

مقایسه خواص پیشراندهای جامد مرکب

بر پایه HTPB و NHTPB/HTPB

میلاد قانع قره‌باغ^۱، عباس کبریتیچی^{۲*}، مهدی اشرفی^۳

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

(تاریخ وصول: ۹۷/۴/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۱۳)

چکیده

پلی‌بوتادیان با انتهای هیدروکسیل (HTPB) رایج‌ترین بایندر مورد استفاده در پیشراندهای جامد مرکب است اما به دلیل غیر پراثری بودن، به لحاظ عملکردی صرفاً یک جرم مرده محسوب می‌شود؛ بنابراین جایگزینی HTPB با یک پلیمر پراثری احساس می‌شود. در این پژوهش، از رزین پلی‌بوتادیان نیترودار شده با انتهای هیدروکسیل (NHTPB) با میزان نیتراسیون ۱۲/۲٪ به همراه رزین HTPB به‌عنوان بایندر بهره‌گرفته شد. بدین ترتیب، فرمولاسیون پایه پیشرانه HTPB (HB) تهیه شد و به‌عنوان نمونه شاهد، با دو فرمولاسیون پخت شده دیگر یعنی فرمولاسیون پیشرانه با نسبت ۵٪ NHTPB به ۹۵٪ HTPB (NH5) و فرمولاسیون پیشرانه با نسبت ۱۰٪ NHTPB به ۹۰٪ HTPB (NH10) از لحاظ خواص فیزیکی - مکانیکی، نرخ سوزش و حساسیت مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان NHTPB به HTPB از ۵٪ به ۱۰٪، مدول یانگ، نرخ سوزش و حساسیت به ضربه و اصطکاک نسبت به پیشرانه شاهد افزایش و چگالی اتصالات عرضی، میزان سختی و تنش بیشینه کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: پیشرانه جامد مرکب، رزین NHTPB، خواص فیزیکی - مکانیکی، نرخ سوزش، حساسیت به ضربه و اصطکاک.

Properties Comparison of Composite Solid Propellants Based on HTPB and NHTPB/HTPB

M. Qane Qarabagh, A. Kebritchi*, M. Asharafi

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 7/11/2018, Accepted: 11/4/2018)

Abstract

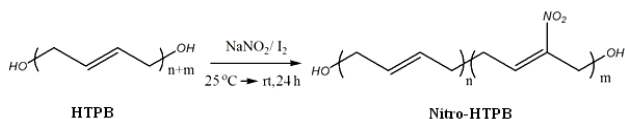
Hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB) is the most commonly used binder in composite solid propellants. However, due to its non-energetic characteristic, it is recognized as a dead weight in practice. Therefore, replacing HTPB with an energetic polymer is essential. In this research, nitrated hydroxyl terminated polybutadiene resin (NHTPB) with 12.2% nitration rate, in combination with HTPB resin was used as binder. Thus, the HTPB propellant base formulation (HB) was prepared as a reference sample and its physical-mechanical properties, burning rate, and sensitivity were compared with two other cured formulations: the propellant formulation with binder ratio of 5% NHTPB and 95% HTPB (NH5) and the other with binder ratio of 10% NHTPB and 90% HTPB (NH 10). The results showed that, with increasing NHTPB to HTPB ratio from 5% to 10%, Young's modulus, burning rate, impact, and friction sensitivities were increased in comparison to reference propellant. In addition, the cross-linking density, hardness, and tension were decreased

Keywords: Composite Solid Propellant, NHTPB Resin, Physical-Mechanical Properties, Burning Rate, Impact and Friction Sensitivity.

* Corresponding Author E-mail: a.kebritchi@ippi.ac.ir

۱- مقدمه

مورد توجه قرار گرفته است که در نیترودار کردن HTPB به کار می‌رود. در واقع این روش، منجر به سنتزی آسان و به‌دست آمدن محصولی خالص بدون تخریب زنجیر اصلی می‌شود [۸]. این روش سنتز پلی‌بوتادی‌ان نیترودار شده با انتهای هیدروکسیل (Nitro-HTPB یا NHTPB^2)، روشی تک مرحله‌ای با استفاده از سدیم نیتريت و ید است که در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].



شکل ۱- روش سنتز رزین NHTPB [۵].

استفاده هم‌زمان از HTPB و بایندهای پراثری در کنار یکدیگر جهت حفظ مزیت‌های هر دو ترکیب، رویکردی منطقی است. با این حال، بدیهی است که به دلیل ترکیب و قطبیت متفاوت آن‌ها، ممکن است در مواردی (مانند HTPB و پلی‌اترهای آزیدی) مخلوط به سمت جدایش فاز میل کند [۹]. سازگاری مناسب NHTPB با HTPB، این امکان را به ما می‌دهد که NHTPB را به همراه HTPB، به‌طور هم‌زمان به‌عنوان بایندهای فرمولاسیون پیش‌رانه جامد مرکب به کار برد.

اطلاعات مربوط به خواص رزین HTPB نیترو شده و خواص فیزیکی و شیمیایی پیش‌رانه آن رزین در جدول (۱) آورده شده و با خواص رزین HTPB و پیش‌رانه بر پایه آن مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که در بخش اول جدول (۱) مشاهده می‌شود در پی نیتراسیون رزین HTPB، وزن مولکولی میانگین عددی رزین به دلیل نشانندن گروه‌های عاملی نیترو و نیترات بر روی زنجیره آن، افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که به دنبال آن گرانی و چگالی رزین NHTPB به‌دست آمده نیز در مقایسه با رزین HTPB اولیه بالاتر است. در اثر نیتراسیون HTPB، محتوای هیدروکسیل رزین Nitro-HTPB برخلاف رزین HTPB یافته است. مطابق بخش دوم جدول (۱)، از سوی دیگر در پیش‌رانه‌های بر پایه NHTPB، وجود گروه‌های عاملی پراثری مانند نیترو و نیترات در ساختار NHTPB، در اغلب موارد منجر به افزایش سرعت سوزش (به دلیل بالا رفتن محتوای انرژی)، تضعیف خواص مکانیکی (به دلیل ایجاد مشکل در فرآیندپذیری در اثر افزایش گرانی و دوغاب پیش‌رانه) و افزایش حساسیت به ضربه و اصطکاک (به دلیل حضور گروه‌های C-NO₂) می‌شود.

