

واژه‌های کلیدی:

آمونومدی نیتراآمید/پلیمر
گلیسیدیل آزید، ویژگی‌های
احتراقی بالستیکی
پیشرانه جامد مرکب
پرانرژی
ایمپالس ویژه
نرخ سوزش

مروری بر ویژگی‌های احتراقی - بالستیکی پیشرانه جامد مرکب پرانرژی بر پایه آمونومدی نیتراآمید/پلیمر گلیسیدیل - آزید

صبام فقیهی قاضی جهانی^۱، علی اکبر جمالی^{۲*}

۱ تهران - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی شیمی
- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲ تهران - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی شیمی
- استادیار

چکیده ...

پیشرانه‌های جامد مرکب آمونومدی نیتراآمید/پلیمر گلیسیدیل آزید در نقش پیشرانه سبز به لحاظ قابلیت ممانعت از آزادسازی کلر ناشی از احتراق، جایگزین مناسبی برای پیشرانه‌های آمونوم-پرکلرات/پلی بوتادیان با گروه هیدروکسیل انتهایی است. ارزیابی خواص و کارایی پیشرانه جامد مرکب بر پایه ADN/GAP همراه با تحلیل‌های عددی احتراق در موتور پیشرانه جامد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ضمن معرفی مولفه‌های مؤثر در احتراق، اثر هر یک از این مولفه‌ها در عملکرد موتور گزارش شده است. در این گزارش؛ برخی مقایسه‌های تطبیقی به کمک ارائه شماری از نتایج آزمایش پیشرانه‌ها بر پایه ADN و AP با تمرکز بر ویژگی‌های ترمودینامیکی، عملکردی و خواص بالستیکی نظیر ایمپالس ویژه، نرخ سوزش، حساسیت به اصطکاک و حساسیت به ضربه عرضه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند بالا بودن ایمپالس ویژه پیشرانه‌های ADN/GAP ناشی از وزن مولکولی پایین و عدد مولی بالای گازهای احتراق است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

jamalis5@alumni.iust.ir

۱ مقدمه

نخستین بار طرح آمونیوم دی نیترا آمید (Ammonium Dinitramide (ADN)) در کاربردهای ویژه توسط پارک [۱]، به خصوص در نقش کارآمدترین اکسیدکننده برای پیشرانه‌های جامد معرفی شد. حداقل ۲۰ روش متفاوت برای تولید سنتز ADN وجود دارد که دو مورد از آن‌ها با جزئیات دقیق مورد توجه قرار گرفته است [۲]. یانگ و همکاران [۳]، با مرور مقالات مختلف با تکیه بر تجزیه حرارتی ADN و رفتار احتراق، کار مطالعاتی گسترده‌ای صورت دادند. ADN دارای مزیت دوگانه در برابر اکسیدکننده‌های اصلی فعال پیشرانه‌های نوین، شامل گرمای بالای تشکیل و احتراق پاک و سازگار با محیط زیست دارد. پیشرانه‌های کم اثر با عملکرد دودزایی پایین و افزایش سطح عملکرد از پیونددهنده پیرانرژی مانند پلیمر گلیسیدیل آزید (Glycidyl Azide Polymer (GAP)) به علت ترمیم موازنه اکسیژن در آن‌ها استفاده گسترده‌ای به عمل آمده است [۴]. پیشرانه‌های آمونیوم دی نیترا آمید / پلیمر گلیسیدیل آزید جایگزین مناسبی به عنوان پیشرانه‌های سبز با توان ممانعت از کلر آزاد شده پس از عمل احتراق، نسبت به پیشرانه‌های جامد آمونیوم پرکلرات / پلی بوتادی ان با گروه هیدروکسیل انتهایی است. نتایج آزمایشگاهی ایمپالس ویژه وزنی، نسبت اصطکاک، نرخ‌های سوزش و ... پیشرانه‌های مختلف بر پایه ADN/Al/ADN/GAP و GAP، ADN/FOX12/GAP و Al/AP/HTPB مقایسه شده است [۵]. مدل سازی احتراق پیشرانه جامد را می‌توان بر اساس تعداد فازها طبقه‌بندی کرد. محققان متعددی [۶ و ۷] روی مدل ساده برای احتراق دو فاز تمرکز کرده، به جهت اتفاقات شیمی - فیزیکی که در احتراق رخ می‌دهد، مدل احتراق چند فاز جامد را توسعه داده‌اند. در این تحقیقات چند مدل عددی مبتنی بر معادلات حاکم، معادلات بقای جرم، غلظت گونه‌ها، انرژی ارائه و برای تکمیل مدل سازی، محاسبه سینتیک شیمیایی سرعت محدود در دو فاز گازی و مایع انجام شده است [۶]. در کار دیگری نیز به منظور تحلیل مدل احتراق، مدل سازی و شبیه سازی توسط وو در سه ناحیه فاز جامد، لایه اسفنجی و فاز گاز با اتخاذ مختصات استوانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۷].

