

(علمی - ترویجی)

اثر کاتالیزور پخت DBTDL بر خواص مکانیکی بالستیکی یک آتشزنه کامپوزیتی

آتشزنه‌ها بخش مهمی از موتور هستند که سبب آغازش اشتعال گرین پیشرانه می‌شوند. در موتورهای بزرگ معمولاً از آتشزنه‌های کامپوزیتی تحت عنوان پایروژن استفاده می‌شود. آتشزنه‌های پایروژنی فرمولاسیونی مشابه پیشرانه‌های جامد مرکب دارند و نرخ سوزش آنها نسبتاً بالا است. در این تحقیق یک نمونه آتشزنه کامپوزیتی بر پایه رزین پلی‌بوتادی‌ان با انتهای هیدروکسی به روش ریخته‌گری-پخت تهیه شده و در آن اثر افزایش ۰/۰۲ درصد ترکیب آلی فلزی دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات در نقش کاتالیزور پخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری این جزء میزان سختی را حدود ۱۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، استحکام کششی به شدت افزایش یافته و درصد ازدیاد طول به مقدار حدوداً ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. به‌کارگیری کاتالیزور پخت تأثیر چندانی بر محدوده نرخ سوزش نداشته، ولی نمای فشار را از ۰/۳۵۳ به ۰/۳۸۳ افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آتشزنه، کاتالیزور پخت، دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات، خواص مکانیکی، نرخ سوزش

احمد ملانی^۱، استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)
 یحیی ابراهیم آبادی^{۲*}، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت
 نواب فتحی و محمدجواد ستوده^۳، کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

* نویسنده مخاطب، آدرس: رشت، کدپستی: ۴۱۴۷۶۵۴۹۱۹

Effect of DBTDL Cure Catalyst on Mechanical and Ballistic Properties of a Composite Igniter

Igniters are main sections of motor that initiate the ignition of propellant grain. Large motors usually use pyrogen composite igniters. Pyrogen igniters have similar formulation with solid composite propellants, but their burning rate is relatively high. In this research, a composite igniter, based on hydroxyl terminated poly-butadiene, prepared via cast-cure method and effects of 0.02 percent addition of dibutyltin dilaurate, as an organo-metallic cure catalyst, was investigated. Results show that applying the cure catalyst enhance hardness up to 15%. Tensile stress increases vigorously, but elongation reduces 50%. Applying the cure catalyst has also no significant effects on burning rate, but pressure index increases from 0.353 to 0.383.

Keywords: Igniter, Cure Catalyst, Dibutyltin Dilaurate, Mechanical Properties, Burning Rate

A. Mollaei¹, Assitant Professor, Imam Hossein University

Y. Ebrahim Abadi^{2*}, Ph.D. Student, Islamic Azad University, Rasht Branch

N. Fathi and M. J. Sotoodeh³, M.Sc., Imam Hossein University

*Corresponding Author, Postal Code: 4147654919, Rasht, IRAN
 yahya163460@gmail.com

www.SID.ir

علائم و اختصارات

Ammonium Perchlorate (AP)	آمونیم پرکلرات
Anti Oxidant (AO)	آنتی اکسیدان
Copper Chromite (CC)	کرومیت مس
Dibutyltin Dilaurate (DBTDL)	دی بوتیل تین دی لورات
Diocetyl Sebacate (DOS)	دی اکتیل سباکات
Extruded Double Base (EDB)	دوپایه اکسترودی
Ferric Acetylacetonate (FeAA)	فریک استیل استونات
Hydroxyl Terminated Poly-butadiene (HTPB)	پلی بوتادی ان با انتهای هیدروکسی
Triphenylbismuth (TPB)	تری فنیل بیسموت
Tris-1-(2-methyl Aziridyl) Phosphine Oxide (MAPO)	تریس-۱-(۲-متیل-آزیریدینیل) فسفین اکساید
Toluene Diisocyanate (TDI)	تولون دی ایزوسیانات
\bar{M}_n	متوسط عددی جرم مولکولی
m	نرخ جریان جرمی
n	نمای فشار