در این پژوهش، به‌منظور حفظ خواص فیزیکی - شیمیایی، از بایندهای NHTPB با نیتراسیون حدود ۱۲٪ از پیوندهای دوگانه HTPB بهره گرفته شد.

پیش‌رانه‌های جامد مرکب، پلی‌بوتادی‌ان‌های دارای اتصالات عرضی هستند که مخلوطی از پیش‌پلیمر با وزن مولکولی پایین (بایندهای)، بار جامد و نرم‌کننده است [۱]. این ترکیبات علاوه بر مواد تأمین‌کننده اکسیژن مورد نیاز برای احتراق، حاوی مواد احتراقی جهت اشتعال با سازوکار سوزش سطحی نیز هستند [۲]. فرمولاسیون‌های پیش‌رانه‌های جامد مرکب عموماً شامل پیوند دهنده، نرم‌کننده، پرکننده پراثری، عامل پیوندی، عامل پخت، اصلاح‌گر نرخ سوزش و سایر موارد است. این افزودنی‌ها عموماً به‌منظور تأمین الزامات مکانیکی، پرتابی و ویژگی‌های مربوط به فرآوری پیش‌رانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].

پلی‌بوتادی‌ان با انتهای هیدروکسیل (HTPB^1) به‌عنوان سامانه بایندهای پیش‌رانه‌های جامد مرکب، به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه و مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. این بایندهای خنثی، ۱۰ الی ۱۵ درصد جرم ترکیبات پیش‌رانه را شامل می‌شود؛ بنابراین نیاز به جابه‌جایی این جرم بی‌اثر با یک پلیمر پراثری احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، پلیمرهای پراثری زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما استفاده از آن‌ها برخلاف پیش‌رانه‌های بر پایه HTPB، در زمینه‌هایی چون خواص مکانیکی مناسب، بارپذیری جامد بالا و سازگاری خوب با سایر اجزای پیش‌رانه موفقیت‌آمیز نبوده است. از این رو نیاز به یک پلیمر پراثری وجود دارد که علاوه بر بالا بردن محتوای انرژی، خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه با HTPB داشته باشد. اگر HTPB به‌طور مناسبی با گروه‌های پراثری عامل‌دار شود، انتظار می‌رود که با حفظ خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد HTPB، کارایی پیش‌رانه نیز بهبود یابد [۵]. دو روش ممکن برای سنتز پلیمرهای پراثری وجود دارد؛ روش اول که شامل پلیمری شدن مونومر پراثری است و روش دوم از طریق افزودن گروه پراثری به پلیمر خنثی که از قبل شکل گرفته است، انجام می‌شود که در سنتز HTPB پراثری شده، روش دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

تلاش‌ها برای معرفی گروه‌های پراثری مورد استفاده در پلیمرها با استفاده از روش‌های رایج مانند نیتراسیون با نیتريك اسید یا مخلوطی از اسیدها و نیز نیتراسیون به روش نیترومکروکراسیون - دمرکراسیون، منجر به تخریب زنجیر اصلی پلیمر و تشکیل اتصالات عرضی پلیمر با تشکیل مواد نامحلول شده است. یک مطالعه مقدماتی در رابطه با نیتراسیون با استفاده از دی‌نیتروژن پنتوکسید (N_2O_5) نشان داد که HTPB به‌طور مستقیم می‌تواند از طریق افزایش مولکول N_2O_5 به پیوند دوگانه کربن-کربن نیترو شده و در عین حال زنجیر اصلی دست‌نخورده باقی بماند [۷]. با این حال، این روش منجر به تخریب مقدار قابل توجهی از پیوندهای دوگانه زنجیر اصلی HTPB می‌شود. اخیراً یک روش جدید با استفاده از نیتربیل دیدید (NO_2I) به‌عنوان معرف فعال

نیتراسیون به روش گزارش شده در مراجع و با استفاده از نسبت مولی مختلف از نیتریل یدید انجام گرفت [۱۲، ۱۳، ۱۵ و ۱۶]. از جمله نوآوری‌های این پژوهش آن است که پس از حصول اطمینان از سازگاری کامل رزین HTPB (که منجر به خواص مکانیکی مطلوب در نمونه پیشرانه می‌شود) با رزین پرانرژی NHTPB (که خواص بالستیکی و احتراقی نمونه پیشرانه را بهبود می‌بخشد)، رزین NHTPB به همراه رزین HTPB در دو نسبت مختلف وزنی ۵٪ NHTPB به ۹۵٪ HTPB و ۱۰٪ NHTPB به ۹۰٪ HTPB به‌عنوان بایندر در فرمولاسیون پیشرانه جامد مرکب استفاده شد تا از مزایای هر دو رزین (خواص مکانیکی مطلوب به همراه بهبود خواص بالستیکی و احتراقی) به‌صورت هم‌زمان بهره گرفته شود. در ادامه، خواص فیزیکی - مکانیکی، نرخ سوزش و حساسیت به ضربه و اصطکاک برای پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB/NHTPB با خواص پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB (به‌عنوان پیشرانه شاهد) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

HTPB استفاده شده در این پژوهش (بخش فرمولاسیون) با میانگین عددی وزن مولکولی (M_n) ۳۰۹۰ gr/mol (اندازه‌گیری شده با آزمون کروماتوگرافی ژل تراوایی^۱) و عدد هیدروکسیل ۳۸/۲ mg KOH/gr از صنعت (شرکت آلدریج) تهیه شد. A.O.2246 و کلسیم کربنات از شرکت مرک تهیه شدند. NHTPB مورد استفاده در این پژوهش با میزان نیتراسیون ۱۲/۲٪ و میانگین عددی وزن مولکولی (M_n) ۳۱۴۳ gr/mol، تهیه شده از صنعت (شرکت آلدریج) سنتز شد. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده در فرمولاسیون از صنعت تهیه شد.

