

نشریه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست

سال اول، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، (پیاپی ۲): صص ۵۹-۵۳

علمی

مطالعه طول عمر ایمن یک ماده منفجره پلیمری به روش وانت هوف

احمد ملائی^{۱*}، نعمت مشمول^۲، مهدی فرج زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

چکیده

مطالعه تغییرات حساسیت و ایمنی مواد ناریه در زمان انبارداری طولانی مدت عملاً بسیار مشکل است. به همین خاطر این مواد را در شرایط کهولت تسریع یافته در دمای بالا مورد بررسی قرار می دهند. ترکیبات پرانرژی حاوی نرم کننده های پرانرژی از خانواده نیترات استر، نسبتاً ناپایدار هستند و در صورت نگهداری طولانی مدت در معرض تغییرات فیزیکی و شیمیایی قابل توجهی قرار می گیرند. در این مطالعه به منظور بررسی تغییر خواص یک نمونه خراج انفجاری حاوی نرم کننده پرانرژی پروپیلن گلیکول دی نیترات (PGDN)، پارامترهای ایمنی مختلفی از جمله حساسیت به ضربه، حساسیت به اصطکاک و پایداری حرارتی در دمای 60°C و به مدت ۵ ماه اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، حساسیت به ضربه فرمولاسیون تغییرات سینوسی داشته و از الزام خارج نمی شود. در مقابل حساسیت به اصطکاک نمونه افزایش یافته و همچنین پایداری حرارتی تحت خلأ کاهش قابل توجهی داشته است. برای محاسبه طول عمر ایمن فرمولاسیون، ابتدا انرژی فعال سازی به روش کسینجر و با استفاده از داده های DSC اندازه گیری شد که مقدار آن 135 kJ/mole بوده و در مرحله بعد با در نظر گرفتن زمان خروج نمونه از الزامات ایمنی، طول عمر به روش وانت هوف محاسبه شد. طول عمر خراج انفجاری بر اساس داده های حساسیت به اصطکاک و پایداری حرارتی تحت خلأ به ترتیب ۷۶ و ۷۱ سال می باشد.

کلید واژه ها: طول عمر، ایمنی، حساسیت، پایداری حرارتی، ماده منفجره پلیمری.

^۱ دکتری نانو شیمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران - (akhazaie@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

^۲ پژوهشگر، کارشناس ارشد پیشرا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ پژوهشگر کارشناس ارشد شیمی تجزیه، سازمان جهاد خودکفائی سپاه، تهران، ایران

۱- مقدمه

حالت کهولت تسریع یافته را به شرایط استاندارد نگهداری خرج (دمای محیط) تبدیل کند. برای این منظور تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده که تمامی آن‌ها برگرفته از مدل آرنیوس است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مدل وانت‌هوف^۲ (معادله ۱) دقیق‌ترین و رایج‌ترین روش می‌باشد [۴].

$$t_E [y] = t_T [d] F^{\frac{T_T - T_E}{\Delta T_F}} \cdot \frac{1}{365.25} \quad (1)$$

در این رابطه، t_E زمان کهولت طبیعی برحسب سال، T_E دمای کهولت طبیعی برحسب درجه سلسیوس، t_T زمان کهولت تسریع یافته برحسب روز، T_T دمای کهولت تسریع یافته برحسب درجه سلسیوس، پارامتر F فاکتور سنجش یا فاکتور تغییر نرخ واکنش برای 10°C تغییر دما (معمولاً بین ۲ و ۵ می‌باشد) و ΔT_F بازه دمایی برای مقدار واقعی F است. مقدار فاکتور سنجش F تابعی از انرژی فعال‌سازی (E_a) فرآیند کهولت است. بنابراین برای تعیین شرایط کهولت تسریع یافته باید ابتدا فاکتور سنجش F را محاسبه کرد. جهت تعیین این فاکتور می‌توان از رابطه آرنیوس استفاده نمود. در رابطه آرنیوس، فاکتور سنجش همان نسبت ثوابت سرعت واکنش به ازای هر 10°C تغییر دما است [۴].

$$\ln \left[\frac{t_2}{t_1} \right] = \ln F = - \frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (2)$$

که در اینجا t_1 و t_2 مدت زمان ماند در دمای کهولت T_1 و T_2 (بر حسب کلون) می‌باشند. برای تعیین فاکتور سنجش نیاز به تعیین انرژی فعال‌سازی (E_a) بر حسب J/mole می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای تعیین انرژی فعال‌سازی مواد پرانرژی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های آنالیز حرارتی (نظیر DSC) و آزمون DMA یا DMTA اشاره کرد [۴].

