

## علمی - ترویجی

## بررسی تأثیر ترکیب MAPO و T313 بر خواص

## رئولوژی و مکانیکی پیشرانۀ جامد مرکب بر پایه HTPB

پیشرانۀهای جامد مرکب به علت برخورداری از مزایایی همچون دانسیته بالا، ایمپالس ویژه بالا و امکان تولید گرین‌های بزرگ، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع موشکی دارند. این پیشرانۀها از سه جزء اصلی اکسیدکننده، سوخت و پیونددهنده تشکیل شده‌اند. در سال‌های اخیر، رزین پلی بوتادی ان با گروه انتهایی هیدروکسیل (HTPB) با توجه به خواص مکانیکی مناسب و امکان بارگذاری بار جامد بالا (۸۸ تا ۹۰ درصد بار جامد شامل AP و Al) بیشتر در این پیشرانۀها مورد استفاده قرار گرفته است. داشتن خواص مکانیکی مناسب یکی از مهمترین پارامترها جهت عملکرد مناسب موتور می‌باشد. در این تحقیق، ضمن بررسی تأثیر زنجیر گستران T313 و عامل پیوندی MAPO بر خواص مکانیکی سوخت، ضرورت وجود این ماده در فرمولاسیون سوخت و دلایل استفاده همزمان MAPO و T313 مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. جهت ارزیابی این موضوع، فرمولاسیون‌هایی از پیشرانۀ با درصدهای مختلف MAPO و T313 ساخته شده و عمر کاربری، خواص مکانیکی و دانسیته نمونه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل شده، می‌توان نتیجه گرفت که اولاً میزان MAPO و T313 بایستی در مقدار بهینه استفاده شود و ثانیاً این ترکیبات تأثیر زیادی بر خواص رئولوژی و مکانیکی ایفا می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی: MAPO، T313، عامل پیوندی، پیشرانۀ جامد مرکب

### Effect of MAPO and T313 on the Rheological and Mechanical Properties of Composite Solid Propellant Based on HTPB

Composite solid propellants have found wide spread applications in missile industries, such as high density, high specific impulse, and possibility of producing large scale grains. These solid propellants consist of three main chemical ingredients, including oxidizer, fuel, and binder. Recently, Hydroxyethyl Terminal Poly-Butadiene (HTPB) has been used abundantly for these propellants due to its good mechanical properties and ability to high solid loading (88 to 90% of solid loading, including Al and AP). The mechanical properties of solid rocket propellants are crucial for proper functioning of rocket engines. In this study, the effect of T313 (chain extender) and MAPO (bonding agent) on mechanical properties of propellant is investigated. In addition to the necessity of these substances in the propellant, the formulation and the reasons for utilizing MAPO and T313 are discussed. Different compositions have been prepared by incorporating different percents of MAPO and T313 for evaluation. Also, their effects on pot life, mechanical properties, and density are studied. Based on the results, the amount of MAPO and T313 should be used in optimum amount and these compounds have great influence on the rheological and mechanical properties.

Keywords: MAPO, T313, Bonding Agent, Composite Solid Propellant

سید امان‌اله موسوی ندوشن<sup>۱</sup>،  
دانشجوی دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه  
صنعتی مالک اشتر تهران  
یحیی ابراهیم‌آبادی<sup>۲\*</sup>، دانشجوی  
دکتری، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد  
اسلامی واحد رشت  
نواب فتحی<sup>۳</sup>، کارشناس ارشد، دانشکده  
مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز  
حامد شیخ‌حسینی<sup>۴</sup>، کارشناس ارشد،  
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت  
مدرس

\* نویسنده مخاطب، آدرس: رشت، کدپستی:  
۴۱۴۷۶۵۴۹۱۹

S.A. Mousavi Nodoushan<sup>1</sup>, Ph.D.  
Student, Department of Chemistry,  
Malek-Ashtar University of  
Technology, Tehran