۲-۲- تجهیزات

تجهیزات مورد نیاز در فرآیند تولید پیشرانه جامد مرکب شامل همزن سیاره‌ای دو پره‌ای به همراه سامانه چرخش آب و سامانه خلأ، سامانه هدایت و کنترل از راه دور همزن، سامانه ریخته‌گری تحت خلأ، شیکر و آون است. چگالی پیشرانه جامد مرکب توسط ترازوی RADWAG مدل AS220/C/2 بر اساس استاندارد ASTM D792 اندازه‌گیری شد. آزمون‌های تنش و ازدیاد طول توسط دستگاه Gotech Universal Testing Machine مدل GT-TCS-2000 با سرعت کشش mm/min ۵۰ و بر اساس استاندارد ASTM-D412 انجام شد. آزمون سختی نیز بر اساس استاندارد Shore A و ASTM-D2240 انجام شد. نرخ سوزش با روش سوزش میله‌ای و توسط دستگاه بمب کرافورد^۲ بر اساس استاندارد MIL-STD-286C تحت اتمسفر نیتروژن تعیین گردید. همچنین

جدول ۱- اطلاعات مربوط به خواص رزین و پیشرانه بر پایه HTPB نیتره شده در مقایسه با خواص رزین و پیشرانه بر پایه HTPB اولیه.

ردیف	نام رزین	خواص رزین					وزن مولکولی میانگین عددی (g.mol ⁻¹)	نام رزین	ردیف
		دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	چگالی (g/cm ³)	عاملیت	محتوای هیدروکسیل (mg KOH/g)	گرانروی (cP)			
۱	Nitrated-HTPB	-	-	-	۷۰/۱	۳۴۰۰ (۳۰ °C)	۳۹۹۱	۱	۱۰
	HTPB	-	-	-	۴۰/۴	۴۴۰۰ (۳۰ °C)	۲۸۰۰		
۱۱	Nitrated-HTPB	-	۱/۱۹۵	۳/۲	-	۳۸۰۰ (۲۷ °C)	۲۸۰۰	۱۱	۱۱
	HTPB	-	۰/۹۰۱	۲/۳	-	۲۳۰۰ (۲۷ °C)	۲۶۰۰		
۵	Nitro-HTPB	-۶۱	-	۱/۸۲	۳۳	۲۷۰۰۰ (۳۰ °C)	۳۱۰۰	۵	۵
	HTPB	-	-	-	۴۴	-	۲۵۵۷		
۸	Nitro-HTPB	-۶۴	۱/۲۵۱	۱/۸۴	۳۳/۱	-	۳۱۲۰	۸	۸
	HTPB	-۷۳	۰/۹۳۰	۲/۲۲	۴۴/۷	-	۲۵۸۶		
۱۲	Nitro-HTPB	-۷۶/۹	۱/۱	-	-	۱۵۸۳۷ (۲۵ °C)	۵۶۱۴	۱۲	۱۲
	HTPB	-	-	-	-	۶۵۲۷ (۲۵ °C)	۵۲۵۲		
۱۴	HTPB-DNB	-	۱/۲۰	-	۴۰	۳۲۰۰ (۲۷ °C)	-۳۵۰۰	۱۴	۱۴
	HTPB	-	۰/۹۰	-	۵۰	۲۳۰۰ (۲۷ °C)	-۳۳۰۰		
ردیف	بایندر استفاده شده در پیشرانه	خواص پیشرانه						ردیف	
		خواص مکانیکی (۲۵ °C)			چگالی (g/cm ³)	سرعت سوزش (7MPa) (mm/s)	حساسیت		
مرجع	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)	مدول یانگ (MPa)	استحکام کششی (MPa)	اصطکاک (N)			ضربه (J)	مرجع	۱
[۱۰]	Nitrated-HTPB	-	-	-	-	۶۰	۱۰	۱۰	۱۰
	HTPB	-	-	-	-	۱۲۰	۷/۵		
[۱۱]	Nitrated-HTPB	۲/۸	۴۵	۰/۷۴	-	۸/۶	۸۴	۱۱	۱۱
	HTPB	۳/۱	۶۸	۰/۷۱	-	۶/۸	۹۵		
[۵]	Nitro-HTPB	-	-	-	-	-	-	۵	۵
	HTPB	-	-	-	-	-	-		
[۸]	Nitro-HTPB	۲/۶	۷۸	۰/۶۰	۱/۹۰	۱۰/۴۶	۸۷	۸	۸
	HTPB	۳	۷۴	۰/۶۹	۱/۷۹	۷/۲۰	۹۸		
[۱۲]	Nitro-HTPB	-	-	-	-	-	-	۱۲	۱۲
	HTPB	-	-	-	-	-	-		
[۱۴]	HTPB-DNB	-	-	-	-	۸/۳	۹۱	۱۴	۱۴
	HTPB	-	-	-	-	۶/۸	۹۵		

1- Gel Permeation Chromatography
2- Crawford Bomb

کشنده NO_2 ، ناپوشیده شده است. مقایسه انتگرال زیر منحنی در دو ناحیه اولفینی (ناحیه وینیل نیز در نظر گرفته شد) و ناحیه نیترواولفینی برای نمونه NHTPB، نشان می‌دهد که درصد نیتراسیون حدود ۱۲/۲٪ است. برخی مشخصات مربوط به رزین‌های استفاده شده در این پژوهش، در جدول (۲) گردآوری شده است.

جدول ۲- مقایسه خواص رزین NHTPB با خواص رزین HTPB.

مشخصه	HTPB	NHTPB
میانگین عددی وزن مولکولی (gr/mol)	۲۸۱۰	۳۱۴۳
گرانروی (Pa.s) (40°C)	۵/۲۸	۱۴/۷۲
چگالی (gr/cm^3) (25°C)	۰/۸۹	۱/۱۵