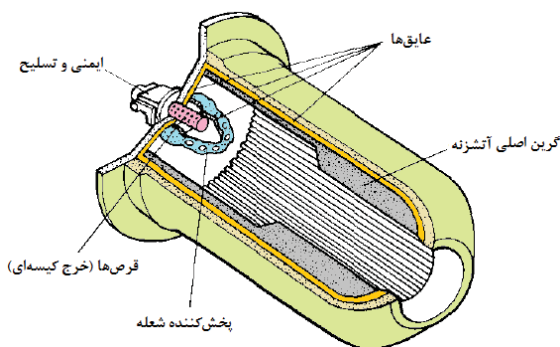
۱- مقدمه

آتشزنه‌ها به منظور شروع اشتعال گرین اصلی پیشرانه در موتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارتی دقیق‌تر، سیستم آتشزنه موجب افزایش فشار اولیه در محفظه موتور و تولید جریان گرمایی به شکل گازهای داغ و متراکم می‌شود [۱-۲]. برخی از آتشزنه‌ها نه تنها تولید گازهای داغ کرده، بلکه ذرات جامد و مایع داغ را نیز تولید می‌کنند که با تشعشع حرارت و هجوم آوردن به سطح گرین، زمینه را برای سوزش هر چه بهتر آن فراهم می‌کنند [۳].

موقعیت مکانی آتشزنه، نرخ جریان جرمی (\dot{m})، زمان عملکرد آتشزنه، هجوم ذرات و گازهای داغ آتشزنه بر سطح پیشرانه، هندسه گرین پیشرانه، حجم آزاد محفظه احتراق و اندازه گلویی نازل از جمله پارامترهایی است که بر اشتعال گرین پیشرانه اثر می‌گذارد [۳]. نرخ سوزش، دمای شعله و میزان کالری احتراق از مهم‌ترین مسائل طراحی آتشزنه‌ها محسوب می‌شود. همچنین، میزان فشار حاصل از احتراق آتشزنه نیز در احتراق موتور تأثیرگذار است که به نوع و وزن مواد بستگی دارد [۴].

آتشزنه‌ها بایستی به گونه‌ای طراحی و ساخته شود که به سرعت مقدار زیادی حرارت و گاز را برای پرشدن سریع فضای خالی گرین پیشرانه و ایجاد فشار جزئی در محفظه فراهم آورد. آغازش و عملکرد پایدار در بازه وسیعی از فشارها و سوزش هموار در فشار پایین بدون ایجاد موج پرفشار احتراق، شروع سریع اشتعال آتشزنه و تأخیر بسیار کم در اشتعال و حساسیت پایین نرخ سوزش به تغییرات دمایی و نمای پایین فشار در نرخ سوزش از دیگر خصوصیات یک آتشزنه می‌باشد [۵].

در آتشزنه موتورهای سوخت جامد کوچک و متوسط، عمدتاً از ترکیبات پیروتکنیکی نظیر باروت سیاه به‌عنوان منبع حرارت جهت اشتعال پیشرانه استفاده می‌شود [۴]. اما برای شروع اشتعال موتورهای بزرگ نظیر موشک‌های کالیبر بالا و ساتل‌های فضایی، نیاز به استفاده از یک گرین پیشرانه کوچک در نقش آتشزنه است (شکل ۱). این گرین بایستی سطح احتراق و سرعت سوزش بالایی داشته باشد. برای این منظور پیشرانه‌های دوپایه اکسترودی (EDB) و کامپوزیتی مناسب هستند [۳].



شکل (۱): اجزای سیستم آتشزنه برای موتورهای بزرگ [۳].

این آتشزنه‌ها به پایروژن^۱ معروف هستند و پایروژن در واقع یک موتور راکتی کوچک است که در یک محفظه ثابت می‌شود. فشار کاری این آتشزنه در حدود ۲۵,۰۰۰ psi است. آغاز

1. Pyrogen

تست‌ها برای فرمولاسیون‌های آتشزنه تهیه شده تحلیل شده و اثرات به‌کارگیری کاتالیزور DBTDL تشریح شده می‌شود.

۲- بخش تجربی

در این بخش به تشریح مواد اولیه و تجهیزات، تهیه فرمولاسیون، اندازه‌گیری چگالی، اندازه‌گیری سختی، آزمون استحکام کششی و آزمون نرخ سوزش پرداخته خواهد شد.