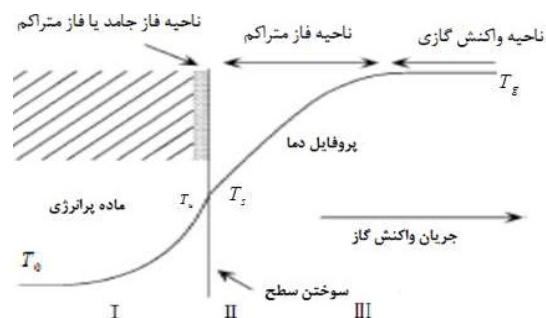
۲ احتراق و ویژگی‌های آن

احتراق یا سوختن، نتیجه فرایند شیمیایی گرمازا میان

ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. آزاد کردن گرما می‌تواند با تولید نور به صورت شعله یا درخشش حاصل از واکنش باشد. احتراق پدیده‌ای پیچیده است که مباحث گوناگونی نظیر اختلاط دینامیک سیال، سوخت و اکسیدکننده، واکنش شیمیایی، ترمودینامیک و انتقال حرارت را در بر می‌گیرد. درک عمیق فرایندهای فیزیکی و شیمیایی در احتراق، ضرورت اجتناب‌ناپذیری در طراحی مؤثر و مطمئن سامانه‌های احتراق و پیشرانه است. در فرایند مزبور، به ناحیه در حال آتش بین نواحی سوخته و نسوخته که در آن واکنش شیمیایی انجام می‌شود و محصولات ناشی از احتراق تولید می‌شود، ناحیه موج احتراق اطلاق می‌شود که به سمت ناحیه نسوخته توسعه می‌یابد. موج احتراقی مجزایی که با سرعت مادون صوت منتشر شود «دفلگیشن» نامیده می‌شود، موج احتراقی با سرعت‌های مافوق صوت نیز منتشر می‌شود که به آن «دتونیشن» می‌گویند. احتراق با انواع شعله شامل شعله‌های پیش آمیخته، شعله‌های غیرپیش آمیخته یا نفوذی، احتراق در غیاب شعله همراه می‌شود. ساختار موج احتراق پیشرانه مرکب بسیار متفاوت و پیچیده‌تر از پیشرانه همگن است. نمایش نموداری ساختار موج احتراق نوعی از مواد پرانرژی در شکل ۱ نشان داده شده است.

به طوری که در ناحیه (فاز جامد یا فاز متراکم) هیچ واکنش شیمیایی رخ نداده، دما از دمای اولیه (T_0) تا دمای تجزیه (T_{II}) افزایش می‌یابد؛ در ناحیه ۲ (ناحیه فاز متراکم) دما از T_{II} تا دمای سطح سوزش (T_s) افزایش می‌یابد که در این مرحله، تغییر فاز از جامد به مایع یا گاز رخ داده، گونه‌های واکنش‌گر گازی تشکیل شده و واکنش گرماگیر یا گرمازا روی می‌دهد. در ناحیه ۳ (ناحیه واکنش گازی) دما به سرعت از (T_s) به دمای شعله (T_g) (واکنش فاز گازی گرمازا افزایش می‌یابد [۹]). پیشرانه جامد؛ ماده پرانرژی است که گرمای قابل توجهی را در طول احتراق آزاد می‌کند. فرایند احتراق پیشرانه‌های جامد در سه فاز (جامد، مایع و گاز) به طوری که مدام موقعیت سطح مشترک بین فازها تغییر می‌کند، صورت می‌گیرد. در طی فرایند مزبور، حالت سوخت جامد از فاز جامد به فاز مایع (حاوی اجزای گاز مابقی و مایع) تغییر و متعاقباً به فاز گاز تبدیل می‌شود. ارزیابی تجزیه حرارتی و ویژگی‌های احتراق مواد پرانرژی

شامل مجموعه‌ای از فرایندهای فیزیکی-شیمیایی پیچیده‌ای است که از مواد مختلف تشکیل شده است. یکی از تفاوت‌های اصلی، ساختار شعله نفوذی برای پیشرانه مرکب است. در شعله پیش آمیخته سوخت و اکسیدکننده قبل از شروع واکنش‌های شیمیایی در مقیاس مولکولی با یکدیگر مخلوط می‌شوند؛ ولی در شعله نفوذی احتراق در سطح جدایش بین سوخت و اکسیدکننده روی می‌دهد؛ به عبارت دیگر اختلاط و واکنش به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد [۱۰].



شکل ۱ ساختار موج احتراق مواد پرتزوی [۹].

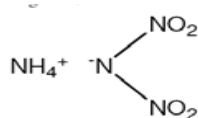
۳ مشخصات و خواص آمونیوم دی نیترا آمید

آمونیوم دی نیترا آمید، نمک جامد سفید رنگی است که کاتیون آن، آمونیا (NH_4^+) و آنیون آن، دی نیترا آمید ($-\text{N}(\text{NO}_2)_2$) است این در حالی است که موازنه اکسیژن برای آن $+25/79$ درصد است. فقدان اتم‌های فلزی و هالوژنی در آن باعث می‌شود که به اکسیدکننده در پیشرانه‌ها با حداقل دود تبدیل شود. در درجه حرارت 93 درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود و در دمای 150 درجه سانتی‌گراد با نرخ حرارتی $10 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ تجزیه می‌شود [۱۱]. ساختار شیمیایی ADN در شکل ۲ نشان داده شده است و جدول ۱ ناظر بر نمایش خصوصیات ماده ADN است.

منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی (Differential Scanning Calorimetry) ADN در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴ تاریخچه و سنتز آمونیوم دی نیترا آمید

آمونیوم دی نیترا آمید (ADN) در آزمایشگاه تارتاکوفسکی در اوایل دهه ۱۹۷۰، کشف شد و شروع فرمول‌بندی پیشرانه ADN با پیونددهنده‌های پلیمری پس از سال ۱۹۹۱ توسط پارک (Park) و همکاران [۱] در ایالات متحده آمریکا مطرح شد. پیشرانه‌های ADN با پیونددهنده‌های پلیمرگلیسیدیل‌آزید، پلی‌کاپرولاکتون و پلی-یورتان شامل



شکل ۲ ساختار شیمیایی ADN [۱۱]