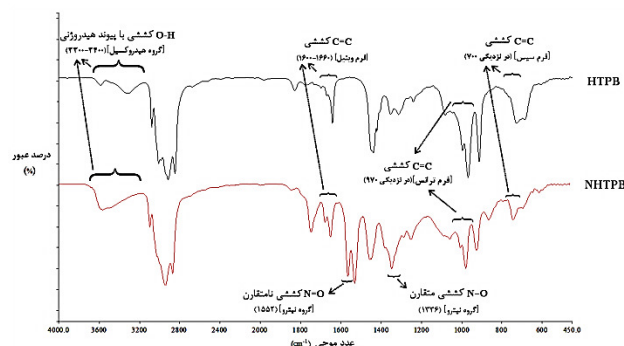
۲-۴- تهیه پیش‌رانه جامد مرکب

در فرآیند تهیه پیش‌رانه جامد مرکب با باریپذیری ۸۶٪، ابتدا پیش اختلاط^۱ بایندر به همراه نرم‌کننده، تحت خلأ و در دمای 60°C انجام شد تا رطوبت یا حلال باقی مانده احتمالی زدوده شود. پس از اطمینان از اختلاط کامل بایندر و یک‌دست شدن مخلوط، مرحله پیش اختلاط تمام شده و مرحله اختلاط آغاز می‌شود. در فرآیند اختلاط با دمای 60°C ، ابتدا مقادیر دقیق آلومینیوم (Al) همراه با کلسیم کربنات (CaCO_3) و کرومیت مس ($\text{Cu}_2\text{Cr}_2\text{O}_5$) به داخل محتویات میکسر افزوده شد. اختلاط به مدت ۱۵ min با سرعت همزن ۲۵ rpm صورت گرفت (هر ۷ min جهت چرخش پرها عوض می‌شد). سپس، عوامل پیوندی (MAPO) و (T_{313}) و پایدار کننده (A.O.2246) به داخل میکسر اضافه شدند و عمل اختلاط مشابه مرحله قبل انجام شد. در ادامه، آمونیوم پرکلرات ریز (APF) و درشت (APC) مجموعاً طی چهار مرحله به میکسر اضافه شدند. ابتدا نصف مقدار مورد نیاز APF به میکسر منتقل شده و اختلاط به مدت ۱۵ min با سرعت همزن ۲۵ rpm صورت گرفت؛ سپس نصف مقدار مورد نیاز APC به میکسر منتقل شده و اختلاط به مدت ۱۵ min با سرعت همزن ۲۵ rpm انجام شد. نصف اضافه شدند. سپس اختلاط دوغاب^۲ پیش‌رانه تحت خلأ ۹۷۰ mbar شروع شده و به مدت ۱۵ min ادامه یافت. در ادامه عامل پخت به‌طور دقیق توزین شده و به درون میکسر اضافه شد. اختلاط این مرحله با سرعت ۱۵ rpm و به مدت ۲۰ min انجام شد (هر ۵ min جهت چرخش پرها عوض می‌شد). در نهایت، اختلاط با سرعت ۱۵ rpm و به مدت ۱۵ min تحت خلأ ۹۷۰ mbar اعمال شد. پس از اتمام فرآیند اختلاط فرمولاسیون، خمیر پیش‌رانه تهیه شده در سامانه ریخته‌گری که قبلاً آماده شده است در قالب ریخته می‌شود و ریخته‌گری تحت خلأ انجام می‌شود. سپس قالب مورد نظر به درون آون با دمای 60°C منتقل

آزمون‌های حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک با استفاده از روش BAM و استاندارد MIL-1751 انجام شدند.

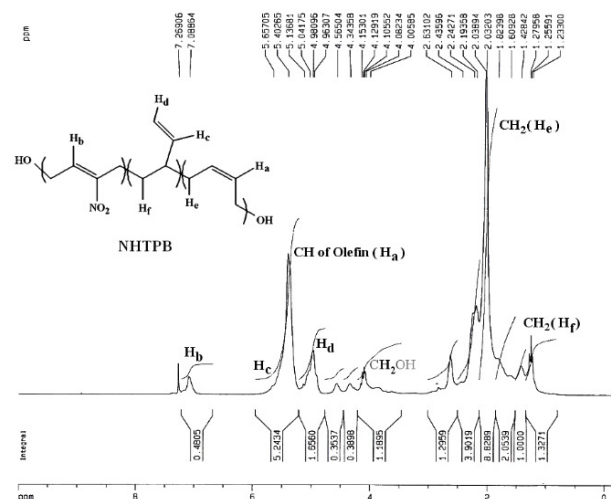
۲-۳- شناسایی و مشخصه‌یابی رزین سنتز شده NHTPB

شناسایی رزین NHTPB سنتز شده در این پژوهش با استفاده از HTPB با جرم مولکولی 2810 gr/mol ، مطابق شکل‌های (۲) و (۳) با بهره‌گیری از آزمون‌های طیف‌سنجی FT-IR و $^1\text{H-NMR}$ انجام شد.



شکل ۲- مقایسه طیف‌های FT-IR مربوط به رزین‌های HTPB اولیه و NHTPB سنتز شده.

مطابق شکل (۲)، پیک‌های مربوطه برای دو رزین HTPB اولیه و NHTPB سنتز شده، نشان داده شده است. پیک‌های جدید دیده شده در محدوده 1336 cm^{-1} و 1552 cm^{-1} طیف NHA1، نیز مربوط به گروه NO_2 است که تأییدی بر سنتز NHTPB است.



شکل ۳- طیف $^1\text{H-NMR}$ مربوط به رزین NHTPB سنتز شده.

شکل (۳)، طیف $^1\text{H-NMR}$ مربوط به رزین NHTPB سنتز شده را در حلال کلروفرم (CDCl_3) نشان می‌دهد. پیک ناحیه $7/0.8 \text{ ppm}$ نیز مربوط به پروتون نیترو اولفینی (H_b) است که به علت مجاورت با گروه

1- Premix
2- Slurry

حلال آن خارج شود و در مرحله بعد دوباره نمونه خشک شده توزین و نتایج ثبت گردید [۱۷].

کسر حجمی و چگالی اتصالات عرضی با استفاده از نتایج آزمون تورم و معادله فلوری-رنر (معادله ۱) محاسبه شدند [۱۱، ۱۷، ۱۹].

$$v_e = \frac{-[\ln(1-V_2)+V_2+xV_2^2]}{V_s(V_2-\frac{1}{2}V_2)} = \frac{\rho_2}{M_c} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_e بیانگر چگالی اتصالات عرضی، V_2 معادل کسر حجمی پلیمر، χ ضریب برهم‌کنش پلیمر حلال برابر با ۰/۳۵۵، V_s حجم مولی حلال (۱۰۶/۳ cm³/mol)، ρ_2 چگالی پلیمر و M_c معادل وزن مولکولی بین نقاط اتصال عرضی است. پارامترهای حاصل از آزمون تورم برای نمونه‌های پیشرانه با استفاده از مقادیر وزنی به‌دست آمده برای نمونه‌های پیشرانه قبل و بعد از آزمون تورم، با به‌کارگیری فرمول‌ها محاسبه و در جدول (۴) آورده شدند.

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون تورم برای سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10.