۲-۱- مواد اولیه و تجهیزات

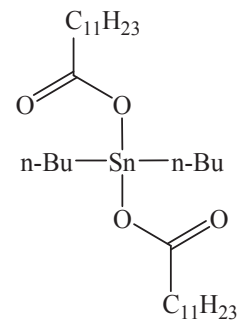
برای تهیه نمونه‌های آتشزنه کامپوزیتی، رزین HTPB با متوسط عددی جرم مولکولی $(\overline{M}_n) 3200 \pm 500$ g/mol و دمای انتقال شیشه‌ای $76/8$ - درجه سانتیگراد مورد استفاده قرار گرفت. پودر آلومینیم استفاده‌شده دارای خلوص بالای ۹۸ درصد، شکل کروی و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون بوده است. اکسیدکننده آمونیومپرکلرات (AP) با دو دانه‌بندی ریز $(40 \mu m <)$ و درشت $(250 \mu m <)$ و عامل پیوندی تری (۲-متیل-۱-آزیریدینیل) فسفین اکسید (MAPO) از صنعت تهیه شد. سایر مواد اولیه از جمله نرم‌کننده دی‌آکتیل سباتکات (DOS)، عامل پخت تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI)، کاتالیزور DBTDL و آنتی‌اکسیدان ۲، ۲' متیلن بیس (۴-متیل-۶-ترشیو بوتیل فنل) تولید شرکت مرک^۲ آلمان بود.

در فرایند تولید، وزن مواد اولیه با ترازوی دیجیتال مدل جی اف-۶۰۰ شرکت آند^۴ ژاپن با دقت ۰/۰۰۱ گرم و حداکثر کاربری ۶۱۰ گرم اندازه‌گیری شد. از یک همزن دو پروانه‌ای با چرخش سیاره‌ای و دارای حجم مفید ۲ لیتر با ظرف دوجداره و امکان ایجاد خلأ جهت اختلاط مواد اولیه استفاده شد. خمیر پیشرانه در آن الکتریکی با دقت دمایی ۰/۱ درجه سانتیگراد و ساخت شرکت میرت^۵ آلمان پخت شد. اندازه‌گیری چگالی محصول به روش غوطه‌وری و با بهره‌گیری از ترازوی متلر تولدو^۶ سوئیس مدل AS220/C/2 ساخت شرکت رادواگ^۷ انجام گرفت. برای اندازه‌گیری سختی از سختی‌سنج مدل جی-تی-جی-اس-اچ-بی^۸ ساخت شرکت گوٹک^۹ تابوان با قابلیت اندازه‌گیری در واحد Shore A و برای آزمون کشش از دستگاه تی سی اس-۲۰۰۰^{۱۰} همین شرکت استفاده شد.

اشتعال مداوم موتورهای بزرگ نیاز به شعله‌ای بسیار سریع همراه با ذرات داغ دارد که تنها از طریق پایروژن میسر است.

امروزه اکثر آتشزنه‌های کامپوزیتی پایروژنی، بر پایه رزین پلی‌بوتادی‌ان با انتهای هیدروکسی (HTPB) تهیه می‌شود. این آتشزنه‌ها همانند پیشرانه‌های دیگر شامل ۳ جزء اصلی بایندر پلیمری، اکسیدکننده معدنی و سوخت فلزی است. بنابراین، جدای از پارامترهایی چون نرخ سوزش و دمای شعله و میزان کالری، بایستی به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها هم توجه داشت. از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار بر خواص مکانیکی هر فرمولاسیون کامپوزیتی بر پایه رزین HTPB، نسبت ماتریس به بار جامد، دانه‌بندی بار جامد، نوع و مقدار عامل پخت، نوع و مقدار کاتالیزور پخت و میزان عوامل پیوندی به کار رفته در فرمولاسیون است.

