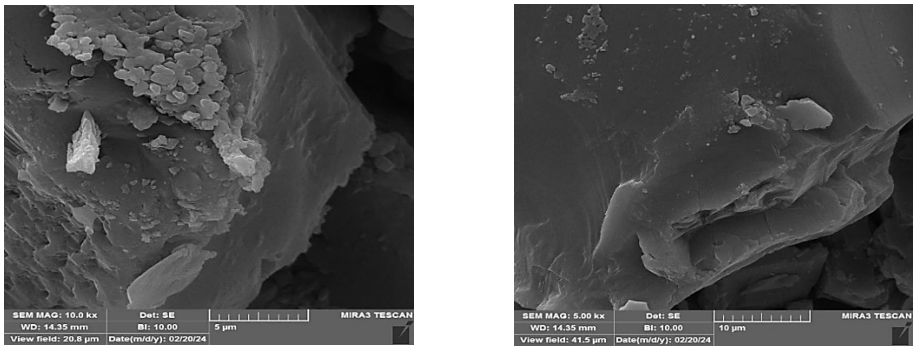












شکل4-تصاویر SEM نمونه‌های HMX پوشش‌داده‌شده

3-2-4- نتایج آنالیز XRD

پراش اشعه ایکس برای مطالعه ساختار کریستالی ذرات تهیه شده است . شکل5 نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت مبتنی بر HMX پیک‌هایی را در زوایای پراش مشابه HMX خام نشان می‌دهد، اما به‌علاوه تعدادی پیک پراش غیرقابل شناسایی به دلیل افزودن Viton است. نانوکامپوزیت پیک های پراش غیرقابل شناسایی به دلیل افزودن وایتون می‌باشد. تفسیر آنالیز به شرح ذیل است:

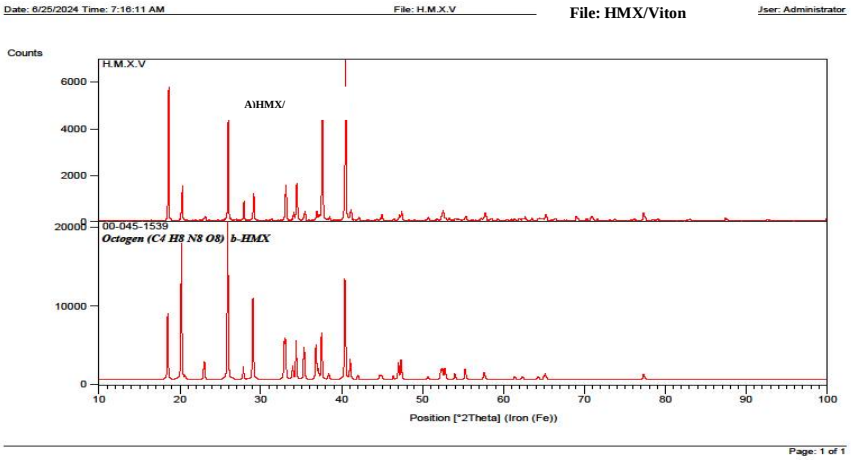
1-ساختار کریستالی: HMX (Octogen) به فرم بتا (β-HMX) شناخته میشود که پایدارترین فاز کریستالی این ماده است.

پیک‌های شاخص: پیک‌های اصلی XRD برای β-HMX معمولاً در زوایای زیر مشاهده میشوند (مقادیر تقریبی 2θ): °14.5 (شدیدترین پیک، مربوط به صفحه کریستالی (020))، ° 16.2 (صفحه (022))، ° 24.1 (صفحه (220))، ° 29.5 (صفحه (131)). شدت پیک‌ها: در داده ها، بیشترین شدت (20000 Counts) احتمالاً مربوط به پیک اصلی (~14.5°) است. پیک‌های دیگر با شدت‌های 6000، 4000، 2000، و 1000 Counts ممکن است به ترتیب به زوایای ذکرشده مرتبط باشند.

2. الگوی بالا (ترکیب HMX و Viton): تأثیر Viton یک پلیمر آمورف (غیرکریستالی) است، بنابراین انتظار میرود، کاهش شدت پیک‌های HMX به‌دلیل رقیق‌سازی نمونه و افزایش پس‌زمینه (Background) در الگوی XRD به دلیل طبیعت آمورف Viton.

پیک‌های جدید: اگر Viton حاوی ناخالصی‌های کریستالی (مثلاً پرکننده ها) باشد، ممکن است پیک‌های ضعیفی در محدوده ~18° تا ° 25 (2θ) ظاهر شوند. تغییرات در پیک‌های HMX: پیکهای اصلی HMX (مثلاً° 14.5و °16.2) همچنان مشاهده میشوند، اما با شدت کمتر (مثلاً 10000

Counts به جای 20000). عدم وجود داده های دقیق θ2: در داده های ارائه شده، مقادیر دقیق زوایای پیک‌ها مشخص نیستند. تفسیر فوق بر اساس مقادیر استاندارد β-HMX و Viton انجام شده است. آهن (Fe): ذکر "Position [°2Theta] (Iron (Fe))" ممکن است نشان‌دهنده استفاده از آنود آهن در دستگاه XRD یا وجود ناخالصی آهن در نمونه باشد. پیک‌های آهن معمولاً در° 44.5 و °65 (θ2) ظاهر میشوند. در نتیجه الگوی HMX خالص: پیک‌های تیز و شدید در زوایای مشخص (° 14.5، ° 16.2، °24.1 و °29.5) نشان دهنده ساختار کریستالی β-HMX است. الگوی ترکیبی HMX/Viton: کاهش شدت پیک‌های HMX و افزایش پس زمینه به دلیل حضور Viton. پیک‌های HMX همچنان غالب هستند، اما با شدت کمتر می‌باشد. علاوه بر این، شکل 5 نشان می‌دهد.و مطابق مطالعات یان وانگ و همکاران(Wang,et al, 2013) الگوهای مشابه‌ای و تطابق خوبی بین نتایج مشاهده شد.