Y. Ebrahim Abadi<sup>2\*</sup>, Ph.D.  
Student, Department of Chemistry,  
Islamic Azad University, Rasht  
Branch

N. Fathi<sup>3</sup>, M.Sc., Department of  
Chemical Engineering, Tabriz  
University

H. Sheikh Hasani<sup>4</sup>, M.Sc.,  
Department of Chemical  
Engineering, Tarbiat Modarres  
University

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

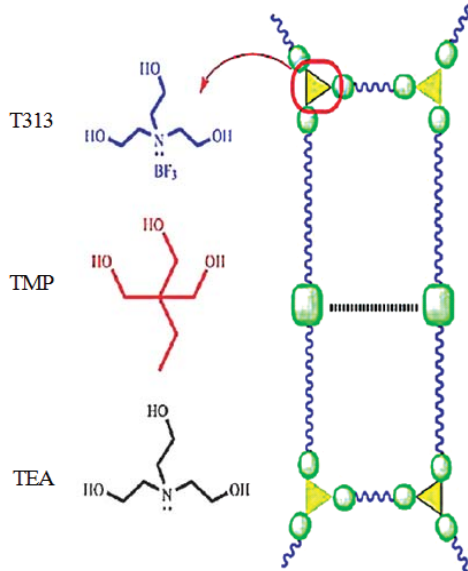
## مقدمه

خواص مکانیکی مطلوب یکی از مهمترین پارامترهای پیشرانۀ جامد است. پیشرانۀ جامد همواره بایستی مقاومت قابل قبولی در برابر انواع تنش‌های محیطی اعمال شده داشته باشد. در صورتی که پیشرانۀ جامد خواص مکانیکی قابل قبولی نداشته باشد ممکن است که در اثر حمل و نقل و یا تنش‌های محیطی و یا در اثر فشار کارکردی موتور در پیشرانه، ترک ایجاد شود. ایجاد ترک و شکست در پیشرانه یکی از خطرناک‌ترین معایبی است که پیشرانه می‌تواند داشته باشد. ترک‌های ایجاد شده موجب افزایش سطح سوزش پیشرانه می‌شود و متعاقب آن فشار موتور نیز افزایش می‌یابد. این امر نه تنها بر عملکرد پرتابه اثر می‌گذارد، بلکه باعث انفجار موتور نیز می‌شود. بنابراین، توجه به خواص مکانیکی پیشرانه بسیار مهم است. جهت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب و همچنین افزایش بارگذاری فاز جامد در پیشرانه‌های جامد کامپوزیت روش‌های مختلفی قابل استفاده می‌باشد. عوامل پیوندی و شبکه‌کننده از جمله ترکیباتی هستند که اگر چه در مقدار اندک به فرمولاسیون پیشرانه‌های جامد کامپوزیت اضافه می‌شوند اما می‌توانند تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی این پیشرانه‌ها داشته باشند [۱-۳].

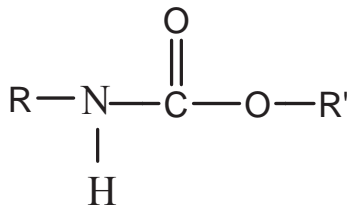
در این خصوص شهیدزاده و همکاران طی پژوهشی سه عامل شبکه‌ساز T313، TEA و TMP را به لحاظ عملکرد با یکدیگر مورد مقایسه و بررسی قرار دادند [۴]. ساختار TEA شباهت بسیاری به T313 دارد اما در مقایسه ترکیب T313 و TEA پیوندهای هیدروژنی در نمونه حاوی شبکه‌کننده TEA به میزان کمتری نسبت به ترکیب T313 می‌باشد. شبکه‌کننده TEA تنها یک موقعیت برای برقراری پیوند هیدروژنی با گروه یورتانی زنجیر مجاور دارد که اتم N با یک زوج الکترون آزاد است که باعث می‌شود دانسیته اتصالات عرضی فیزیکی برای این شبکه‌کننده کمتر از T313 باشد. شبکه‌کننده TMP هیچ موقعیتی برای برقراری پیوند هیدروژنی با گروه یورتانی زنجیر مجاور ندارد، بنابراین این شبکه‌کننده تقریباً فاقد پیوند عرضی فیزیکی می‌باشد. شمای کلی از تهیه پلی‌یورتان‌های شبکه شده بر پایه HTPB در شکل ۱ آورده شده است.

## پلیمر شبکه‌ای

اصولاً، عنوان پلی‌یورتان به گروهی از مواد پلیمری اطلاق می‌شود که شامل گروه‌های یورتان (NCOOH) می‌باشد. پلی‌یورتان‌ها از خانواده پلیمرهای هتروژن بوده و شامل اتصالات یورتان در ساختار خود می‌باشد که در ساختار شکل ۲ نشان داده شده است. گروه یورتان از واکنش یک گروه ایزوسیانات (NCO) و یک گروه هیدروکسیل (OH) حاصل می‌شود [۵].



شکل (۱): شمای کلی تهیه پلی‌یورتان‌های شبکه‌شده بر پایه HTPB [۴].



شکل (۲): ساختار شیمیایی یورتان [۵].

اتصال عرضی در پلیمرها، پیوندی است که دو زنجیره مجاور را به هم متصل می‌کند. این پیوندها می‌تواند از نوع اول و دوم باشد. هنگامی که واژه «شبکه‌ای شدن» درباره سنتز پلیمرها استفاده می‌شود، معمولاً به استفاده از اتصال عرضی به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمر دلالت می‌کند.