در سال ۱۹۵۶ کسینجر روش مدل، آزاد غیرهمدمای را برای ارزیابی پارامترهای سینتیکی ارائه کرد [۵]. این روش یکی از معروف‌ترین روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای سینتیکی از طریق آنالیز حرارتی است. به این صورت که ابتدا چند میلی‌گرم نمونه واکنش‌دهنده با سرعت‌های مختلف گرمایش (β) حرارت می‌بیند و پیک واکنش گرمای آن ثبت می‌شود [۶].

سپس انرژی فعال‌سازی از طریق رسم منحنی $\ln(\beta/T_p^2)$ نسبت به $1/T_p$ برای تعدادی آنالیز که در β مختلف انجام شده، به دست می‌آید. در اینجا T_p دمای پیک در منحنی DSC است [۵].

$$\ln \left(\frac{\beta}{T_p^2} \right) = \ln \left(\frac{AR}{E_a} \right) - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3)$$

کهولت در مواد پرانرژی، شامل تغییر در خواص شیمیایی یا فیزیکی آن با گذشت زمان است. این پدیده طی افزایش دما با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. مکانیسم‌های کهولت در پیشراندها و مواد منفجره پلاستیکی (PBX) عمدتاً وابسته به ویژگی بانداری است که در اتصال با فیلر کریستالی ماده منفجره است. در PBXها کهولت می‌تواند ناشی از مکانیسم‌هایی چون اکسیداسیون بایندر، تخریب بایندر، مهاجرت گونه‌ها، پدیده‌های سطحی ذرات جامد و جدایش ذرات فیلر باشد. این مکانیسم‌ها عمدتاً بر خواص فیزیکی، مکانیکی، عملکردی و ایمنی فرمولاسیون تأثیر می‌گذارند [۱].

دما، اکسیژن، تابش الکترومغناطیس (عمدتاً UV)، فشار هوا و شوک بر سرعت کهولت تأثیرگذار هستند [۲].

مواد منفجره پلیمری^۱ (PBX) شامل فرمولاسیون‌هایی است که در آنها اجزای پرانرژی در یک بایندر لاستیکی قرار می‌گیرند. از این مواد به‌طور روز افزونی در سرجنگی‌ها استفاده می‌شود. اغلب از بایندهای پلی‌بوتادی‌ان (نظیر HTPB) در این ترکیبات استفاده می‌شود. لذا تخریب این فرمولاسیون‌ها مشابه پیشراندهای جامد مرکب بوده و به صورت افزایش در خواص شکنندگی و ترک می‌باشد. در مواردی که از نرم‌کننده پرانرژی در فرمولاسیون استفاده می‌شود، مکانیسم کهولت از طریق تخریب اکسایشی بایندر تحت تأثیر گازهای حاصل از تجزیه حرارتی نرم‌کننده است. ایجاد گازهای NO_x بر ایمنی فرمولاسیون اثر منفی دارد [۳].

روش‌های بسیار متنوعی برای بررسی کهولت فرمولاسیون‌های پرانرژی وجود دارد. در واقع هر ویژگی فرمولاسیون می‌تواند معیاری برای ارزیابی کهولت آن باشد. در اسناد استاندارد STANAG-4666 و AOP-64 روش‌هایی جهت تست و ارزیابی کهولت تسریع یافته ترکیبات PBX قابل ریخته‌گری و پخت بر پایه بایندهای خنثی و پرانرژی پیشنهاد شده است. اندازه‌گیری سطح باقیمانده آنتی‌اکسیدان، اندازه‌گیری بخش محلول یا چگالی کراس‌لینک، اندازه‌گیری مقدار نرم‌کننده، بررسی خواص مکانیکی، آنالیز مکانیکی دینامیکی، ارزیابی ویژگی‌های حرارتی و آزمون‌های حساسیت از جمله راه‌های بررسی کهولت فرمولاسیون‌های پرانرژی است [۱].