قبل از هر استفاده‌ای بسیار مهم است. پیشرانه‌های جامد گاهی شامل چندین ماده شیمیایی، اکسیدکننده، پیونددهنده، نرم‌کننده، عامل پخت، پایدارکننده و عامل اتصال عرضی است. اکسیدکننده در پیشرانه، جزء اصلی است که اثرات قابل توجهی را روی مولفه‌های احتراق شامل درجه حرارت، سرعت سوزش، کسرمولی و غیره دارد. از زمره چنین اکسیدکننده‌هایی می‌توان به آمونیوم پرتراکرات، آمونیوم نیترات، آمونیوم دی نیترا آمید، سیکلوتری متیلن تری نیترا آمین (Cyclotrimethylene Trinitramine (RDX))، سیکلوتترامتیلن تترا نیترا آمین (Cyclotetramethylene Tetranitramine, Octogene (HMX))، پلیمرگلیسیدیل‌آزید و ... اشاره کرد. احتراق پیشرانه جامد، به دلیل نرخ سریع واکنش گرمازا، انرژی بالایی را در زمانی کوتاه آزاد در دسترس قرار می‌دهد. دمای شعله به مقدار بالایی معادل 1600 K برای ADN، 1400 K برای AP و 3000 K برای RDX، $3015-3325 \text{ K}$ برای نیتروگلیسیرین (NG)، $3050-3330 \text{ K}$ برای بوتان تری‌ال‌تری نیترات (BTTN) و $2817-2875 \text{ K}$ برای تری-متیلول‌اتان تری نیترات (TMETN) رسیده، بنابراین شار حرارتی حاصل از فاز گاز می‌تواند احتراق پایداری مورد نیاز پیشرانه جامد درون موتور را تضمین کند [۷]. مواد شیمیایی مختلف و نسبت آن‌ها منجر به خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت، ویژگی‌های احتراق و اختلاف در عملکرد می‌شوند. عملکرد پیشرانه‌های جامد به ویژگی‌های احتراق شامل حساسیت‌های فشار و دمای نرخ سوزش، شرایط سطح پیشرانه و توزیع فضایی انرژی آزاد شده، دما و غلظت گونه‌ها بستگی دارد. از آن جهت ارزیابی خواص سوزش دارای اهمیت است که احتراق پیشرانه جامد

۵ فرایندپذیری آمونیوم دی نیترا آمید

گرچه ADN متمایل به اکسیدشوندگی با مواد آلی است، لیکن اکسیدکننده مزبور به پیوندهای یگانه C-H C-C حمله نمی‌کند. دسته‌ای از ترکیبات با کربن‌های دو پیوندی نیز سازگاری خوبی با ADN دارند. عملاً با ایزوسیانات ناسازگار بوده، خودبه‌خود واکنش نشان داده، در حضور آن‌ها تجزیه می‌شود. این بدان معنی است که تعداد زیادی از پلیمرهایی که پیوند پلی‌یورتان را تحت پوشش قرار می‌دهند نمی‌توانند با ADN، حداقل در شکل معمول خود استفاده شوند. این امکان استفاده از پیونددهنده‌های HTPB یا GAP را با ایزوسیانات به عنوان عامل پخت حذف می‌کند. از آن جهت که بخشی از پیونددهنده‌های پلیمری متداول در پیشراندها برای استفاده با ADN سازگار نیستند، توسعه پیشراندهای جامد بر پایه ADN به شدت به انتخاب پیونددهنده‌های مناسب در آینده محدود می‌شود. با این حال نتایج خوبی با استفاده از پلیمر پلی‌کاپرولاکتون (PCP) به عنوان پیونددهنده با ADN به دست آمده است. فرمول‌بندی با این پیونددهنده، پایداری مناسب دراز مدتی را نشان می‌دهد [۲].

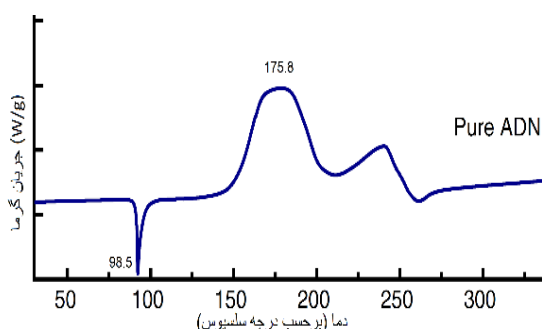
۶ پلیمر گلیسیدیل آزید (GAP)

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای گسترش پیونددهنده‌های پرانرژی به منظور بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و افزایش عملکرد با پیشراندهای جامد مرکب صورت گرفته است. پلیمر گلیسیدیل آزید از گروه پلیمرهای آزیدی شناخته می‌شود که دارای ویژگی‌هایی نظیر عدم حساسیت، تولید انرژی و پایداری حرارتی است. پیشراندهای جامد مرکب بر پایه پیونددهنده پرانرژی پلیمر گلیسیدیل آزید (GAP)، عملکرد بهتری نسبت به پیشراندهای جامد مرکب بر پایه پیونددهنده خنثی پلی‌بوتادیان با هیدروکسیل انتهایی (HTPB) دارد. این پلیمر معمولاً به حالت پیش پلیمر مایع با جرم مولکولی کم، به دو شکل شاخه‌ای و خطی تهیه می‌شود و با استفاده از عامل شبکه‌ای‌کننده به شکل الاستومر در می‌آید. اولین بار توسط وندنبرگ [۱۴] از واکنش سدیم-آزید با پلی‌اپی‌کلروهیدرین در دی‌متیل‌فرمامید تولید شد. GAP دارای فرمول ساختاری $H[-O-CH(-CH_2-N_3)-CH_2-]_n-OH$ است و از ویژگی‌های بارز آن این است که در هر مونومر یک

جدول ۱ خصوصیات ADN [۱۱].