یکی از ترکیبات مهم در فرمولاسیون‌های کامپوزیتی، کاتالیزورهای پخت هستند. دی‌بوتیل‌تین دی‌لورات (DBTDL)، تری‌فنیل‌بسموت (TPB) و فریک استیل استونات (FeAA) از کاتالیزورهای پخت رایج محسوب می‌شود [۶-۸]. در این بین، DBTDL (شکل ۲) به دلیل مایع بودن و امکان اختلاط راحت‌تر در فرمولاسیون بیشترین کاربرد را دارد. این ترکیب یک مایع روغنی‌شکل بی‌رنگ تا زرد کم‌رنگ است که دارای جرم مولکولی $631/6$ g/mole نقطه ذوب ۲۳-۲۴ و نقطه جوش ۲۰۵ درجه سانتیگراد می‌باشد [۹-۱۲].



شکل (۲): ساختار شیمیایی کاتالیزور پخت دی‌بوتیل‌تین دی‌لورات [۹] و [۱۳].

در این مقاله به بررسی اثر به‌کارگیری کاتالیزور پخت DBTDL بر خواص فیزیکی، مکانیکی و پیشرانسی یک نمونه آتشزنه کامپوزیتی بر پایه HTPB پرداخته شده است. در بخش تجربی این مقاله، به معرفی مواد اولیه و تجهیزات به کار رفته در تهیه فرمولاسیون و تست‌های کنترل کیفیت محصولات اشاره شده است. همچنین، روش ارزیابی محصول شامل تست‌های چگالی‌سنجی، اندازه‌گیری سختی، استحکام کششی و نرخ سوزش تشریح شده است. در بخش بعدی مقاله، نتایج این

- Merck
- GF-600
- AND
- Memmert
- Mettler Toledo
- RADWAG
- GTGSHB
- Gotech
- TCS-2000

۲-۲- تهیه فرمولاسیون

ترکیب درصد اجزای فرمولاسیون‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، در فرمولاسیون A از کاتالیزور پخت استفاده نشده و در فرمولاسیون B، ۰/۰۲ درصد وزنی کاتالیزور DBTDL اضافه شده و به همان میزان از مقدار نرم‌کننده دی‌اکتیل سباتات کاسته شده است.

جدول (۱): ترکیب درصد اجزای نمونه‌های تهیه شده.

ماده اولیه	نمونه A	نمونه B
HTPB	۱۱/۹۰	۱۱/۹۰
دی‌اکتیل سباتات (DOS)	۲/۵۳	۲/۵۱
کاتالیزور DBTDL	-	۰/۰۲
عامل پیوندی MAPO	۰/۱۳	۰/۱۳
پودر آلومینیوم (μm <math>< 5</math>)	۱۲	۱۲
آنتی‌اکسیدان (AO)	۰/۱۸	۰/۱۸
کربنات کلسیم	۰/۵	۰/۵
کرومیت مس (CC)	۳	۳
AP ریز (μm <math>< 40</math>)	۴۴	۴۴
AP درشت (μm <math>< 250</math>)	۲۵	۲۵
عامل پخت TDI	۰/۷۶	۰/۷۶

چگالی مطابق استاندارد ASTM D792-91 در دمای محیط و با استفاده از ترازوی تجزیه‌ای ارشمیدوس انجام شد. در این روش، چگالی طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{W_a}{W_b - W_c} \times D_w \quad (1)$$

که در آن، D دانسیته نمونه (برحسب g/cm^3), D_w دانسیته آب در دمای آزمون، W_a وزن نمونه در هوا یا وزن نمونه خشک، W_b وزن نمونه تر (اشباع) و W_c وزن نمونه در آب (وزن غوطه‌وری) را نشان می‌دهد. اختلاف W_b و W_c حجم نمونه را نشان می‌دهد. نمونه‌های استفاده شده به صورت مکعبی شکل با وزنی بالغ بر ۱۰ گرم بود. این آزمون ۳ بار برای هر فرمولاسیون تکرار و میانگین نتایج گزارش شد.

۲-۴- اندازه‌گیری سختی

تعیین میزان سختی Shore A نمونه‌ها مطابق دستورالعمل ASTM-D2240 انجام شد. قطعات مورد آزمایش به صورت مکعبی به ابعاد ۲ سانتیمتر و دارای سطحی صاف و تخت بودند. بر روی هر نمونه مورد آزمایش اندازه‌گیری در ۵ نقطه یا بیشتر تکرار می‌شود و این نقاط حداقل ۵ میلیمتر از یکدیگر فاصله دارند. در سختی‌سنج Shore A، یک فرو رونده با نوک تیز به وسیله یک فنر به طور عمودی بر سطح نمونه نیرو وارد می‌کند. میزان فرو رفتگی سوزن به سختی Shore وابسته است که بر روی یک صفحه مدرج عقربه‌ای قرائت می‌شود.