به منظور تخمین طول عمر ماده منفجره پلیمری بر مبنای کهولت تسریع یافته، با استفاده از نتایج آنالیزهای فیزیکی مکانیکی نیاز به یک مدل ریاضی است تا نتایج بدست آمده در

^۲ Vant Hoff^۱ Polymer Bonded Explosive

همچنین سازگاری اجزاء یک ترکیب چند جزئی انجام می‌شود. در این تحقیق آزمون VST مطابق استاندارد MIL-STD-1751A انجام شد [۹].

۲-۲- معرفی فرمولاسیون‌ها و روش تهیه آن

فرمولاسیون PBX تهیه شده از نوع قابل ریخته‌گری و پخت بر پایه بایندر پلی‌اتیلن گلیکول حاوی نرم‌کننده پرانرژی PGDN می‌باشد. الزامات ایمنی تعریف شده برای این فرمولاسیون به صورت زیر می‌باشد:

- حساسیت به ضربه: $12 \text{ N.m} >$
- حساسیت به اصطکاک: $8 \text{ kg.F} >$
- پایداری حرارتی تحت خلأ: $0.5 \text{ ml/g} <$

ترکیب درصد اجزای این فرمولاسیون در جدول (۱) آمده است. برای تولید نمونه‌های ۳ کیلوگرمی خرج مورد نظر، ابتدا بایندر PEG، نرم‌کننده PGDN و عامل پیوندی MAPO پس از توزین با دقت ۰/۰۱ گرم، درون ظرف همزن دوپروانه‌ای به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای 65°C با یکدیگر مخلوط شدند. سپس به آن پودر آلومینیوم و آمونیوم پرکلرات کلاس ۹ اضافه شد و مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه دیگر بهم‌زده شد.

در ادامه دما تا 70°C افزایش یافته و بخشی دیگری از بار جامد شامل RDX و آمونیوم پرکلرات ریز در دو مرحله مجزا به مخلوط حاصل اضافه گردید. اختلاط هر یک از این اجزا به مدت ۱۵ دقیقه ادامه داشت. پس از آن مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه تحت خلأ بهم‌زده شد.

در پایان عامل پخت تولوئن‌دی‌ایزوسیانات به مخلوط اضافه شد. مخلوط نهایی پس از ۲۰ دقیقه اختلاط در دمای 60°C و اعمال شرایط خلأ ۰/۸ bar در ۱۰ دقیقه انتهایی، درون قالب‌های ساخته شده با فویل آلومینیم ریخته‌گری شد. پس از ریخته‌گری، قالب‌ها در شرایط پخت در دمای 50°C قرار گرفتند.

جدول (۱): ترکیب درصد فرمولاسیون PBX تهیه شده.

ترکیب درصد	نقش	ماده اولیه
۵/۴۶	بایندر پلیمری	پلی‌اتیلن گلیکول ۴۰۰۰
۷/۵	نرم‌کننده	پروپیلن گلیکول دی‌نیترات
۰/۰۴	عامل پیوندی	MAPO
۲۰	سوخت	پودر آلومینیوم
۱۰	اکسید کننده	آمونیوم پرکلرات ریز
۱۰	اکسید کننده	آمونیوم پرکلرات کلاس ۹
۴۶	ماده منفجره	RDX کلاس ۱
۱	عامل پخت	تولوئن دی‌ایزوسیانات

در این تحقیق طول عمر ایمن یک نمونه خرج انفجاری PBX حاوی نرم‌کننده پرانرژی نیترات استر محاسبه شد. برای این منظور نمونه در دمای 60°C تحت کوهلت تسریع‌یافته قرار گرفت و طول عمر آن پس از خروج خواص الزامات ایمنی شامل حساسیت به ضربه و اصطکاک و همچنین پایداری تحت خلأ با استفاده از رابطه وانت هوف محاسبه شد.