شکل 5- الگوی پراش اشعه ایکس HMX/Viton (A، وB) HMX

4- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش جامع، به کنکاش آزمایشگاهی در زمینه ارتقای سطح ایمنی ماده منفجره پرکاربرد HMX با روند کپسوله‌سازی از طریق به‌کارگیری هوشمندانه پلیمر وایتون پرداخته شده است. هدف اصلی این مطالعه، دستیابی به درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیرگذاری این پلیمر بر خواص ایمنی HMX و ارائه یک راهکار عملی برای کاهش خطرات ناشی از کاربری آن بوده است. به منظور تحقق این هدف، مجموعه‌ای از پیشرفته‌ترین فنون تحلیلی و مشخصه‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. در فاز نخست این تحقیق، در ابتدا نمونه‌های HMX/Viton با نسبت 98/2 و نسبت‌های مختلف HMX ریز به درشت 50/ 50 و40/60 تهیه شد. در ادامه با انجام تست اصطکاک و ضربه نمونه سوم (40/60)

به عنوان نمونه منتخب انتخاب شد، نتایج حساسیت به ضربه در سقوط وزنه 5 کیلوگرمی در ارتفاع 30 سانتی متری (14.7 ژول) وحساسیت به اصطکاک در 240 N بدون جرقه و نور می‌باشد. طیف‌های FT-IR نیز به شناسایی گروه‌های عاملی موجود در نمونه‌ها و بررسی تغییرات پیوندهای شیمیایی در اثر حضور پلیمر کمک کرده و بدین ترتیب، ماهیت برهم‌کنش‌های سطحی را روشن‌تر ساختند. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تصویربرداری دقیق از سطح ذرات HMX و ارزیابی کیفیت و یکنواختی پوشش پلیمری استفاده شد. تصاویر SEM به دست آمده، به وضوح نمایانگر تشکیل یک لایه محافظتی منسجم از پلیمر وایتون بر روی ذرات HMX بوده و مؤید توزیع مناسب آن در سطح ماده منفجره می‌باشند. این کپسوله‌سازی پوشش‌دهی و مؤثر، به عنوان یک عامل کلیدی در کاهش حساسیت ضربه‌ای و اصطکاکی HMX و در نتیجه، افزایش ایمنی آن تلقی می‌گردد. در ادامه، برای بررسی تغییرات ساختاری و شیمیایی ناشی از اعمال پوشش پلیمری، از روش‌های پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FT-IR) بهره گرفته شد. نتایج حاصل از آنالیز XRD، تغییرات احتمالی در ساختار کریستالی HMX پس از پوشش‌دهی را مورد ارزیابی قرار داده و اطلاعاتی در مورد برهم‌کنش‌های احتمالی بین پلیمر و سطح ذرات HMX ارائه نمود. داده‌های به دست آمده از این آنالیزها، به طور کلی، مؤید ایجاد یک ساختار ترکیبی مطلوب با افزایش قابل توجه در سطح ایمنی ماده منفجره HMX می‌باشند.

5- منابع

Wang, G., Wu, Y., Yang, K., Xia, Q., & Huang, F. (2024). Optimization of mechanical and safety properties by designing interface characteristics within energetic composites. Defence Technology, 42, 59-72.

Chen, P., Xie, H., Huang, F., Huang, T., & Ding, Y. (2006). Deformation and failure of polymer bonded explosives under diametric compression test. Polymer testing, 25(3), 333-341..

Guo, H., Luo, J. R., Shi, P. A., & Xu, J. G. (2014). Research on the fracture behavior of PBX under static tension. Defence Technology, 10(2), 154-160.

Gagliardi, F. J., & Cunningham, B. J. (2008). Creep testing plastic-bonded explosives in uni-axial compression (No. LLNL-CONF-402307). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).

Connors, S. C. (2014). The Effects of Gamma Radiation on a PBX containing TATB and the fluoropolymer FK-800.

Yan, Q. L., Zeman, S., & Elbeih, A. (2012). Recent advances in thermal analysis and stability evaluation of insensitive plastic bonded explosives (PBXs). Thermochimica acta, 537, 1-12.

Maeno, T., & Fukunaga, K. (1994). Space Charge Measurement in a Double-Layer Insulator using the High Resolution PEA System. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 115(1), 58-58

Dunlap, M., & Adaskaveg, J. E. (1997). Introduction to the scanning electron microscope. Theory, practice, & procedures. Facility for Advance Instrumentation. UC Davis, 52.

Khan, H., Yerramilli, A. S., D'Oliveira, A., Alford, T. L., Boffito, D. C., & Patience, G. S. (2020). Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD. The Canadian journal of chemical engineering, 98(6), 1255-1266.

Friese, M. A., Banerjee, S., & Mangin, P. J. (2020). FT-IR Spectroscopy. Surface analysis of paper, 119 141.

Mattos, E. C., Diniz, M. F., Nakamura, N. M., & Dutra, R. D. C. L. (2009). Determination of polymer content in energetic materials by FT-IR. Journal of Aerospace Technology and Management, 1(2), 167-175.

Wang, Y., Jiang, W., Song, X., Deng, G., & Li, F. (2013). Insensitive HMX (octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine) nanocrystals fabricated by high-yield, low-cost mechanical milling. Central European Journal of Energetic Materials, 10(2), 277-287.