نمونه	کسر حجمی (v)	چگالی اتصالات عرضی (V _e) (×۱۰ ^۴) (mol/cm ³)	وزن مولکولی بین نقاط اتصال عرضی (M _c) (g.mol ⁻¹)
HB	۰/۲۱۰	۱/۹۲	۸۸۴۴
NH5	۰/۱۹۸	۱/۷۰	۹۹۴۳
NH10	۰/۱۹۳	۱/۶۱	۱۰۴۹۱

فرمولاسیون پیشرانه جامد مورد استفاده در این پژوهش، حاوی ۸۶٪ بار جامد است که استفاده از بایندر پراثری NHTPB با گرانروی بالاتر نسبت به HTPB را با مشکلاتی مواجه می‌کند. با افزایش نسبت رزین NHTPB به HTPB، گرانروی دوغاب پیشرانه بالا می‌رود که در پی آن، اختلاط به‌خوبی انجام نمی‌شود؛ در نتیجه ایزوسیانات کمتری وارد واکنش می‌شود و چگالی اتصالات عرضی کاهش می‌یابد که منجر به تورم بیشتر نمونه در حلال تولوئن می‌شود.

۳-۱-۲- بررسی آزمون سختی برای سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10

نمونه‌های پیشرانه در دمای ۲۵°C تحت آزمون سختی سنجی با روش Shore A قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی برای سه نمونه HB، NH5 و NH10 در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵- نتایج به‌دست آمده از آزمون سختی سنجی.

نمونه	نتایج سختی (Shore A)
NH10	۵۴
NH5	۵۸
HB	۶۴

نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی نشان داد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از ۵ به ۱۰٪، میزان سختی نمونه‌های پیشرانه به

شده و در مدت ۴ روز پخت می‌شود. در ادامه فرمولاسیون پایه پیشرانه HTPB (با کد نمونه HB) تهیه شد و به‌عنوان نمونه شاهد، با دو فرمولاسیون پخت شده دیگر، یعنی فرمولاسیون پیشرانه HTPB/NHTPB با نسبت ۵ درصد NHTPB به ۹۵ درصد HTPB (NH5) و فرمولاسیون پیشرانه HTPB/NHTPB با نسبت ۱۰ درصد NHTPB به ۹۰ درصد HTPB (NH10) از لحاظ خواص فیزیکی - مکانیکی، نرخ سوزش و حساسیت مقایسه شد. ترکیب درصد اجزاء فرمولاسیون‌های مذکور در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- درصد وزنی اجزاء فرمولاسیون پیشرانه جامد مرکب.

کد نمونه	اجزاء			ماده
	NH10	NH5	HB	
	درصد وزنی	درصد وزنی	درصد وزنی	HTPB
	۱۰/۲۶	۱۰/۸۳	۱۱/۴۰	NHTPB
	۱/۱۴	۰/۵۷	-	پیش پلیمر
	۲	۲	۲	DOS
	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	A.O.2246
	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	T ₃₁₃
	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	MAPO
	۰/۵	۰/۵	۰/۵	CaCO ₃
	۰/۲	۰/۲	۰/۲	Cu ₂ Cr ₂ O ₅
	۱۷	۱۷	۱۷	Al
	۲۴	۲۴	۲۴	AP _f
	۴۴	۴۴	۴۴	AP _e
	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	TDI
	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	جمع (%)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص فیزیکی - مکانیکی

در این بخش تجزیه و تحلیل آزمون‌های تورم، سختی، چگالی و کشش برای سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10 انجام شد و بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقایسه بین آن‌ها صورت گرفت.

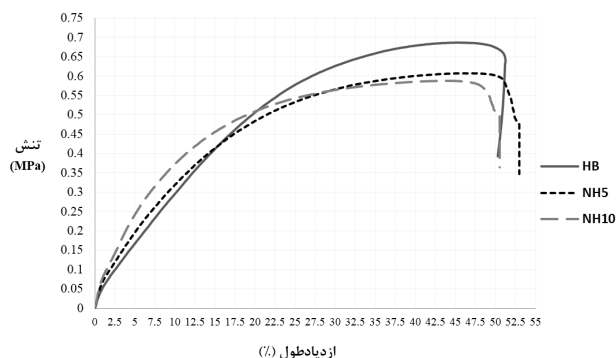
۳-۱-۱- بررسی آزمون تورم برای سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10

آزمون تورم برای نمونه‌های پیشرانه در حلال تولوئن و در دمای ۲۵°C، انجام شد. برای انجام آزمون تورم، سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10، ابتدا برش کاری و توزین شدند و سپس نمونه‌ها در حلال قرار گرفتند [۱۷ و ۱۸]. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از حلال خارج شده و مقدار تورم تعادلی نمونه‌ها از راه وزن سنجی تعیین گردید. سپس نمونه به مدت ۲ ساعت در آون تحت دمای ۱۰۰°C قرار گرفت تا

از آزمون کشش برای نمونه‌های پیش‌رانه تهیه شده، در جدول (۷) و شکل (۵) آورده شده است.

جدول ۷- مقایسه میانگین نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش برای سه نمونه پیش‌رانه.

نمونه کشش	نمونه HB	نمونه NH5	نمونه NH10
تنش بیشینه (MPa)	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۵۹
ازدیاد طول (%) در تنش بیشینه	۴۵/۷۲	۴۶/۸۷	۴۵/۷۱
مدول ینگ (MPa)	۳/۳۸	۳/۹۷	۴/۹۷



شکل ۵- نمودار مقایسه میانگین نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش برای سه نمونه پیش‌رانه.