۲- روش تحقیق

۱-۲- مواد اولیه و تجهیزات

به منظور تهیه فرمولاسیون پیش‌رانه، از پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) با جرم مولکولی ۴۰۰۰ گرم بر مول به عنوان بایندر پلیمری استفاده شد. پودر آلومینیم استفاده شده دارای خلوص بالای ۹۸٪، شکل کروی و متوسط اندازه ذرات ۲۰ میکرون بوده است. اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات با دو دانه‌بندی ریز ($40 \mu\text{m}$)، درشت (کلاس ۹) و عامل پیوندی تریس (۱-۲-متیل) آزیریدینیل) فسفین اکساید (MAPO) و RDX کلاس ۱ حاوی نرم‌کننده دی‌اکتیل آدیپات (DOA) از صنعت تهیه شدند.

پروپیلن گلیکول دی‌نیترات (PGDN) در نقش نرم‌کننده پرانرژی استر نیترات با خلوص ۹۸٪ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین عامل پخت در این فرمولاسیون، تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI) با خلوص ۹۹/۲٪ بوده است.

فرایند تولید خرج PBX در یک همزن دو پروانه‌ای با چرخش سیاره‌ای و دارای حجم مفید ۵ لیتر با ظرف دوجداره و امکان ایجاد خلأ جهت اختلاط مواد اولیه انجام شد. پس از اختلاط مواد، خمیر PBX در آون الکتریکی با دقت دمایی 0.1°C و ساخت شرکت ممرت آلمان پخت شد. کوهلت تسریع‌یافته فرمولاسیون در همین آون و در دمای 60°C انجام شد.

اندازه‌گیری حساسیت به ضربه به روش BAM و طبق استاندارد NATO STANAG 4489 انجام شد [۷]. در این آزمون از وزنه‌های ۱ و ۵ کیلوگرمی استفاده شد. حساسیت به اصطکاک مطابق استاندارد NATO STANAG 4487 انجام شد. در این روش بیشترین نیروی قابل اعمال بر نمونه ۳۶ kg.F است [۸].

در آزمون پایداری حرارتی تحت خلأ (VST)، نمونه‌ها (به وزن تقریبی ۵ گرم) به مدت ۴۸ ساعت در دمای 100°C تحت خلأ قرار گرفتند و در پایان حجم گاز خارج شده از نمونه در واحد ml/g اندازه‌گیری شد. این آزمون برای ارزیابی پیرشدگی مواد و

¹ Tris(1-[2-methyl]aziridinyl) phosphine oxide

² Memmert

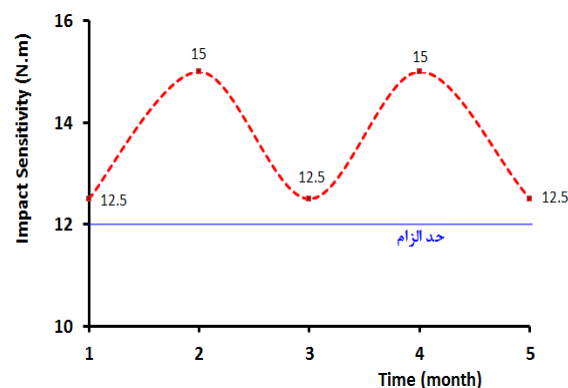
۳- نتایج و بحث

این تحقیق با هدف بررسی طول عمر ایمن نمونه خرج تهیه شده انجام گرفت. پارامترهای مختلفی از جمله حساسیت به ضربه، حساسیت به اصطکاک و پایداری حرارتی تحت خلأ این فرمولاسیون پس از پخت و طی شرایط کهولت تسریع یافته در دمای 60°C مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در بخش‌های زیر آمده است.

۳-۱- تغییرات حساسیت به ضربه

یکی از پارامترهای تعیین کننده در طول عمر ایمن خرج مورد نظر، حساسیت به ضربه است. حساسیت نمونه در پایان هر ماه نگهداری در شرایط کهولت تسریع یافته اندازه گیری شد. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، روند تغییرات حساسیت به ضربه در ۵ ماه اول بصورت سیسنوسی بوده است.

مقادیر بین $12/5$ تا 15 نیوتون متر متغیر است. اندازه گیری‌ها نشان داد که طی این مدت، فرمولاسیون به لحاظ حساسیت به ضربه از مقدار الزام (12 N.m) خارج نشده است. به عبارتی دیگر مقدار حساسیت از حد الزام کمتر نشده است.