در شیمی پلی‌یورتان (که پیشرانه‌های جامد کامپوزیت را نیز شامل می‌شود) بسته به کاربرد مورد نظر خواص چسبندگی، حرارتی و مکانیکی مورد اهمیت می‌باشد. این خواص به طور ویژه به درجه شبکه‌ای شدن پلی‌یورتان بستگی دارند. درجه شبکه‌ای شدن پلی‌یورتان از طریق ایجاد اتصالات عرضی بین زنجیره‌های پلیمری با استفاده از ترکیبات چند عاملی کوچک مانند تریال‌ها در بافت پلی‌یورتان قابل کنترل است. پلیمرهای شبکه‌ای معمولاً از نوع ترموست هستند و هنگامی که در یک حلال قرار می‌گیرند، متورم می‌شوند [۶].

## شبکه‌ای کردن پلیمر

به طور کلی چند روش برای شبکه‌ای کردن پلیمر از طریق ایجاد اتصالات عرضی وجود دارد [۷-۶]:

✓ استفاده از دی‌ایزوسیانات<sup>۱</sup> اضافی که می‌تواند با

1. Di-Isocyanate

پیوند بین پیونددهنده و فیلر می‌باشد. عوامل پیوندی در حالت کلی باید خواص زیر را داشته باشد [۹-۱۰]:

- ایجاد برهمکنش قوی بین پیونددهنده و فیلر،
- پایداری شیمیایی و گرمایی بالا،
- سازگاری با اکسند و پیونددهنده و

- داشتن اثرات دیگر به عنوان عامل خیس‌کننده Scavenger (برای ناخالصی‌های فلزی).

عوامل پیوندی شامل ترکیبات مختلفی هستند که تعدادی از آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): برخی از عوامل پیوندی مورد استفاده در پیشرانه‌های کامپوزیت [۱ و ۱۲-۱۱].

نام تجارتي	سایر نام‌ها
MAPO	Tris-(1-(2-Methyl) Aziridiny) Phosphine oxide
MT4	Tris 1-(2-methy aziridiny) phosphine oxid +adipicacid+Tartaricacid
PAAS HX-874, HX-877	Polyfunctional Aziridine Amides (e.g. bis 1-(2-methyl)-aziridiny benzene- 1,3 dicourbcxylic acid amide
HX-752	Bis- isophthaloyl -1-(2-methyl) Aziridine
HX-868, BITA	Trimesoyl- 1-(2- Ethyl) Aziridine
BA114	1,2-hydroxystearicacid+ tris 1-(2-methylaziridmyl) phosphine oxide
TEPAN (HX-879)	Tetraethylenepentamine +Acrylonitrile
TEPANOL (HX-878)	Tetra ethylene pentamine+ Acrylonitrile + Glycidol
BIDE	Butyliminodiethenol
TEA	Triethanolamine

هر کدام از این ترکیبات مزایا و معایبی دارند که باعث شده هر کدام در پیشرانه‌های مشخص، با اکسندهای معینی و با درصد‌های مختلفی به کار روند. MT4 به تخریب در اثر رطوبت مستعد و در زمان کمی قابل استفاده است و فقط با اکسند AP به کار می‌رود. مشکل عوامل پیوندی آمینی، آزاد شدن گاز آمونیاک در فرآیند اختلاط و پخت است که علت آن جایگزینی آمونیاک AP با گروه‌های آمینی ساختار عوامل پیوندی است. کاربرد عوامل پیوندی آمینی نیازمند حذف گاز آمونیاک از سیستم است زیرا این گاز عوامل پخت را مصرف می‌کند و لذا در فرآیند پخت پیشرانه مشکل ساز می‌شود. برای حل این

- گروه یورتان زنجیر واکنش داده و تشکیل گروه آلوفانات<sup>۲</sup> و ایزوسیانات<sup>۳</sup> دهد،
- ✓ استفاده از پلی‌اتر<sup>۴</sup> یا پلی‌استر<sup>۵</sup> شاخه‌دار دارای عاملیت هیدروکسیل<sup>۶</sup> بیشتر از ۰/۲ و
- ✓ وارد کردن ترکیبات تریال با وزن مولکولی کم در واکنش مانند تری‌متیل‌آل‌پروپان (TMP) یا T313.