واحد	مقدار	کمیت
گرم بر مول	۱۲۴/۰۷	وزن مولکولی
گرم بر سانتی متر مکعب	۱/۸۱	چگالی
درجه سانتی گراد	۹۳	نقطه جوش
کیلوژول بر مول	-۱۴۸	گرمای تشکیل
کیلوژول بر مول	۴۲۴	گرمای احتراق
درصد	+۲۵/۷۹	موازنه اکسیژن
درصد	۵۵/۲	رطوبت نسبی بحرانی

گروه‌های دی‌نیترا آمینی توسط چان و تورنر مطرح شد و سوزش پیشراندهای ADN/GAP در دمای محیط توسط جانسون و همکاران تشریح شد. یکی از اختراعات اولیه ثبت شده در جامعه غربی توسط تیوکول (Thiokol) [۱۲] در سال ۱۹۹۴ ثبت شد. با وجودی که تاکنون تقریباً ۲۰ نوع روش مختلف سنتز برای تولید موفقیت آمیز ADN وجود دارد؛ نخستین بار ADN در مؤسسه زیلینسکی در مسکو سنتز شد و به‌طور مشخص امروزه ADN توسط یورنکو بوفورس (Eurenco Bofors) در سوئد تولید می‌شود. تولید مقیاس کوچک متعلق به کارخانه‌ای است که بدواً برای تولید سایر مواد پرانرژی ساخته شده است. با این وجود که تولید ماده ADN بهینه نیست، این محصول امروز با قیمت بسیار گران در دسترس است [۱۳].



شکل ۳ منحنی گرماسنجی روبشی تفاضلی مربوط به ADN (نرخ حرارتی: 10 K.min^{-1}) [۱۱].

GAP هم به عنوان نرم‌کننده با جرم میانگین مولکولی \overline{M}_n معادل ۴۰۰ تا ۵۰۰ و هم پیونددهنده \overline{M}_n معادل ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ در پیشرانه‌ها به منظور افزایش ایمپالس ویژه (I_{SP}) به کار می‌رود SNPE فرانسه، واحد نیمه صنعتی برای تولید GAP راه‌اندازی کرده است. GAP به خاطر سنتز نسبتاً سراسر است و هزینه پایین و دسترس بودن یکی از پرکاربردترین پیونددهنده‌های پرانرژی است [۱۶].

۷ بررسی محیط زیستی پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه ADN/GAP و AP/HTPB

آگاهی عمومی نسبت به مسئله محیط زیست، باعث شده است که محققان تلاش کنند، سوخت سبز برای پیشرانش راکت پیدا کنند. رایج‌ترین پیشرانه جامد فعلی برای پرتابه براساس اکسیدکننده‌ای که تا امروز استفاده می‌شد پیشرانه آمونیوم پرکلرات ($\text{AP} (\text{NH}_4\text{ClO}_4)$) در ترکیب با پلی‌بوتادی‌ان هیدروکسیل انتهایی HTPB بود، AP دارای خواص مطلوب بسیاری از قبیل مقدار اکسیژن بالا، چگالی بالا، خطر انفجار کم و خواص احتراقی خوب است. یکی از محصولات اصلی احتراق،

جدول ۲ خواص پلیمر گلیسیدیل‌آزید [۱۶].

انواع GAP		خواص
دو عاملی	سه عاملی	
۱/۲۹	۱/۲۹	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۲۸۰	۲۸۰	گرمای تشکیل (کالری بر گرم)
± 3.0	≥ 9.0	جرم میانگین مولکولی
۱۷۰۰		
-۴۵	-۴۵	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)
۲	۲/۵-۳	عاملیت
		پایداری در خلأ (میلی‌لیتر بر گرم)
≥ 3	≥ 3	در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰۰ ساعت
زرد	زرد	رنگ مایع

گروه N_3 وجود دارد. تجزیه این گروه در مرحله اول تفکیک گرمایی پلیمر، منجر به آزاد شدن گرمایی در حدود ۳۷۶ کیلوژول بر مول می‌شود که مبنایی برای خواص بالتستیکی GAP در پیشرانه‌ها است. به موجب استفاده از GAP، به اکسیدکننده کم‌تری در فرمول‌بندی نیاز است. با این شرایط؛ کسر جرمی آلومینیوم در مقایسه با سامانه پیونددهنده‌ی HTPB بیشتر شده؛ بنابراین ایمپالس ویژه افزایش می‌یابد. GAP همچنین دارای انرژی تشکیل مثبت و بالا، حساسیت انفجاری پایین و انرژی پتانسیل بالاست. این پیونددهنده، پلیمری پرانرژی است که گرانشی بالایی دارد و برای کاهش گرانشی آن و بارگیری جامد مورد نیاز، از نرم‌کننده‌ای مانند تری-متیلول‌تان تری‌نیترات (TMETN) استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر به منظور جایگزین کردن پیونددهنده‌های خنثی با پیونددهنده‌های پرانرژی، تحقیقات متعددی صورت گرفته است. استفاده از پیونددهنده‌های پرانرژی علاوه بر افزایش محتوای انرژی برای پیشرانه، ضریب ایمنی را در فرایند تولید و انبارش پیشرانه افزایش می‌دهد. پلیمر گلیسیدیل‌آزید به دلیل ساختار شیمیایی خود قادر است سامانه پیونددهنده-نرم‌کننده همسانی ارائه کند و با ایزوسیانات‌ها و دی‌ایزوسیانات‌ها وارد واکنش شده، تولید پلی‌پورتان پرانرژی کند. این ترکیب، غیرحساس و از نظر حرارتی پایدار است و می‌تواند بدون حضور اکسیدکننده با دما و فشار بالایی بسوزد و قادر است با اکسیدکننده‌هایی نظیر آمونیوم‌دی‌نیترا‌مید (به جای آمونیوم پرکلرات)، پیشرانه‌های پاک، غیرقابل ردیابی و عاری از کلر تولید کند. پلی‌پورتان‌های تهیه شده از پلی‌بوتادی‌ان با هیدروکسیل انتهایی و پلیمر گلیسیدیل‌آزید به طور وسیع به عنوان پیونددهنده پیشرانه‌های جامد به کار می‌روند. در مواقعی که پیشرانه‌های دارای نیروی محرکه زیاد مورد نیاز باشد، HTPB به دلیل مقدار انرژی پایین، پیش‌پلیمر مناسبی نیست. پیونددهنده‌های پرانرژی جدید موادی هستند که می‌توانند رضایت کاربران را نسبت به نیازهای جدیدشان جلب کنند. در این میان، پلیمر پرانرژی گلیسیدیل‌آزید از جمله پیونددهنده‌هایی است که بیش‌ترین مطالعه به‌طور کامل روی آن انجام شده و سنتز، کارایی و کاربردها توسط محققان مختلف ارائه شده است [۱۵]. خواص پلیمر گلیسیدیل‌آزید در جدول ۲ ارائه شده است.