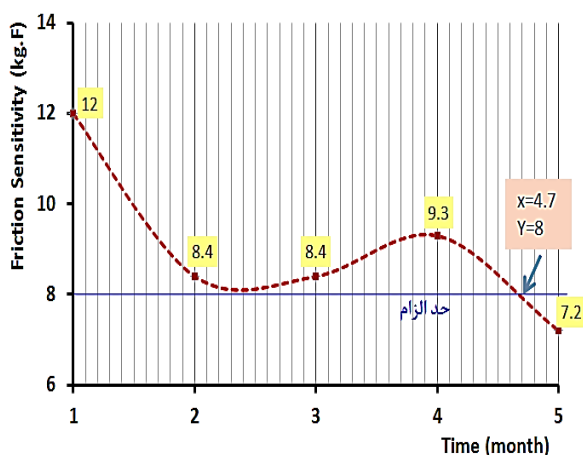


شکل (۱): تغییرات حساسیت به ضربه خرج PBX طی کهولت تسریع یافته.

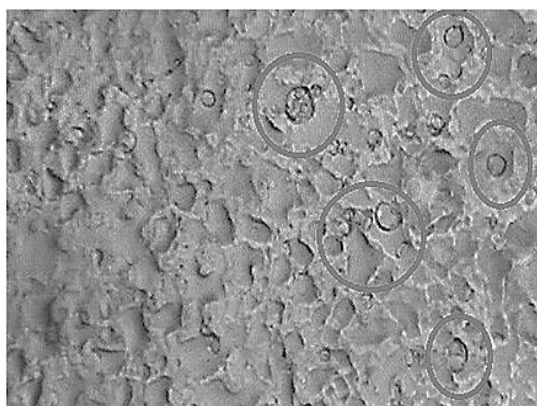
۳-۲- تغییرات حساسیت به اصطکاک

طبق الزام کاربر، مقدار حساسیت به اصطکاک فرمولاسیون نباید کمتر از 8 kg.F باشد. بر اساس آزمون‌های انجام شده در طول زمان کهولت تسریع یافته، مقدار حساسیت به اصطکاک مطابق شکل (۲) روندی کاهشی داشته است.

این نتیجه ممکن است مربوط به مهاجرت نرم کننده و خروج آن از مجاورت بار جامد باشد (شکل ۳). نتایج نشان داد که نمونه پس از گذشت ۴ ماه نگهداری در دمای 60°C از حد الزام خارج می‌شود. برازش نمودار مربوطه زمان $4/7$ ماه (141 روز) را برای خروج از الزام نشان می‌دهد.



شکل (۲): تغییرات حساسیت به اصطکاک PBX طی کهولت تسریع یافته.



شکل (۳): سطح نمونه PBX پس از اعمال شرایط کهولت تسریع یافته.

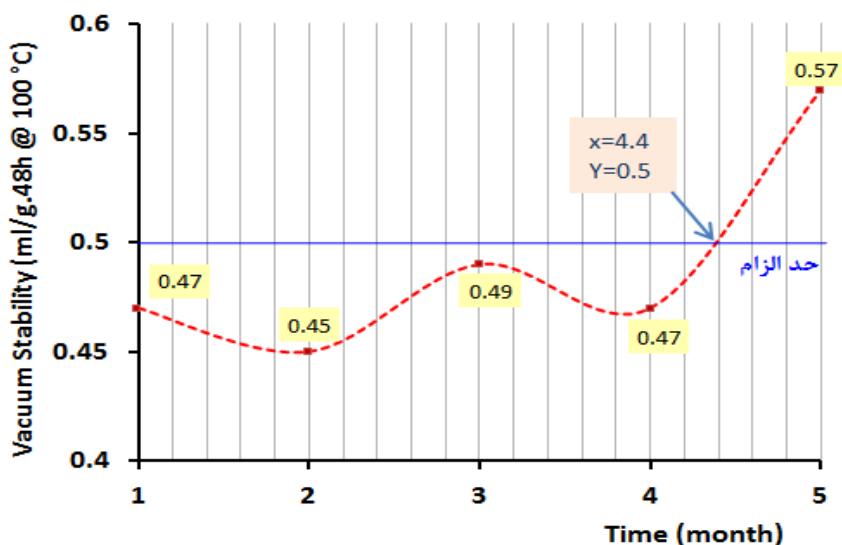
۳-۳- تغییرات پایداری حرارتی تحت خلأ

آزمون پایداری تحت خلأ^۱ برای ارزیابی پیرشدگی مواد و همچنین سازگاری اجزاء یک ترکیب چند جزئی انجام می‌شود. در واقع این آزمون معیاری از وجود ناخالصی‌های ناپایدار در ماده‌ی پرنرژتی است [۱۰].