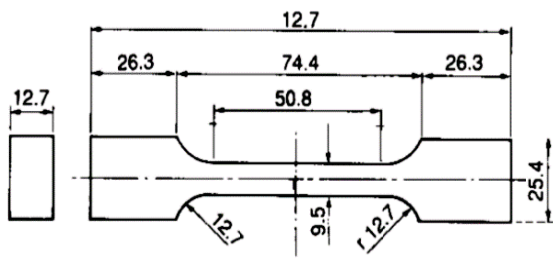
### عوامل شبکه‌کننده

زنجیره‌گستران (با دو گروه عاملی) و شبکه‌کننده (با سه گروه عاملی یا بیشتر) ترکیباتی با پایانه‌های الکلی یا آمینی و با جرم مولکولی کم هستند که نقش مهمی در ریخت‌شناسی<sup>۷</sup> فیبرهای پلی‌یورتان، الاستومرها<sup>۸</sup>، چسب‌ها و غیره ایفا می‌کند. در بیشتر موارد، در ساختار پلی‌یورتان از یک عامل شبکه‌کننده استفاده می‌شود. این امر به منظور بهبود خواص مکانیکی پلی‌یورتان می‌باشد. بنابراین، انتخاب عامل شبکه‌کننده و در نتیجه ایجاد چگالی اتصالات عرضی مناسب اهمیتی حیاتی خواهد داشت. خواص الاستومری (کشسانی) این مواد حاصل جدایش فاز سگمنت‌های<sup>۹</sup> سخت و نرم در ساختار آنها می‌باشد. به طوری که، سگمنت‌های سخت یورتانی به عنوان عامل اتصالات عرضی بین سگمنت‌های نرم عمل می‌کند. این جدایش فاز به این علت اتفاق می‌افتد که سگمنت‌های نرم غیرقطبی و با دمای ذوب پایین، اساساً با سگمنت‌های سخت قطبی و دیر ذوب شونده ناسازگارند. سگمنت‌های نرم که از پلی‌ال‌های با وزن مولکولی بالا تشکیل شده‌اند، متحرک بوده و به طور طبیعی به حالت در هم رفته و تاب خورده هستند، درحالی که سگمنت‌های سخت که از ایزوسیانات و زنجیرگستران تشکیل شده‌اند، سخت و غیرمتحرک هستند. به علت این که سگمنت‌های سخت به صورت کوالانسی به سگمنت‌های نرم کوپل شده‌اند، این کوپل شدن مانع شار پلاستیک زنجیرهای پلیمری می‌شود که حاصل آن ایجاد یک خاصیت ارتجاعی و الاستیکی خواهد بود [۶-۸].

### عامل پیوندی

از آنجا که ذرات فلزی و اکسند جز فیلرهای غیر تقویت کننده بوده و برهم‌کنش ضعیفی با پیونددهنده دارند، در نتیجه خواص مکانیکی خوبی به ترکیب کامپوزیت نمی‌دهند. برای حل این مشکل، از عوامل پیوندی استفاده می‌شود که عامل بهبود قدرت

2. Allophanate
3. Isocyanurate
4. Polyether
5. Polyester
6. Hydroxyl
7. Morphology
8. Elastomers
9. Segments



شکل (۳): ابعاد نمونه‌های دمبلی جهت تست کشش پیشرانه.

### ساخت و کدگذاری نمونه‌ها

برای ارزیابی نحوه اثرگذاری مقادیر مختلف MAPO و T313 بر خواص مکانیکی پیشرانه، فرمولاسیون‌هایی از پیشرانه مینا با مقادیر مختلف از MAPO و T313 ساخته شد. فرمولاسیون و کدگذاری این نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۳): فرمولاسیون و کدگذاری نمونه‌های ساخته شده.

PM-5	PM-4	PM-3	PM-2	PM-1	کد نمونه ترکیب
۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	Al
۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	۶۸	AP
۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۶	T313
۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۶	MAPO
۱۴/۹۴	۱۴/۷۶	۱۴/۸۲	۱۴/۸۲	۱۴/۸۸	سایر افزودنی‌ها شامل، HTPB، نرم کننده، اصلاح کننده، سرعت سوزش، آنتی اکسیدان و غیره

### نتایج و بحث

برای بررسی هرچه بهتر تأثیر زنجیر گستران T313 و عامل پیوندی MAPO بر خواص رئولوژی و مکانیکی سوخت، نمونه‌هایی از پیشرانه با فرمولاسیون‌های جدول ۴ ساخته شد. علاوه بر این که گرانبوی دوغاب پیشرانه از پایان اختلاط (EOM) تا پایان عمر کاربری (Pot Life) مورد آزمون قرار گرفت، نمونه‌های پیشرانه در روزهای پنجم، نهم، دوازدهم و پانزدهم از پخت مورد آزمون‌های کشش، سختی و دانسیته قرار گرفتند.

مشکل معمولاً از عوامل پیوندی آمینی به همراه AP یک پیش مخلوط تهیه می‌شود.

در این پژوهش ضمن بررسی تأثیر زنجیر گستران T313 و عامل پیوندی MAPO بر خواص رئولوژی و مکانیکی سوخت، ضرورت وجود این ماده در فرمولاسیون سوخت و دلایل استفاده همزمان MAPO و T313 مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد [۷ و ۵].

### بخش تجربی

این بخش شامل مواد و تجهیزات و ساخت و کدگذاری نمونه‌ها می‌شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

### مواد و تجهیزات

پیشرانه مورد آزمایش در این تحقیق نوعی از پیشرانه جامد کامپوزیت با بارگذاری فاز جامد ۸۵ درصد می‌باشد. فرمولاسیون این پیشرانه در جدول ۲ آورده شده است. برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی پیشرانه‌های تولیدی دو تست کشش نمونه‌های دمبلی و تست سختی انتخاب شد. در این تحقیق آزمون کشش مطابق با استاندارد JANNAF<sup>۱۰</sup> انجام پذیرفته است. ابعاد نمونه دمبلی ساخته شده برای آزمایشات کشش در شکل ۳ آورده شده است. دستگاه کشش استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت هیوا<sup>۱۱</sup> ایران بود و از دستگاه سختی سنج شرکت باریس<sup>۱۲</sup> کشور آلمان برای تست سختی (با شور<sup>۱۳</sup> A) استفاده شد. سنجش رئولوژی با استفاده از دستگاه رئومتر بروکفیلد<sup>۱۴</sup> آمریکا در دمای ۵۰ C° انجام پذیرفت.