مطابق جدول (۷) و شکل (۵)، نمونه HB با بیشترین میزان چگالی اتصالات عرضی، دارای بیشترین استحکام کششی نیز است. همان‌طور که قبلاً نیز بحث شد، با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از ۵ به ۱۰٪، چگالی اتصالات عرضی کاهش می‌یابد. کاهش چگالی اتصالات عرضی در بخش‌های سخت پلی‌یورتان (محل اتصال گروه OH پیش‌پلیمر به گروه NCO ایزوسیانات) منجر به پایین آمدن مقدار استحکام کششی و تنش بیشینه می‌شود. با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از ۵ به ۱۰٪، میزان تنش بیشینه به ترتیب ۱۱/۶ و ۱۴/۵٪ کاهش یافته است. همچنین ازدیاد طول تقریباً ثابت مانده و یا حتی افزایش یافته است؛ علت این پدیده می‌تواند افزایش وزن مولکولی پلیمر، افزایش قطبیت زنجیرها و تقویت پیوندهای هیدروژنی بین زنجیره‌ای در اثر نیتراسیون باشد. بررسی رفتار الاستیک نمونه‌های پیش‌رانه نشان داد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از ۵ به ۱۰٪، مدول ینگ نیز به ترتیب حدود ۱۴/۸۶ و ۳۲٪ افزایش یافته است. مقایسه‌ای از خواص مکانیکی به‌دست آمده برای نمونه پیش‌رانه جامد بر پایه NHTPB در سایر پژوهش‌ها در جدول (۸) گردآوری شده است. البته لازم به ذکر است که فرمولاسیون، نوع مواد و روش پخت به کار برده شده در این پژوهش، تفاوت‌های اساسی با سایر پژوهش‌ها دارد. بنابراین خواص فیزیکی - مکانیکی آورده شده در جدول (۸) را نمی‌توان مبنای مقایسه قرار داد، چراکه عوامل مؤثری بر آن‌ها تأثیرگذار است؛ اما اطلاعات مفیدی مانند یکسان نبودن روند افزایش

ترتیب ۹/۴ و ۱۵/۶٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. در پی افزایش نسبت رزین NHTPB به HTPB، چگالی اتصالات عرضی کاهش می‌یابد و نمونه پیش‌رانه، ایزوسیانات واکنش نداده بیشتری دارد؛ این امر منجر به کاهش سختی نمونه‌ها می‌شود.

۳-۱-۳- بررسی آزمون چگالی برای سه نمونه پیش‌رانه HB، NH5 و NH10

برای به‌دست آوردن چگالی از هر پیش‌رانه سه نمونه آماده شده که با استفاده از دستگاه چگالی‌سنج اندازه‌گیری شد، میانگین نتایج حاصل از سه بار تکرار آن در جدول (۶) نشان داده شده است.

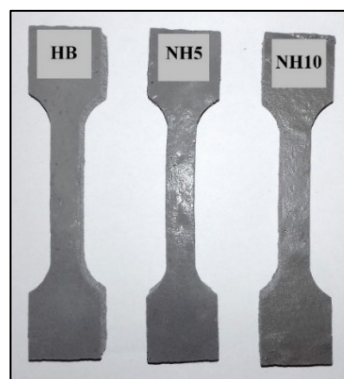
جدول ۶- نتایج به‌دست آمده از آزمون چگالی.

آزمون	نمونه HB	نمونه NH5	نمونه NH10
چگالی (gr/cm ³)	۱/۷۰	۱/۶۹	۱/۶۹

مقادیر چگالی پیش‌رانه به میزان بار جامد فرمولاسیون پیش‌رانه جامد مرکب، فرآیند آماده‌سازی، اختلاط صحیح، ریخته‌گری و گراندروبی دوغاب پیش‌رانه بستگی دارد. نتایج حاصل از آزمون چگالی نشان داد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از ۵ به ۱۰٪، چگالی نمونه‌های پیش‌رانه تغییر چندانی نمی‌کنند.

۳-۱-۴- بررسی آزمون کشش برای سه نمونه پیش‌رانه HB، NH5 و NH10

نمونه‌های دمبلی شکل آماده شده برای هر پیش‌رانه توسط دستگاه با نرخ سرعت ۵۰ mm/min تحت کشش قرار گرفت که معمولاً کشش در ابتدا با افزایش تنش و ازدیاد طول، نمودار به صورت خطی با شیب ثابت بوده تا به حد بیشینه تنش رسیده سپس تنش به یک‌باره کاهش می‌یابد. عکس مربوط به دمبل‌های تهیه شده برای سه نمونه HB، NH5 و NH10 در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- دمبل‌های تهیه شده برای سه نمونه HB، NH5 و NH10.

نمودارهای تنش - ازدیاد طول برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی عملکرد مکانیکی گرین پیش‌رانه مفید است. مقایسه میانگین نتایج به‌دست آمده

۳-۳- حساسیت

سه نمونه پیشرانه HB، NH5 و NH10 مورد آزمون‌های حساسیت به ضربه و اصطکاک قرار گرفت که نتایج آن‌ها در ادامه ارائه شده است. این آزمون در فشار 1 atm و دمای محیط (19°C) و رطوبت 31٪ انجام شده است. مشخصه حساسیت، ایجاد جرقه و نور همراه با بوی سوختگی است.

۳-۳-۱- حساسیت به ضربه

آزمون حساسیت به ضربه برای نمونه‌های پیشرانه مطابق با استاندارد MIL-1751 انجام گرفت که نتایج آن در جدول (10) ارائه شده است.

جدول 10- نتایج آزمون حساسیت به ضربه.

کد نمونه	جرم وزنه (gr)	ارتفاع سقوط (cm)	انرژی ضربه (J)
HB	5000	13	6/5
NH5	5000	7	3/5
NH10	5000	6/6	3/3

مقایسه مقادیر حساسیت به ضربه به دست آمده برای نمونه‌های پیشرانه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از 5 به 10٪ (نیترودار کردن کل بایندر به میزان 0/61٪ و 1/22٪)، حساسیت نمونه‌ها به ترتیب به میزان 46/1 و 49/2٪ افزایش می‌یابد.

۳-۳-۲- حساسیت به اصطکاک

آزمون حساسیت به اصطکاک برای نمونه‌های پیشرانه مطابق با استاندارد MIL-1751 انجام گرفت که نتایج آن در جدول (11) ارائه شده است. مقایسه مقادیر حساسیت به اصطکاک به دست آمده برای نمونه‌های پیشرانه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از 5 به 10٪ (نیترودار کردن کل بایندر به میزان 0/61٪ و 1/22٪)، حساسیت نمونه‌ها به ترتیب به میزان 12/5 و 16/6٪ افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون حساسیت به ضربه و اصطکاک می‌توان دریافت که افزایش میزان نیتراسیون کل بایندر با محدودیت‌هایی از قبیل حساسیت مواجه است.

جدول 11- نتایج آزمون حساسیت به اصطکاک.

کد نمونه	نیروی اعمالی (N)
HB	96
NH5	84
NH10	80

مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمون حساسیت به ضربه و اصطکاک در این پژوهش با سایر پژوهش‌ها در جدول (12) آورده شده است. به طور کلی می‌توان ادعا نمود که حضور گروه‌های C-NO₂ حاصل از نیتراسیون در ساختار NHTPB، منجر به افزایش حساسیت می‌شود [21].