نتایج آزمون پایداری تحت خلأ برای خرج مورد نظر در شکل (۴) آمده است. همان‌طور که پیش از این گفته شد، الزام خرج PBX در این آزمون، $0/5\text{ ml/g.48h @ }100^{\circ}\text{C}$ است. به عبارتی دیگر، پس از ۴۸ ساعت قرارگیری این فرمولاسیون در دمای 100°C درجه سلسیوس و تحت خلأ، مقدار گازی که از هر یک گرم نمونه خارج می‌شود نباید بیشتر از $0/5$ میلی لیتر باشد.

نتایج اندازه گیری‌ها نشان داد که نمونه پس از گذشت ۴ ماه نگهداری در دمای 60°C از حد الزام خارج می‌شود. برازش نمودار مربوطه زمان $4/4$ ماه (132 روز) را برای خروج از الزام نشان می‌دهد.

¹ Vacuum Stability Test (VST)

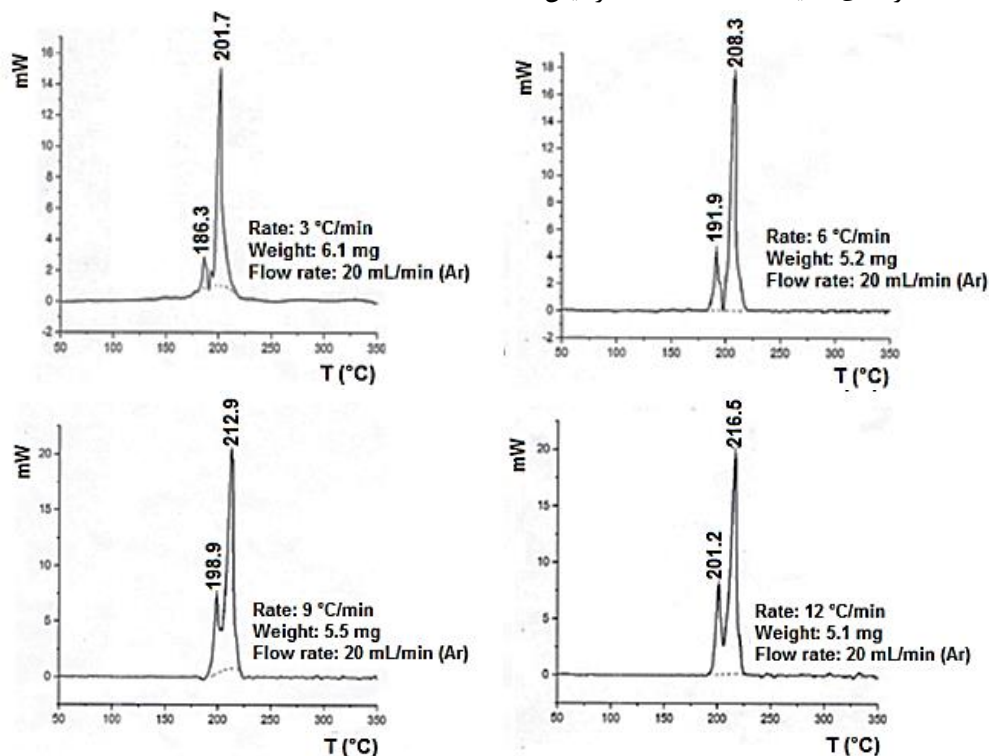


شکل (۴): تغییرات پایداری حرارتی تحت خلأ PBX طی کپولت تسریع یافته.