جدول (۲): فرمولاسیون پیشرانه مینا.

ردیف	نام ماده اولیه	درصد
۱	HTPB	۱۲
۲	Al	۱۷
۳	AP	۶۸
۴	T313	۰/۰۶
۵	MAPO	۰/۰۶
۶	سایر افزودنی‌ها شامل، نرم کننده، اصلاح کننده، سرعت سوزش، آنتی اکسیدان و غیره	۲/۸۸

10. Joint Arm Navy NASA Air Force  
11. Hiwa  
12. Bareiss  
13. Shore  
14. Brookfield

بررسی تأثیر ترکیب MAPO و T313 بر خواص رئولوژی و مکانیکی پیشرانه جامد مرکب پر پایه HTPB (علمی-ترویجی)

شور A استفاده می‌شود. جهت بررسی دقیق‌تر تأثیر میزان شور A و MAPO بر خواص آزمون‌های سختی در روزهای پنجم، نهم، دوازدهم و پانزدهم از پخت انجام شده است. این نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): نتایج تست سختی نمونه‌های پیشرانه تهیه شده.

شماره	کد نمونه	روز نمونه	دانشیه (g/cm <sup>3</sup> )	سختی (shore A)
۱	PM-1	D5	۱/۷۵۴۱	۶۶/۲۲
۲		D9	۱/۷۵۳۲	۶۶/۳۱
۳		D12	۱/۷۵۶۹	۶۰/۸۱
۴		D15	۱/۷۵۲۱	۶۷/۴۵
۵	PM-2	D5	۱/۷۵۵۴	۶۲/۰۳
۶		D9	۱/۷۵۱۱	۶۳/۲
۷		D12	۱/۷۵۸۱	۶۴/۵
۸		D15	۱/۷۵۴۱	۶۴/۹
۹	PM-3	D5	۱/۷۵۵۱	۵۷/۱
۱۰		D9	۱/۷۵۲۲	۵۷/۳۵
۱۱		D12	۱/۷۵۶۲	۵۷/۴۵
۱۲		D15	۱/۷۴۶۳	۵۶/۹
۱۳	PM-4	D5	۱/۷۵۷۷	۵۹/۴۴
۱۴		D9	۱/۷۵۶۷	۶۰
۱۵		D12	۱/۷۵۶۲	۶۰/۳۳
۱۶		D15	۱/۷۵۶۷	۶۰
۱۷	PM-5	D5	۱/۷۵۳۸	۶۳/۲
۱۸		D9	۱/۷۵۲۸	۶۴/۳۳
۱۹		D12	۱/۷۵۳۵	۶۶/۵
۲۰		D15	۱/۷۵۳۶	۶۸/۵

این گفته صحیح نیست که نمونه سخت‌تر و یا نمونه نرم‌تر خواص مکانیکی بهتری دارد. برای بررسی این موضوع باید آزمایشات کشش هم انجام پذیرد. برای بررسی دقیق‌تر خواص مکانیکی پیشرانه‌های تولیدی، آزمون کشش نیز برای نمونه‌های پیشرانه انجام شد که در زیر به بررسی نتایج این آزمون‌ها پرداخته می‌شود.

### آزمون کشش

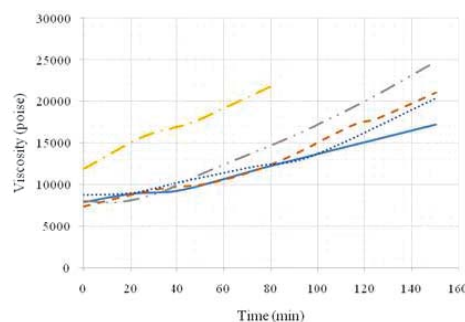
آزمون کشش برای اندازه‌گیری رفتار یک ماده تحت بارگذاری کشش طولی است و تحت شرایط محیطی و یا کنترل شده دمایی انجام می‌شود تا خواص کششی اندازه‌گیری شود. آزمون کشش مطابق با استاندارد JANNAF انجام پذیرفت. نتایج آزمون کشش برای پنج نمونه از پیشرانه در روزهای پنجم، نهم،

جدول (۴): رابطه ویسکوزیته به زمان و ویسکوزیته در پایان اختلاط برای نمونه‌های تولیدی.