۲.۵. آزمون استحکام کششی

به منظور بررسی استحکام کششی، نمونه‌ها در روزهای ششم و نهم پخت از قالب جدا و با استفاده از کاتر لیزری به شکل نوارهایی با ضخامت ۱۲/۵ میلیمتر بریده شد. طول و عرض این نوارها بایستی به‌صورتی باشد که ابعاد دمیل مورد نیاز از آن قابل تهیه باشد. آزمون کشش براساس استاندارد نظامی MIL-E-82902 انجام شد و نمونه‌ها به کمک پانچ و دستگاه پرس مطابق با ابعاد ذکر شده در دستورالعمل رفتار مکانیکی پیشران‌های جامد جی-ای-ان-ان-ای-اف^{۱۱} برش شده است. این آزمون در هر سری بر روی ۳ نمونه آتشزنه کامپوزیتی و در دمای محیط، با سرعت کشش ۵۰ mm/min انجام شد.

۲.۶. آزمون نرخ سوزش

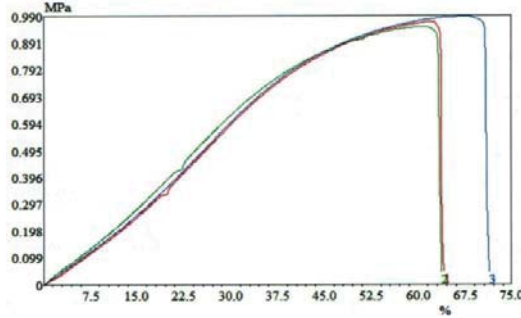
نرخ سوزش با استفاده از بمب کرافورد در فشارهای مختلف (۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۸۰ بار) و طبق روش 803.1.1 از استاندارد MIL-STD-286C در دمای 25 ± 3 درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد.

۲-۳- اندازه‌گیری چگالی

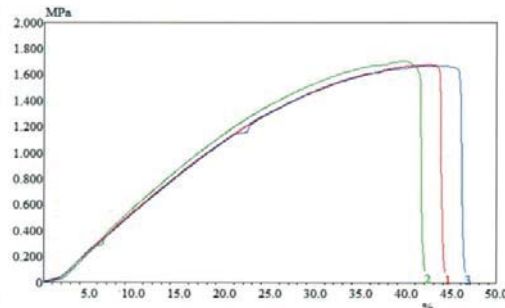
یکی از پارامترهای مهم کنترل کیفیت نمونه‌های کامپوزیتی، چگالی نمونه پس از پخت است. در این تحقیق اندازه‌گیری

11. Joint Army Navy Nasa Air Force (JANNAF)

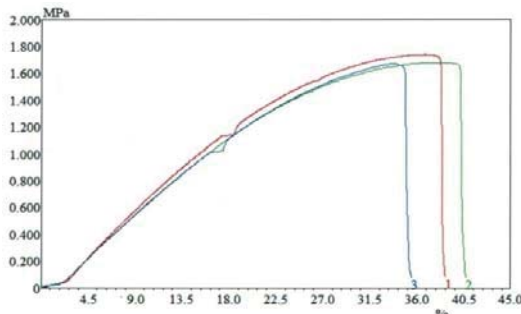
اثر کاتالیزور پخت DBTDL بر خواص مکانیکی بالستیکی یک آتشزنه کامپوزیتی



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش آتشزنه کامپوزیتی A در روز نهم پخت.



شکل (۲): نمودار تنش-کرنش آتشزنه کامپوزیتی B در روز ششم پخت.



شکل (۳): نمودار تنش-کرنش آتشزنه کامپوزیتی B در روز نهم پخت.

جدول (۲): مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده.