قرار گرفت. طیف‌های به دست آمده در شکل (۵) ارائه شده‌اند. در این طیف‌ها، پیک گرماده مربوط به تجزیه حرارتی نرم‌کننده پیرانرژی PGDN در دمای پایین‌تر ($186/3^{\circ}\text{C}$) برای نرخ گرمایش ($3^{\circ}\text{C}/\text{min}$) مشاهده می‌شود. پیک بعدی و چسبیده به آن ($201/7^{\circ}\text{C}$) برای نرخ گرمایش ($3^{\circ}\text{C}/\text{min}$) مربوط به تجزیه RDX است. پیک دمای تجزیه PGDN به عنوان ورودی برای حل پارامترهای سینتیکی و محاسبه انرژی فعال‌سازی استفاده می‌شود.

۳-۴- محاسبه طول عمر

همان‌طور که پیش از این گفته شد، برای محاسبه طول عمر ابتدا بایستی انرژی فعال‌سازی را بدست آورد. در این تحقیق، انرژی فعال‌سازی به روش کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) اندازه‌گیری شد. به عبارتی دیگر سینتیک تجزیه حرارتی PBX تحت شرایط غیر هم‌دمای بررسی شد. پس از گذشت زمان یک‌ماهه Pre-condition، حدود ۵ mg از نمونه با نرخ گرمایش (β) مختلف ($3, 6, 9, 12^{\circ}\text{C}/\text{min}$) از دمای محیط تا 350°C تحت گرمایش



شکل ۵- طیف‌های DSC نمونه PBX با نرخ گرمایش مختلف.

در ادامه طول عمر را می‌توان برای هر پارامتر الزام‌شده محاسبه کرد. بایستی دقت داشت که کمترین زمان خروج از الزامات، مبنای سنجش طول عمر است. زمان خروج از الزامات حساسیت به اصطکاک و پایداری حرارتی تحت خلأ به ترتیب در روزهای ۱۴۱ و ۱۳۲ است. حال طول عمر را با معادله وانت‌هوف (رابطه ۱) می‌توان محاسبه کرد.

جدول (۳): مقادیر محاسباتی طول عمر خرج PBX.

طول عمر (سال)	F	t_d (روز)	پارامتر	T_E (°C)	T_T (°C)
۷۶	۴/۵۲۷	۱۴۱	حساسیت به اصطکاک	۲۵	۶۰
۷۱	۴/۵۲۷	۱۳۲	پایداری تحت خلأ	۲۵	۶۰

بر اساس اطلاعات این جدول، طول عمر خرج PBX مورد نظر ۷۱ سال است. به عبارتی دیگر، پایداری تحت خلأ پس از گذشت ۷۱ سال در دمای محیط (۲۵ °C) از الزام خارج می‌شود. دیگر پارامترهای خرج دیرتر از این پارامتر از محدوده مجاز الزام خارج می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این طرح، طول عمر ایمن یک نمونه خرج PBX حاوی نرم‌کننده نیترات استر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه جهت کهنولت تسریع یافته در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. نتایج نشان داد که با گذشت زمان خواص حساسیتی و پایداری حرارتی فرمولاسیون افت می‌کند. پایداری حرارتی تحت خلأ زودتر از پارامترهای دیگر چون حساسیت به اصطکاک و ضربه از الزام خارج می‌شود. تجزیه نرم‌کننده پراثری و خروج گازهای حاصل از فرمولاسیون در شرایط کهنولت می‌تواند دلیل این پدیده باشد. بر اساس محاسبات صورت گرفته و طبق معادله وانت‌هوف، طول عمر این خرج ۷۱ سال برآورد شده است.

۵- مراجع

- [1] H. Yaman, V. Celik, "Experimental Investigation of the Factors Affecting the Burning Rate of Solid Rocket Propellants"; Fuel, vol. 115, pp. 794-803, 2014.
- [2] C. W. Fong, R. F. Smith, "The Effect of Binder, Particle Size and Catalyst on the Burning Rates of PETN and RDX Composite Propellant"; Combustion Science Technology, vol. 57, pp. 1-15, 1988.
- [3] L. V. Kakumanu, N. Yadav, S. Karmakar, "Combustion Study of Composite Solid