کد نمونه	ویسکوزیته در پایان اختلاط (EOM)	R <sup>2</sup>	$\eta = ae^{bt}$
PM-1	۷۹۰۰	۰/۹۹۱۸	$\eta = 7849.3e^{0.0052t}$
PM-2	۷۴۰۰	۰/۹۹۰۹	$\eta = 7280.4e^{0.0071t}$
PM-3	۸۰۴۲	۰/۹۸۷۵	$\eta = 7434.2e^{0.0081t}$
PM-4	۱۱۸۵۰	۰/۹۷۴	$\eta = 12356e^{0.0074t}$
PM-5	۸۷۷۰	۰/۹۷۶۴	$\eta = 8248.8e^{0.0056t}$

### سنجش رئولوژی

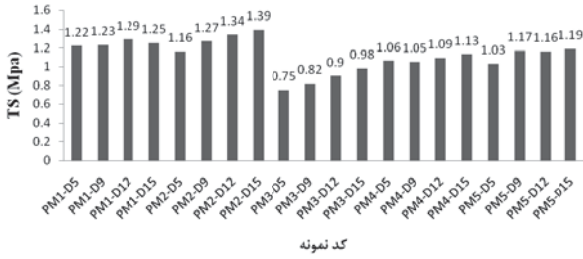
جهت سنجش خواص رئولوژی پیشرانه و بررسی تأثیر میزان MAPO و T313 بر این خواص، گرانیوی دوغاب پیشرانه از پایان اختلاط تا پایان عمر کاربری مورد آزمون قرار گرفت. نمودار ویسکوزیته بر حسب زمان برای پنج نمونه تهیه شده از پیشرانه در شکل ۴ آورده شده است. برای پیشرانه‌های کامپوزیت رابطه ریاضی  $\eta = ae^{bt}$  برای ارتباط ویسکوزیته به زمان برقرار می‌باشد. در این رابطه  $a$  و  $b$  ثابت‌های تجربی،  $t$  زمان و  $\eta$  ویسکوزیته دوغاب پیشرانه می‌باشد. البته لازم بذکر است که دما، میزان خلأ، میکسر، زمان میکس و غیره همگی بر فرآیند تولید پیشرانه و همچنین ویسکوزیته اثرگذار هستند که در این پژوهش همه این پارامترها برای نمونه‌های ساخته شده ثابت هستند. قابل توجه است که محدوده ویسکوزیته برای پیشرانه‌های کامپوزیت در محدوده ۱۰،۰۰۰ تا ۲۰،۰۰۰ پواز می‌باشد.



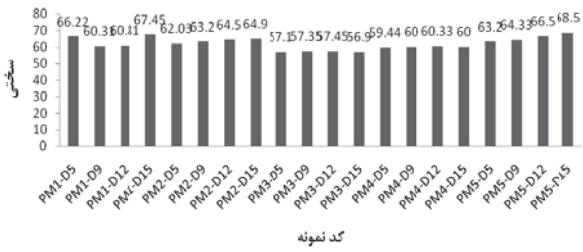
شکل (۴): نمودار ویسکوزیته بر حسب زمان برای پنج نمونه تهیه شده از پیشرانه.

### آزمون سختی

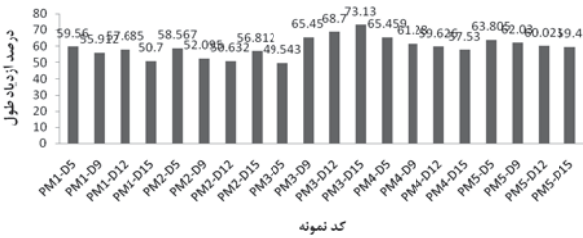
برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی پیشرانه‌های تولیدی، دو آزمون کشش نمونه‌های دمبلی و سختی انتخاب شدند. آزمون سختی براساس سختی و یا راحتی فرو رفتن یک سوزن در داخل پیشرانه انجام می‌شود و بیانگر میزان سختی ماده مورد نظر است. برای اندازه‌گیری پیشرانه‌های کامپوزیت معمولاً از



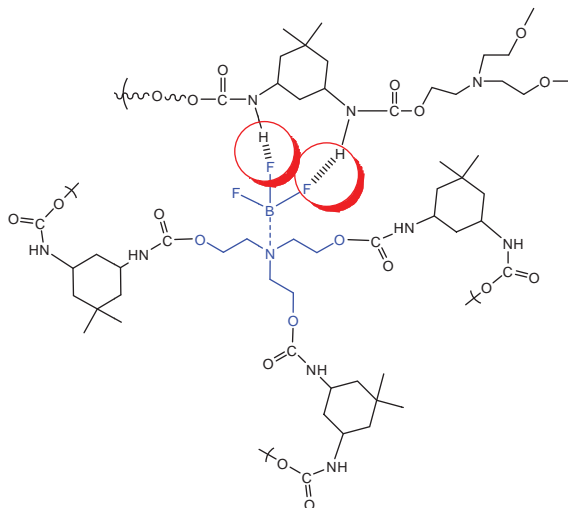
شکل (۵): نمودار استحکام کششی برای نمونه‌های مورد آزمایش.