یا کاهش یک پارامتر خاص نظیر استحکام کششی، ازدیاد طول و مدول یانگ را می‌توان از این مقایسه استخراج نمود.

جدول 8- مقایسه خواص مکانیکی نمونه پیشرانه جامد بر پایه NHTPB با سایر پژوهش‌ها.

نام رزین	خواص مکانیکی (25°C)		
	استحکام کششی (M Pa)	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)	مدول یانگ (M Pa)
Nitro-HTPB	0/6	78	2/6
	0/69	74	3
Nitrated-HTPB	0/74	45	2/8
	0/71	68	3/1
این پژوهش	0/59	45/71	4/97
	0/61	45/87	3/97
	0/69	46/72	3/38

با توجه به جدول (8)، می‌توان ادعا نمود که خواص مکانیکی به شدت تحت تأثیر فرآیندپذیری تولید پیشرانه است. میزان گرانبوی دوغاب پیشرانه و نیز مرحله‌ای از قبیل اختلاط، قالب‌گیری و پخت پیشرانه تأثیر مستقیمی بر روی خواص مکانیکی به دست آمده می‌گذارد.

۳-۲- نرخ سوزش

در جدول (9) نتایج حاصل از آزمون نرخ سوزش برای سه نمونه HB، NH5 و NH10 آورده شده است. این آزمون در دمای 18°C فشار 18 MPa 6/57 انجام شده است.

جدول 9- نتایج به دست آمده از آزمون نرخ سوزش.

پارامتر	نمونه HB	نمونه NH5	نمونه NH10
سرعت سوزش (mm/s)	10/15	10/45	11/04

مقایسه نرخ سوزش‌های به دست آمده برای نمونه‌های پیشرانه نشان می‌دهد که با افزایش نسبت NHTPB به HTPB از 5 به 10٪، نرخ سوزش نمونه‌های پیشرانه به ترتیب حدود 3 و 8٪ افزایش می‌یابد. برای نمونه پیشرانه با نسبت 5٪ NHTPB به 95٪ HTPB، تنها 5٪ از کل بایندر به میزان 12/2٪ نیترو شده است. به عبارت دیگر کل بایندر استفاده شده در نمونه NH5 به میزان 0/61٪ نیترو شده است که با این حال منجر به افزایش 3 درصدی در نرخ سوزش شده است. همچنین کل بایندر استفاده شده در نمونه NH10 حاوی نسبت 10٪ NHTPB به 90٪ HTPB، به میزان 1/22٪ نیترو شده است که افزایشی 8 درصدی در نرخ سوزش پدید آورده است.

(NH10)، چگالی اتصالات عرضی، سختی، چگالی و استحکام کششی پیشرانه مربوطه در مقایسه با نمونه شاهد (HB) کاهش می‌یابد ولی مدول یانگ و مقدار ازدیاد طول افزایش نشان می‌دهد. از طرفی، اضافه شدن گروه پرنرژتی نیترو به ساختار HTPB منجر به بالا رفتن محتوای انرژتی پیشرانه تولید شده می‌گردد که طبیعتاً در پی آن حساسیت پیشرانه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت NHTPB/HTPB از ۵٪ (NH5) به ۱۰٪ (NH10)، میزان نرخ سوزش NH5 نسبت به HB در حدود ۳٪ و نرخ سوزش NH10 نسبت به HB افزایش ۸ درصدی دارد. با ترتیب قبلی، مقادیر حساسیت به ضربه ۴۶ و ۴۹٪ و حساسیت به اصطکاک نیز ۱۲ و ۱۶٪ نسبت به پیشرانه شاهد افزایش نشان داد.

مراجع

- [1] Sankar, R. M.; Roy, T. K.; Jana, T. "Functionalization of Terminal Carbon Atoms of Hydroxyl Terminated Polybutadiene by Polyazido Nitrogen Rich Molecules"; *Bull. Mater. Sci.* 2011, 34, 745-754.
- [2] Agrawal, J. P.; Hodgson, R. "Organic Chemistry of Explosives"; John Wiley & Sons: West Sussex, 2007.
- [3] Zhou, Y.; Long, X. P.; Zeng, Q. X. "Simulation Studies of the Interfaces of Incompatible Glycidyl Azide Polymer/Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Blends by Dissipative Particle Dynamics. I. The Effect of Block Copolymers and Plasticizers"; *J. Appl. Polym. Sci.* 2012, 125, 1530-1537.
- [4] Reid, D. L.; Draper, R.; Richardson, D.; Demko, A.; Allen, T.; Petersen, E. L.; Seal, S. "In Situ Synthesis of Polyurethane-Tio 2 Nanocomposite and Performance in Solid Propellants"; *J. Mater. Chem. A.* 2014, 7, 2313-2322.
- [5] Shekhar Pant, C.; Santosh, M. S.; Banerjee, S.; Khanna, P. K. "Single Step Synthesis of Nitro-Functionalized Hydroxyl-Terminated Polybutadiene"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2013, 38, 748-753.
- [۶] کبریت‌چی، عباس؛ قانع قره‌باغ، میلاد "لیمرهای پرنرژتی در پیشران‌ها: رزین پلی‌بوتادیان با انتهای هیدروکسیل پرنرژتی (EHTPB) آزیدی و متصل به فلز؛" مجله پژوهش و توسعه فناوری پلیمر ایران، سال دوم، شماره ۴، صفحه ۱۷، ۱۳۹۶.
- [۷] کبریت‌چی، عباس؛ قانع قره‌باغ، میلاد "بررسی انواع رزین پلی‌بوتادیان با انتهای هیدروکسیل (HTPB) پرنرژتی نیترات‌دار شده و خواص پیشرانه جامد مرکب بر پایه آن؛" مجله پژوهش و توسعه فناوری پلیمر ایران، سال دوم، شماره ۲، صفحه ۱۵، ۱۳۹۶.
- [8] Abusaidi, H.; Ghorbani, M.; Ghaieni, H. R. "Development of Composite Solid Propellant Based on Nitro Functionalized Hydroxyl-Terminated Polybutadiene"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2017, 42, 671-675.
- [9] Cappello, M.; Lamia, P.; Mura, C.; Polacco, G.; Filippi, S. "Azidated Ether-Butadiene-Ether Block Copolymers as Binders for Solid Propellants"; *J. Energ. Mater.* 2016, 34, 318-341.
- [10] Florczak, B.; Bogusz, R.; Skupiński, W.; Chmielarek, M.; Dzik, A. "Study of the Effect of Nitrated Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (Nhtpb) on the Properties of Heterogeneous Rocket Propellants"; *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 2015, 12, 841-854.
- [11] Abdullah, M.; Gholamian, F.; Zarei, A. R.; "Investigation of Composite Solid Propellants Based on Nitrated Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Binder"; *J. Propul. Power* 2014, 30, 862-864.