۸ فرمول بندی پیشرانه

سه فرمول بندی مختلف بر پایه ADN/GAP انتخاب و با استاندارد پیشرانه AI/AP/HTPB مقایسه شده است. پیشرانه ADN/GAP آلومینیومی با پیشرانه مرجع AP/HTPB آلومینیومی به صورت مستقیم با هم مقایسه شده است. دو پیشرانه کامپوزیتی غیرآلومینیومی برای مقایسه عملکرد پیشرانه کم اثر با پیشرانه کامپوزیتی استاندارد انتخاب شدند. ADN/HMX/GAP (آمونیم دی نیترا مید/سیکلو تترامتیلن تترانیترا آمین اکتوژن پلیمر گلیسیدیل آزید) نشان دهنده پیشرانه با عملکرد بالا است. فقدان دسترسی به ADN در آن زمان، استفاده از HMX را به عنوان پرکننده برای بهبود فرایند خواص مکانیکی و محتوای انرژی ضروری می نمود. پیشرانه های دو پایه عملکرد پایین تری دارند. این باعث می شود که بخشی از ADN را با مواد پرانرژی با حساسیت کم تر مانند N-گوانیل اوره دی نیترا مید ((Guanylurea Dinitramide, GUDN (FOX12)) جایگزین کرد. هدف، دسترسی به پیشرانه ای با ایمپالس ویژه مشابه پیشرانه دو پایه ولی با حساسیت کم به ضربه است. جدول ۳ شرح جزئیات اجزای چهار پیشرانه مختلف بر پایه GAP و HTPB شامل (الف) AI/AP/HTPB، (ب) AI/ADN/GAP، (ج) ADN/HMX/GAP و (د) ADN/FOX12/ADN/GAP را نشان می دهد.

۹ آزمایش های موتور در مقیاس کوچک

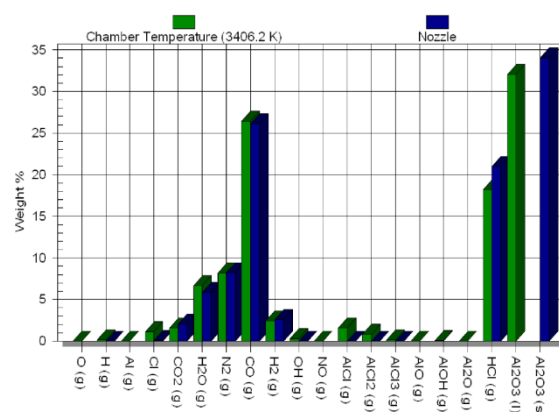
موتور با قطر ۲/۵۲ اینچی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق جزئیات شکل ۵، گرین انتها سوز با قطر ۲/۵۲ اینچی با رفتار سوزش خنثی برای آزمایش در محفظه احتراق انتخاب شد. گرین انتها سوز عایق شده (قسمت * در شکل ۵) سوزش بر روی سطحی به سمت افشانک، آزاد است.

تغییرات فشار در محفظه احتراق پیشرانه های آلومینیومی و غیرآلومینیومی در شکل های زیر نشان داده شده است. همه گرین های پیشرانه بر پایه ADN/GAP نشان داده شده در احتراق پایدار مشابه با گرین پیشرانه مرجع AI/AP/HTPB است.

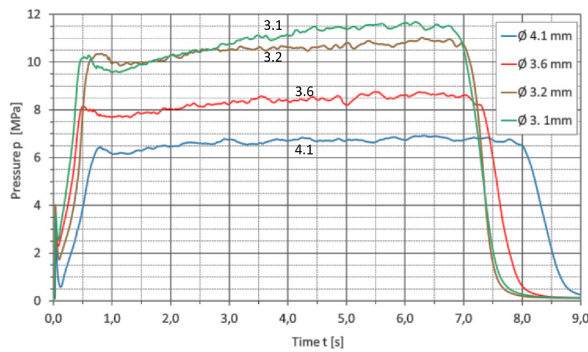
از شکل های بالا می توان نتیجه گرفت که هر چه قطر افشانک کم تر باشد، در پیشرانه های AI/ADN/GAP و AI/AP/HTPB فشار تولیدی موقع سوزش بیشتر می شود. شکل ۸ فشارهای اندازه گیری شده بر حسب زمان در قطرهای مختلف افشانک پیشرانه ADN/HMX/GAP را

کلرید هیدروژن است که به عنوان آلودگی بحرانی در نظر گرفته می شود، زیرا این ماده باعث تشکیل باران اسیدی، تخریب لایه ازن و اختلال در غده تیروئید می شود و همچنین باعث آسیب زایی و خوردگی پیرامون پایه راه اندازی می شود. نمودار محصولات واکنش به دست آمده از طریق برنامه محاسباتی فرانوفر (ICT)) (Thermodynamic Code from Fraunhofer) در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۷].