شکل (۶): نمودار استحکام کششی برای نمونه‌های مورد آزمایش.



شکل (۷): نمودار استحکام کششی برای نمونه‌های مورد آزمایش.



شکل (۸): نحوه تشکیل پیوند هیدروژنی توسط T313.

دوازدهم و پانزدهم در جدول ۶ آورده شده است. برای بررسی دقیق‌تر نتایج نمودارهای درصد ازدیاد طول، سختی و استحکام کششی برای آزمون‌های انجام شده در شکل‌های ۵ تا ۷ آورده شده است. مکانیسم عمل عامل شبکه‌کننده T313 در شکل ۸ آورده شده است. نحوه تشکیل پیوندهای عرضی فیزیکی و هیدروژنی در پلی‌یورتان حاوی شبکه‌کننده T313 و عامل پیوندی MAPO در شکل ۹ آورده شده است. عامل پیوندی MAPO تحت مکانیسم دیگری نیز می‌تواند عمل نماید که این مکانیسم در شکل ۱۰ آورده شده است.

جدول (۶): نتایج تست کشش نمونه‌های پیش‌رانه تهیه شده.

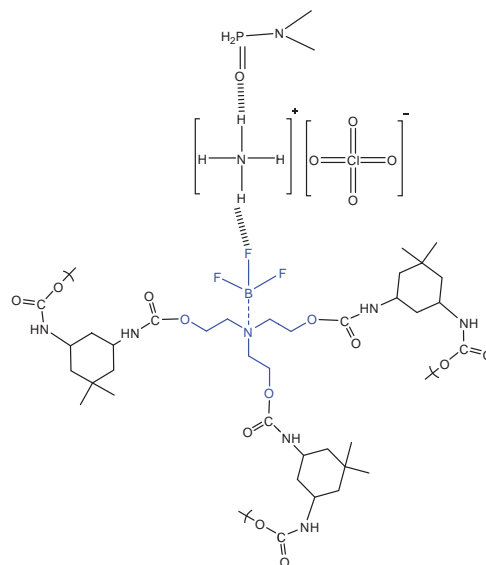
شماره نمونه	کد نمونه	روز نمونه‌برداری	Elastic Modulus (kgf/m)	%EL	TS (MPa)
۱	PM-1	D5	۵۸۹/۸۴۹	۵۹/۵۶	۱/۲۲
۲		D9	۶۳۵/۳۱۲	۵۵/۹۱۲	۱/۲۳
۳		D12	۷۱۶/۴۴۳	۵۷/۶۸۵	۱/۲۹
۴		D15	۶۸۳/۳۴۷	۵۰/۷	۱/۲۵
۵	PM-2	D5	۵۵۹/۱۳۶	۵۸/۵۶۷	۱/۱۶
۶		D9	۶۲۷/۶۵۰	۵۲/۰۹۵	۱/۲۷
۷		D12	۷۵۸/۳۷۰	۵۰/۶۳۲	۱/۳۴
۸		D15	۸۱۸/۳۶۷	۵۶/۸۱۲	۱/۳۹
۹	PM-3	D5	۳۶۲/۱۰۱	۴۹/۵۴۳	۰/۷۵
۱۰		D9	۳۸۹/۲۰۵	۶۵/۴۵	۰/۸۲
۱۱		D11	۴۱۱/۹۰۵	۶۸/۷	۰/۹
۱۲		D15	۴۲۸/۹۰۵	۷۳/۱۳	۰/۹۸
۱۳	PM-4	D5	۶۵۷/۶۶۰	۶۵/۴۵۹	۱/۰۶
۱۴		D9	۵۰۱/۵۲۹	۶۱/۲۸	۱/۰۵
۱۵		D12	۶۲۱/۸۰۴	۵۹/۶۲۶	۱/۰۹
۱۶		D15	۶۴۹/۳۹۴	۵۷/۵۳	۱/۱۳
۱۷	PM-5	D5	۶۱۱/۴۵۲	۶۳/۸۰۵	۱/۰۳
۱۸		D9	۶۳۸/۲۲۷	۶۲/۰۳	۱/۱۷
۱۹		D12	۷۰۳/۲۵۱	۶۰/۰۲۳	۱/۱۶
۲۰		D15	۷۱۲/۳۵۸	۵۹/۴	۱/۱۹

بررسی تأثیر ترکیب MAPO و T313 بر خواص رئولوژی و مکانیکی پیشرانۀ جامد مرکب بر پایه HTPB (علمی-ترویجی)