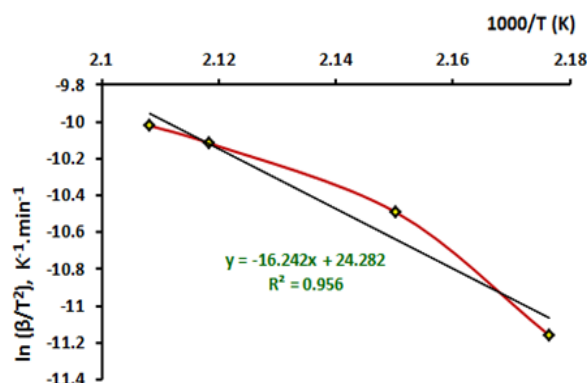
مطابق این شکل‌ها در نرخ‌های گرمایشی کمتر، زمان بیشتری برای تفکیک دمایی فراهم شده و به همین خاطر بخش عمده PGDN در دماهای پایین‌تر تجزیه می‌شود.

دمای شروع دمای پیک (T_{Peak}) و همچنین گرمای نرمالیزه شده تجزیه PGDN از هر آنالیز استخراج شده و مقادیر آنها در جدول (۲) ارائه شده است:

جدول (۲): اثر سرعت گرمایش بر دمای تجزیه حرارتی PGDN.

نرخ گرمایش (β), °C/min	T_{Peak} (°C)	T_{Peak} (K)
۳	۱۸۶/۳	۴۵۹/۴
۶	۱۹۱/۹	۴۶۵
۹	۱۹۸/۹	۴۷۲
۱۲	۲۰۱/۲	۴۷۴/۳

موقعیت پیک‌ها با افزایش نرخ گرمایش (β)، به سمت دماهای بیشتر جابجا می‌شود. با در اختیار داشتن اطلاعات جدول فوق، پارامترهای سینتیکی تجزیه حرارتی PBX با روش کسینجر مطابق رابطه (۸) قابل محاسبه است. برای این منظور ابتدا باید نمودار $\ln\left(\frac{\beta}{T_f^2}\right)$ را نسبت به $\frac{1}{T_f}$ رسم و از روی شیب منحنی حاصل، E_a را محاسبه کرد. منحنی مربوطه در شکل (۶) نشان داده شد.



شکل (۶): نمودار کسینجر برای محاسبه انرژی فعال‌سازی PBX.

رفتار نسبتاً خطی نمودار بدست آمده تأیید می‌کند که تجزیه حرارتی PBX مطالعه شده از نوع درجه اول است. با در اختیار داشتن شیب منحنی و روابط موجود، مقدار انرژی فعال‌سازی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$E_a = -(R \times Slope) = -(8.314 \times (-16.242)) = 135.0 \text{ kJ/mol}$$

حال می‌توان فاکتور F را بر اساس رابطه (۲) محاسبه کرد. در این رابطه T_1 و T_2 به ترتیب ۳۲۳ و ۳۲۳ کلوین می‌باشد.

$$\ln F = -\frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] = -\frac{135000}{8.314} \left[\frac{1}{333} - \frac{1}{323} \right] = 1.51$$

$$\rightarrow F = e^{1.51} = 4.527$$

- [7] NATO STANAG 4489, Explosives, Impact Sensitivity Test(s).
- [8] NATO STANAG 4487, Friction Sensitivity Tests for the Qualification of Explosives for Military Use.
- [۹] .۹ "اکتوژن (HMX) - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون"، ویرایش اول، استاندارد دفاعی ایران، پیش‌نویس ۱۹۵، ۱۳۸۶.
- [10] R. Meyer, J. Kohler, A. Homburg, "Explosives", 6th Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- Propellants Containing Metal Phthalocyanines"; International Journal of Aerospace Science, vol. 3(2), pp. 31-36, 2014.
- [4] K. Kishore, V. R. Verneker, M. R. Sunitha, "Effect of Catalyst Coccentration on Burning Rate of Composite Solid Propellant"; ARC, vol. 15(11), pp. 1649-1656, 2012.
- [5] K. Kishore, M. R. Sunitha, "Mechanism of Catalytic Activity of Transition Metal Oxides on Solid Propellant Burning Rate"; Combustion and Flame, vol. 33, pp. 311-314, 1978.
- [6] A. Davenas, "Solid Rocket Propulsion Technology"; Pergamon press: Oxford, 1993.