ماده اولیه	نمونه A	نمونه B
استحکام کششی روز ششم (MPa)	۰/۵۹۲	۱/۶۸۳
استحکام کششی روز نهم (MPa)	۰/۹۶۹	۱/۶۹۹
ازدیاد طول روز ششم (درصد)	۸۳/۲	۴۴/۲
ازدیاد طول روز نهم (درصد)	۶۶/۴	۲۸/۲

۳-۲- نتایج آزمون نرخ سوزش

نرخ سوزش نمونه‌ها مطابق استاندارد MIL-STD-286C در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشارهای مختلف اندازه‌گیری شد. مقادیر مربوط به نمونه‌های A و B در جدول ۳ ارائه شده است. نمودار لگاریتم نرخ سوزش به لگاریتم فشار برای نمونه‌های A

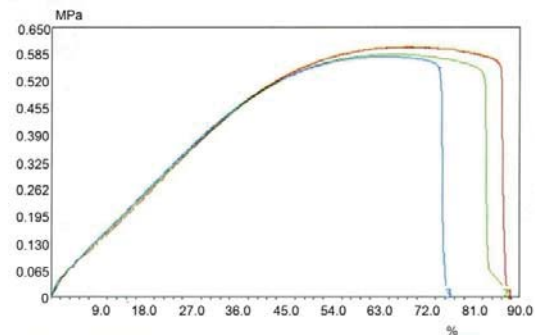
ابعاد نمونه‌های این آزمون به صورت ۱۵۰×۴×۴ میلی‌متر بوده است.

۳-۱- نتایج و بحث

در این بخش نتایج در دو قسمت خواص فیزیکی و مکانیکی محصول و نتایج آزمون نرخ سوزش مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی محصول

چگالی آتشزنه کامپوزیتی تهیه شده در هر دو نمونه در محدوده یکسان $1.753 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ بوده است. این مقدار چگالی نمونه با افزایش کاتالیزور پخت مشاهده نشد. مقدار سختی نمونه A (فاقد کاتالیزور DBTDL) در حدود Shore A ۵۸ و میانگین نتایج سختی نمونه B (حاوی کاتالیزور DBTDL) در حدود Shore A ۶۷ بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که به کارگیری کاتالیزور پخت موجب افزایش میزان سختی در حدود ۱۵ درصد می‌شود. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه آتشزنه کامپوزیتی A در روزهای ششم و نهم پخت، به ترتیب در شکل‌های ۳-۴ نشان داده شد. نتایج تکرارپذیری خوبی را نشان می‌دهند. براساس این نمودارها با گذشت زمان بر استحکام نمونه‌ها افزوده و از کرنش آنها کاسته می‌شود. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه آتشزنه کامپوزیتی B (حاوی ۰/۰۲ درصد DBTDL) در روزهای ششم و نهم پخت، به ترتیب در شکل‌های ۵-۶ نشان داده شده است. جمع‌بندی نتایج خواص مکانیکی در جدول ۲ آمده است. براساس این نتایج، استفاده از کاتالیزور پخت DBTDL در فرمولاسیون موجب افزایش سختی و استحکام کششی شده و از سویی دیگر موجب کاهش درصد ازدیاد طول نمونه می‌شود.



شکل (۳): نمودار تنش-کرنش آتشزنه کامپوزیتی A در روز ششم پخت.

۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که به کارگیری ۰/۰۲ درصد وزنی کاتالیزور پخت دی بوتیل تین دی لورات در فرمولاسیون نمونه آتشزنه کامپوزیتی، تغییرات مهمی در مشخصات مکانیکی و پیشرانشی-عملکردی ایجاد می کند. با افزایش این جزء، استحکام مکانیکی و سختی فرمولاسیون افزایش یافته، درحالی که از مقدار کرنش نمونه کاسته می شود. همچنین، نرخ سوزش تغییر جزئی (افزایش) داشته و مقدار نمای فشار به میزان ۸/۵ درصد بیشتر شده است.