پیدا کردن جایگزین برای AP، کار چالش برانگیزی است. در حال حاضر تنها دو اکسیدکننده سبز شامل آمونیوم نیترات (NH_4NO_3)، (Ammonium nitrate (AN)) و آمونیوم دی نیترا مید، ($\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$) امکان عملی شدن دارد. آمونیوم نیترات AN، اکسیدکننده ای بسیار ارزان است که عمدتاً به عنوان کود استفاده می شود. پیشرانه های مبتنی بر AN با نرخ سوزش کم هستند و عمدتاً در کاربردهای عملکرد پایین مانند ژنراتورهای گاز استفاده می شوند. ADN اکسیدکننده پرانرژی سازگار با محیط زیست است. ADN دارای مزیت دو گانه در برابر اکسیدکننده های اصلی فعال پیشرانه های کامپوزیت مدرن نظیر آمونیوم پرکلرات از لحاظ احتراق پاک، گرمای تشکیل بالا در نتیجه سازگاری با محیط زیست دارد، پیشرانه های کم اثر با افزایش سطح عملکرد به علت موازنه پایین اکسیژن ۲۵/۸ درصد به جای ۳۴/۴ درصد AP، پیوند دهنده پرانرژی مانند پلیمر-گلیسیدیل آزید برای جبران این نقص مورد نیاز است [۱۷].



شکل ۴ محصولات واکنش به دست آمده از طریق برنامه محاسباتی (ICT) انبساط افشانک تحت تعادل انتقالی [۱۷].



شکل ۶ فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان در قطرهای مختلف نازل پیشرانه Al/ADN/GAP [۵].

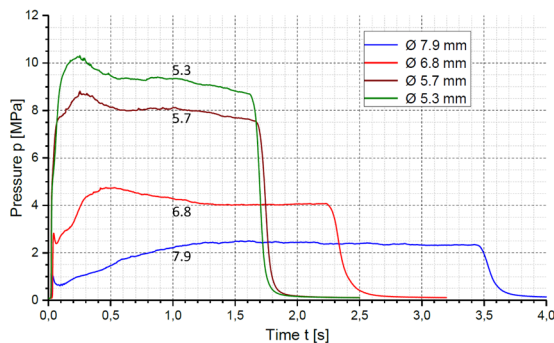
ویژه مهم‌ترین خاصیت بالتستیکی پیشرانه‌های راکت است که مقدار آن برای تعیین جرم مورد نیاز در رسیدن به الزامات بالتستیکی ضروری است. این مولفه به خواص پیشرانه و طراحی موتور موشک (پوسته) پیشرانه وابسته است. ایمپالس ویژه متناسب با نسبت تراست بر نرخ جریان وزنی واحد پیشرانه (\dot{W})، طبق معادله زیر تعریف می‌شود.

$$I_{SP} = F / \dot{w} \quad (1-3)$$

ایمپالس ویژه پیشرانه تابعی از مولفه‌های شیمیایی است که با معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{SP} = K \sqrt{n T_C} = K_1 \sqrt{T_C / M} \quad (2-3)$$

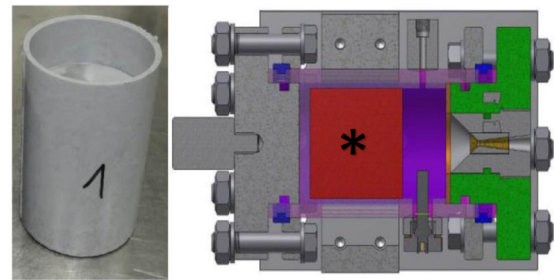
در اینجا؛ K و K_1 ثابت‌های مختلف، T_C دمای شعله، n



شکل ۷ فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان در قطرهای مختلف افشانک پیشرانه Al/AP/HTPB [۵].

جدول ۳ فرمول بندی پیشرانه انتخاب شده ترکیب درصدها براساس وزن جرمی [۵].

اجزا	الف	ب	ج	د
پیونددهنده	۹/۵۵	۲۴/۰	۲۵/۵	۲۵/۶
نرم کننده	۴/۱	—	۴/۵	۴/۴
مواد افزودنی	۰/۳۵	—	—	—
آمونیم پرکلرات	۶۸/۰	—	—	—
آمونیم دی نیتراآمید	—	۶۰/۰	۵۸/۵	۵۰/۰
سیکلو تترامیلن نیتراآمین	—	—	۱۱/۵	—
N-گوانیل اوره دی نیتراآمید	—	—	—	۲۰/۰
آلومینیوم	۱۸/۰	۱۶/۰	—	—



شکل ۸ گرین با عایق و بخش تقاطع محوری محفظه احتراق با نشان دادن افشانک به سمت راست [۵].

نشان می‌دهد.

شکل ۹، فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان در قطرهای مختلف افشانک پیشرانه ADN/FOX12/GAP را نشان می‌دهد.

براساس نتایج ملاحظه می‌شود با کاهش قطر افشانک، فشار محفظه تا دو برابر افزایش می‌یابد. پیشرانه Al/AP/HTPB در طی احتراق مقدار زیادی دود تولید می‌کند، پیشرانه ADN/GAP آلومینیومی اثر ثانویه (دود) ندارد و دو پیشرانه غیر آلومینیومی نشان داده شده هیچ اثر قابل رؤیتی ندارد [۵].

۹ عملکرد ترمودینامیکی

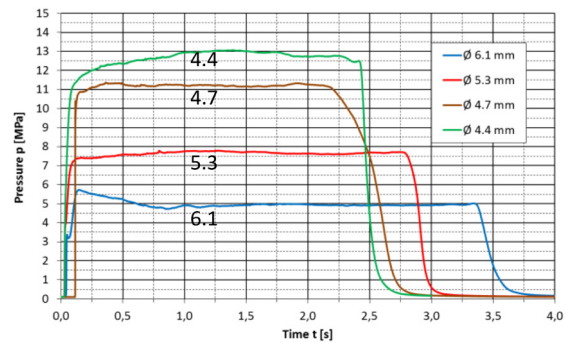
به منظور مقایسه کارایی پیشرانه‌های موشک، ایمپالس

FOX12/GAP به صورت تجربی است [۵].