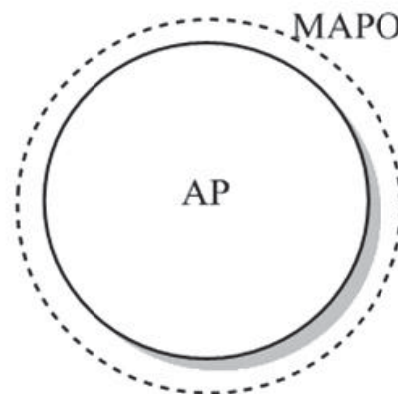
ناشی از ایجاد پیوندهای نوع اول و دوم توسط T313 و MAPO تحت مکانیسم‌های مطرح شده است. لازم بذکر است که میزان T313 و MAPO در این پیشرانۀ از سایر پیشرانۀ‌ها بیشتر می‌باشد. در بین نمونه‌ها کدهای PM-1 و PM-2 خواص مکانیکی و رئولوژی مناسب‌تری از سایر نمونه‌ها دارند. در این نمونه از میزان بهینه MAPO و T313 استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که میزان MAPO و T313 بایستی در مقدار بهینه استفاده شود و این ترکیبات تأثیر زیادی بر خواص رئولوژی و مکانیکی ایفا می‌نمایند.

### مراجع

- [1] Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1978.
- [2] Agrawal, J.P., *High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, John Wiley & Sons, Weinheim, Germany, 2010.
- [3] Badgular, D., Talawar, M., Asthana, S., and Mahulikar, P., "Advances in Science and Technology of Modern Energetic Materials: An Overview", *J. Hazard Mater*, Vol. 151, No. 2-3, pp. 289–305, 2008.
- [4] Yarmohammadi, M., Komeili, S., and Shahidzadeh, M. "Studying Crosslinker Chemical Structure Effect on the Tuning Properties of HTPB-Based Polyurethane," *Propellants Explos Pyrotech*, Vol. 43, No. 2, pp. 156–161, 2018.
- [5] Ang, H. and Pisharath, S., *Energetic Polymers: Binders and Plasticizers for Enhancing Performance*, John Wiley & Sons, Weinheim, Germany, 2012.
- [6] Ionescu, M., *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*, Ismithers Rapra Publishing, Shropshire, UK, 2005.
- [7] Ahmad, N., Khan, M., Ma, X., and Haq, N. "The Influence of Cross-Linking/Chain Extension Structures on Mechanical Properties of HTPB-based Polyurethane Elastomers," *Arab J. Sci. Eng.*, Vol. 39, No. 1, pp. 43–51, 2014.
- [8] Kordani, N., Adibipour, R., Vanini, A., and Zare, A., "Theoretical Models and Experimental Study on Mechanical Properties of Reinforced Polymer Matrix Using Different Kinds of Carbon Nanotubes", *Polym. Polym. Compos.*, Vol. 23, No. 4, pp. 251–260, 2015.
- [9] Oliveira, J., Pires, D., Diniz, M., Siqueira, J., Mattos, E., Rezende, L., Iha, K., and Dutra, R., "Termination of Primary Amine Content in Bonding Agent Used in Composite Solid Propellants", *Propellants Explos Pyrotech*, Vol. 39, No. 4, pp. 538–544, 2014.
- [10] Jain, S., "Solid Propellant Binders", *J. Sci. Ind. Res.*, Vol. 61, No. 11, pp. 899–911, 2002.
- [11] Davenas, A., *Solid Rocket Propulsion Technology*, Newnes, Boston, USA, 2012.
- [12] Akhavan, J., *The Chemistry of Explosives*, Royal Society of Chemistry, UK, 2011.



شکل (۹): نحوه تشکیل پیوندهای عرضی فیزیکی و هیدروژنی در پلی یورتان حاوی شبکه‌کننده T313 و عامل پیوندی MAPO.



شکل (۱۰): همپایمر شدن ترکیب MAPO بر روی سطح AP.

### نتیجه‌گیری

همان گونه که از نتایج مشخص می‌باشد با گذشت زمان پخت برای همه نمونه‌ها استحکام کششی بیشتر شده است که این امر ناشی از کاملتر شدن فرآیند پخت پیشرانۀ با گذشت زمان می‌باشد. این روند برای میزان سختی نیز مشاهده می‌شود. برای نمونه‌های PM-2 و PM-3 که تفاوت آنها در میزان T313 و MAPO به یک اندازه می‌باشد، مشاهده می‌شود که عمر کاربردی و EOM برای نمونه PM-3 بیشتر است که این روند قابل پیش‌بینی می‌باشد. چراکه، کراس‌لینک T313 در نمونه PM-3 بیشتر می‌باشد. البته استحکام کششی و سختی نمونه PM-3 از نمونه PM-2 کمتر است که این امر ناشی از افزایش کریستالینیتۀ پیشرانۀ در اثر افزایش میزان کراس‌لینک می‌باشد. خواص رئولوژی نمونه PM-4 از سایر نمونه‌ها ضعیف‌تر بوده و ویسکوزیتۀ دوغاب این پیشرانۀ به شدت بالایی باشد که این امر