جدول ۱۲- مقایسه میزان حساسیت به ضربه و اصطکاک برای نمونه پیشرانه جامد بر پایه NHTPB در سایر پژوهش‌ها.

نام رزین	حساسیت		مرجع
	ضربه (J)	اصطکاک (N)	
Nitro-HTPB	۱۱/۲	۸۷	[۸]
	۱۳/۱	۹۸	
Nitrated-HTPB	۸/۸	۸۴	[۲۰]
	۱۲/۸	۹۵	
Nitro-HTPB (NH10)	۳/۳	۸۰	این پژوهش
	۳/۵	۸۴	
	۶/۵	۹۶	

با توجه به جدول (۱۲)، از مقایسه میزان حساسیت به ضربه و اصطکاک برای نمونه پیشرانه جامد بر پایه NHTPB در این پژوهش با سایر پژوهش‌ها، می‌توان ادعا نمود که به‌طور کلی با اضافه شدن گروه‌های پرنرژتی نیترو و نیترات، افزایشی در حساسیت به ضربه و اصطکاک در نمونه‌های پیشرانه مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است نمونه‌های مقایسه‌ای آورده شده در جدول (۱۲) با نمونه مورد پژوهش در شرایط یکسانی نیستند و این نمونه‌ها صرفاً جهت مقایسه نسبی گردآوری شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از Nitro-HTPB به همراه HTPB به‌عنوان بایندر بهره گرفته شد، چراکه سنتز آن آسان و کم هزینه است و با حفظ خواص فیزیکی-شیمیایی HTPB، منجر به افزایش انرژتی کل خروجی ترکیب نیز می‌شود. گرانیوی این رزین به‌شدت تحت تأثیر میزان نیتراسیون است و با آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین، درصدهای بالاتر از میزان نیتراسیون، منجر به افزایش گرانیوی دوغاب پیشرانه و بروز اختلال در امر اختلاط و فرآیندپذیری می‌شود که در پی آن، خواص پیشرانه جامد مرکب تهیه شده را دستخوش تغییر می‌کند. در این پژوهش نمونه‌های پیشرانه بر پایه NHTPB/HTPB (NH5 و NH10) با استفاده از رزین NHTPB ۱۲٪ نیترودار شده تهیه شده و خواص آن با نمونه پیشرانه شاهد (HB) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. از جمله معایب استفاده از رزین NHTPB به‌عنوان بایندر در پیشرانه، منجر به بروز مشکل در فرآیندپذیری پخت پیشرانه به دلیل بالا رفتن گرانیوی دوغاب پیشرانه است که پیامدهای آن را می‌توان در خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های پیشرانه دید. باین‌حال، نوآوری این پژوهش در استفاده از بایندر HTPB (که منجر به خواص مکانیکی مطلوب می‌شود) به همراه بایندر پرنرژتی NHTPB (که خواص بالستیکی را بهبود می‌دهد)، آثار ناشی از تضعیف خواص مکانیکی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. بررسی آمون تورم برای نمونه‌های پیشرانه نشان داد که با افزایش نسبت NHTPB/HTPB از ۵٪ (NH5) به ۱۰٪

- [16] Pavia, D. L.; Lampman, G. M.; Kriz, G. S.; Vyvyan, J. A. "Introduction to Spectroscopy"; Cengage Learning: United States of America, 2008.
- [17] Jain, S. R.; Sekkar, V.; Krishnamurthy, V. N. "Mechanical and Swelling Properties of HTPB-Based Copolyurethane Networks"; J. Appl. Polym. Sci. 1993, 48, 1515-1523.
- [18] Sekkar, V. "Comparison Between Crosslink Densities Derived from Stress-Strain Data and Theoretically Data Evaluated Through the A-Model Approach for a Polyurethane Network System Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Isophorone-Diisocyanate"; J. Appl. Polym. Sci. 2010, 117, 920-925.
- [19] Sekkar, V.; Alex, A. S.; Kumar, V.; Bandyopadhyay, G. G. "Theoretical Evaluation of Crosslink Density of Chain Extended Polyurethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Butanediol and Comparison with Experimental Data"; J. Energ. Mater. 2018, 36, 38-47.
- [20] Yamazaki, K.; Tokui, H. "The Cross-Linking Reaction of the Poly Butadiene Binder for Composite Propellants"; Bull. Chem. Soc. Jpn. 1965, 38, 2174-2178.
- [21] Politzer, P.; Murray, J. S. "Relationships Between Dissociation Energies and Electrostatic Potentials of C-NO₂ Bonds: Applications to Impact Sensitivities"; J. Mol. Struct. 1996, 376, 419-424.
- [۱۲] اشرفی، مهدی "سنتز و بررسی خواص نرم‌کننده پلیمری پرائرژوی NPB و مطالعه خواص عملکردی آن به همراه بایندر NHTPB در فرمولاسیون مواد منفجره پلاستیکی"؛ رساله دکتری شیمی آلی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۱۳۹۵.
- [13] Ashrafi, M.; Fakhraian, H.; Dehnavi, M. A. "Synthesis, Characterization and Properties of Nitropolybutadiene As Energetic Plasticizer for NHTPB Binder Propellants"; Propellants, Explos., Pyrotech. 2017, 42, 269-275.
- [14] Abdullah, M.; Gholamian, F.; Zareiee, M. R. "Investigation of Composite Propellant Based On Hydroxyl Terminated Polybutadiene-1-Chloro-2, 4-Dinitrobenzene"; J. Propul. Power 2013, 29, 1343-1345.
- [۱۵] قاینی، حمیدرضا؛ ابوسعیدی، هادی؛ معتمدالشریعتی، سیده‌ادی "بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر سنتز Nitro-HTPB"؛ نشریه علمی پژوهشی مواد پرائرژوی، سال دهم، شماره ۲، صفحه ۶۵، ۱۳۹۴.