در جدول ۴، ایمپالس‌های ویژه وزنی به صورت تجربی محاسبه و ارائه شده است. ایمپالس ویژه در فشار محفظه تقریباً ۷ MPa مقایسه شده است. با وجود ایمپالس ویژه نظری بالاتر پیشرانه فلزی، ایمپالس ویژه محاسبه شده از اطلاعات تجربی با غیرآلومینیومی مشابه هستند. بدیهی است ایمپالس ویژه تجربی پیشرانه مرکب Al/

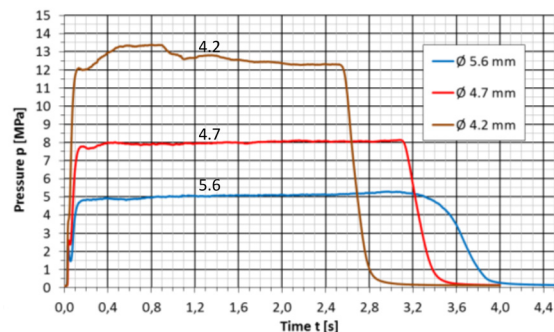
جدول ۴ نتایج آزمایش‌های پیشرانه‌ها در فشار محفظه هفت مگاپاسکال (نسبت فشار ۱:۷۰).

پیشرانه	الف	ب	ج	د
چگالی	۷۵۹	۷۱۳	۵۸۴	۵۷۷
موازنه اکسیژن (درصد)	۶۱	۲۳	۱۷	۷۱
دمای محفظه (کلوین)	۳۴۵۵	۳۵۱۸	۲۷۶	۲۴۵
عدد مولی کل	۳۷/۶	۳۹/۹	۴۵/۶	۴۶/۸
میانگین جرم مولی گاز	۲۹/۲	۲۷/۰	۲۱/۹	۲۱/۴
فشار محفظه تنوری	۷	۷	۷	۷
فشار محفظه تجربی	۸/۲	۷/۹	۷/۶	۷/۹
نرخ سوزش (تجربی)	۸/۲	۲۴/۱	۲۱/۱	۱۹/۰
ایمپالس ویژه (عددی)	۲۶۰۰	۲۶۹۸	۲۴۶	۲۳۳
ایمپالس ویژه (تجربی)	۲۰۷۰	۲۲۴۷	۲۲۳	۲۰۹
نسبت ایمپالس‌های	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۹۰
ایمپالس ویژه حجمی	۳۶۳۲	۳۸۴۰	۳۵۴	۳۳۰
سرعت مشخصه (عددی)	۱۵۲۳	۱۵۹۶	۱۵۶	۱۴۸
سرعت مشخصه (تجربی)	۱۲۳۱	۱۳۴۶	۱۴۲	۱۳۴
بازده	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۹۰

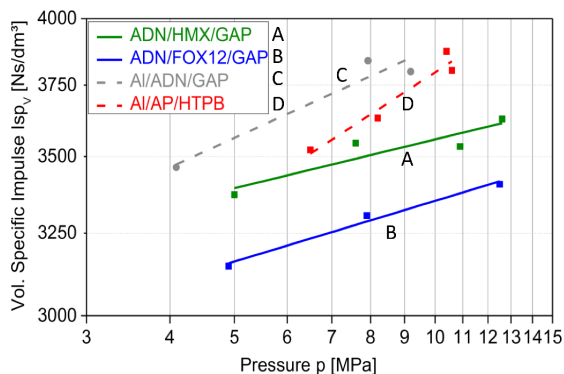


شکل ۸ فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان در قطرهای مختلف افشانک پیشرانه ADN/HMX/GAP [۵].

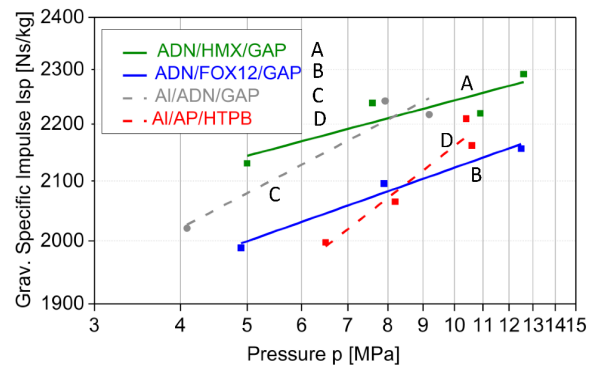
تعداد مول‌های گاز تولید شده بر واحد جرم پیشرانه و M متوسط جرم مولکولی محصولات گازی احتراق است [۱۶]. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است و از فشار و نیروی تراست ثبت شده، با استفاده از برنامه محاسباتی (ICT) به کمک شرایط جریان تعادلی محاسبه می‌شود. چگالی‌ها و همچنین دماهای محفظه پیشرانه‌های غیرآلومینیومی، کم‌تر از پیشرانه آلومینیومی است. محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهد که عدد مولار گازها بالاتر و متوسط جرم‌های مولکولی محصولات واکنش گازها پایین‌تر است. هر دو تأثیر مثبت بر روی ایمپالس ویژه و پایداری سرعت مشخصه (C^*) دارند. در جدول ۴ نتایج آزمایش‌های پیشرانه‌ها در فشار محفظه، ۷ مگاپاسکال (نسبت فشار ۱:۷۰) محاسبه شده است. داده‌های پیشرانه FOX12/GAP و ADN/



شکل ۹ فشارهای اندازه‌گیری شده برحسب زمان در قطرهای مختلف افشانک پیشرانه ADN/FOX12/GAP [۵].