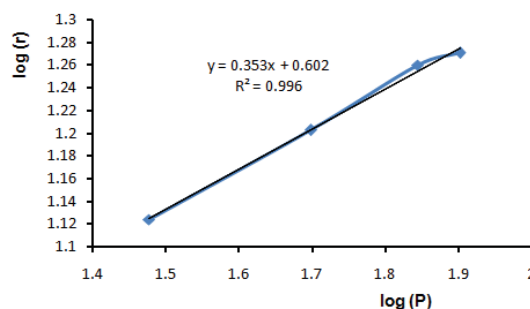
۵- مراجع

- [1] Engineering Design Handbook, Military Pyrotechnics Series, part 1, "Theory and Application", Headquarters, US Army Material Command Pamphlet, AMCP 706-185, 1967.
- [2] Sutton, G.P. *Rocket Propulsion Elements*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [3] Davenas, A. *Solid Rocket Propulsion Technology*, Pergamon Press, Oxford, England, 1993.
- [4] Apinhapt, P. and Pittayaprasertku, N. "Experimental Investigation on Pyrotechnic Igniter for Solid Rocket Motor", *The 5th International Conference on Chemical Engineering and Applications (IPCBE)*, Singapore, 2014.
- [5] Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 7th Edition, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [6] Hoffman, D.M., Hawkins, T.W., Lindsay, G.A., Wardle, R.B., and Manser, G.E., "Clean, Agile Alternative Binders, Additives, and Plasticizers for Propellant and Explosive Formulation", *UCRL-JC-119253*, Lawrence Livermore National Lab., California, USA, 1994.
- [7] Cailiao, H. "Effect of Bismuth-Containing Catalysts on HTPB Curing Kinetics", *Chinese Journal of Energetic Materials*, Vol. 23, No. 6, pp. 568-572, 2015.
- [8] Ou, Y., Jiao, Q., Yan, S., and Zhu, Y. "Influence of Bismuth Complex Catalysts on the Cure Reaction of Hydroxyl-terminated Polyether-based Polymer Bonded Explosives", *Central European Journal of Energetic Materials*, Vol. 15, No.1, pp. 131-149, 2018.
- [9] <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics1171.htm>
- [10] Merran, A.D., "Polyurethane Binder Systems for Polymer Bonded Explosives", *DSTO-GD-0492*, DSTO Defence Science and Technology Organization, Edinburgh, Australia, 2006.
- [11] Sax, I. and Lewis, R., *Condensed Chemical Dictionary*, 11th Ed., Von Nostrand Reinhold, New York, 1987.
- [12] Military Standard, "Dibutyltin Dilaurate", *DOD-D-82727 (OS)*, 1983.
- [13] Bina, C.K., Kannan, K.G., and Ninan, K.N., "DSC Study on the Effect of Isocyanates and Catalysts on HTPB Cure Reaction", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 78, 753-760, 2004.

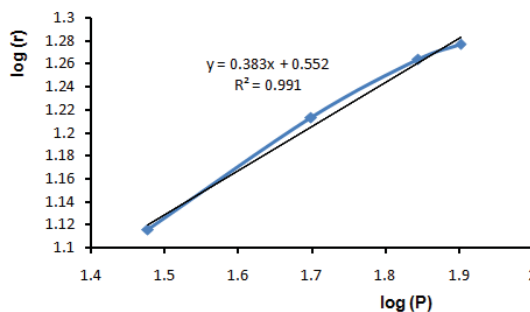
فاقد کاتالیزور (DBTDL) و B (حاوی کاتالیزور DBTDL) به ترتیب در شکل های ۸-۷ آمده است. بر این اساس نمای فشار (شیب منحنی) در حدود ۸/۵ درصد افزایش داشته است. اطلاعات در جدول ۴ آمده است.

جدول (۳): نرخ سوزش نمونه ها در فشار مختلف.

نرخ سوزش (mm/sec)		فشار نسبی (bar)
نمونه A	نمونه B	
۱۳/۳۰	۱۳/۰۵	۳۰
۱۵/۹۴	۱۶/۳۳	۵۰
۱۸/۱۸	۱۸/۳۵	۷۰
۱۸/۶۴	۱۸/۹۲	۸۰



شکل (۷): منحنی حساسیت فشاری نمونه فاقد کاتالیزور DBTDL.



شکل (۸): منحنی حساسیت فشاری نمونه حاوی کاتالیزور DBTDL.

جدول (۴): نرخ سوزش نمونه ها در فشار مختلف.

پارامتر	نمونه A	نمونه B
نمای فشار (n)	۰/۳۵۳	۰/۳۸۳
a	۳/۹۹۹	۳/۵۶۴
R ²	۰/۹۹۶	۰/۹۹۱