شکل ۱۱ ایمپالس‌های ویژه حجمی در فشارهای مختلف از ایمپالس ویژه وزنی تجربی و چگالی پیشرانه‌ها محاسبه شده است [۵].



شکل ۱۰ ایمپالس ویژه وزنی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی در فشارهای مختلف [۵].

۸۰ تا ۶۰ درصد وزنی AP و ۲۰ تا ۵ درصد HTPB، بین ۱۰ تا ۳۰ درصد باشد ایمپالس ویژه به بیشترین مقدار اوج خود می‌رسد و همچنین وقتی مقدار درصد آلومینیوم بیشتر شود باعث انسداد افشانک شده و ایمپالس ویژه کم‌تر می‌شود. عملکرد ترمودینامیکی برای فرمول‌بندی پیشرانه دیگر نیز وجود دارد، ایمپالس ویژه و ایمپالس ویژه حجمی فرمول‌بندی‌های پیشرانه ADN همراه با ۲۰ درصد HMX و سه نوع پیونددهنده مختلف با افزایش مقادیر جامدات پراورزی در نمودارهای شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

ایمپالس ویژه وزنی و حجمی پیشرانه‌های مختلف با افزایش مقدار کل مواد جامد پراورزی افزایش می‌یابد؛ ولی برای برخی پیشرانه‌ها از مقدار مشخصی به بعد کاهش می‌یابد.

۱۰ ویژگی‌های سوزش پیشرانه جامد

شکل نمایی قانون نرخ سوزش که با نام قانون ویله نیز شناخته شده است؛ مطابق رابطه (۳-۳) ارائه می‌شود [۱۶].

$$r = aP_c^n \quad (3-3)$$

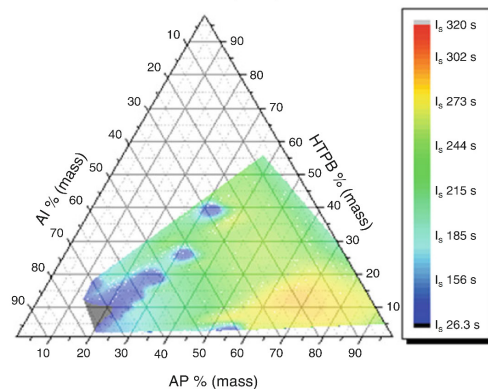
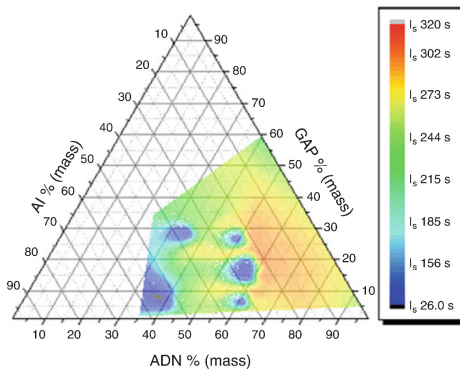
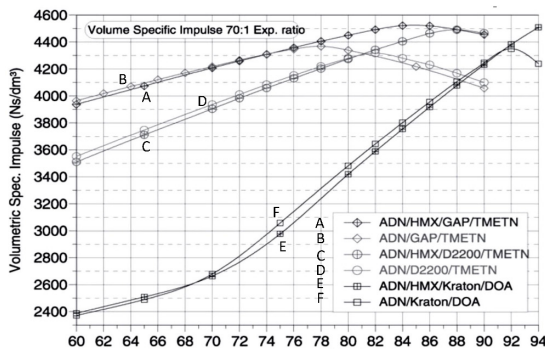
در اینجا a ، ضریبی است که به دمای اولیه پیشرانه وابسته است و در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵ قرار دارد. فشار محفظه P_c و توان n نمای فشار و تابعی از فرمول‌بندی پیشرانه است. نرخ‌های سوزش پیشرانه‌های ADN/GAP

در این فشار محفظه پایین‌تر است و حتی پایین‌تر از پیشرانه N-گوانیل‌اوره‌دی‌نیترا‌مید است. دلایل ممکن این است که دو فاز از دست می‌دهد و احتراق کامل انجام نمی‌شود و نشان‌دهنده بازده پایین سرعت مشخصه (C^*) است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ایمپالس‌های ویژه تحلیلی-تجربی مقایسه شده است. در مورد ایمپالس‌های ویژه وزنی پیشرانه ADN/HMX/GAP از پیشرانه Al/AP/HTPB در کل محدوده فشار بهتر عمل می‌کند حتی پیشرانه مرکب از اجزای ADN/FOX12/GAP با ضریب عملکرد پایین‌تر، بهتر از پیشرانه Al/AP/HTPB در محدوده فشار پایین‌تر عمل می‌کند. نمایش مقادیر ایمپالس ویژه وزنی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی در فشارهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۵].

ایمپالس‌های ویژه حجمی در فشارهای مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

وقتی که فقط ایمپالس ویژه حجمی در نظر گرفته شود؛ به‌طور معمول پیشرانه‌های آلومینیومی بهتر عمل می‌کنند. اما تا ده مگاپاسکال، پیشرانه‌های Al/ADN/GAP بهتر از پیشرانه‌های Al/AP/HTPB عمل می‌کنند. شکل ۱۲ نمایش مقایسه‌ای میان ایمپالس ویژه وزنی فرمول‌بندی AP/HTPB/Al و فرمول‌بندی ADN/GAP/Al است.

با توجه به شکل (۱۲) پیشرانه ADN/GAP/Al وقتی ۵۰ تا ۷۵ درصد ADN بین ۱۰ تا ۳۵ درصد و Al بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و پیشرانه



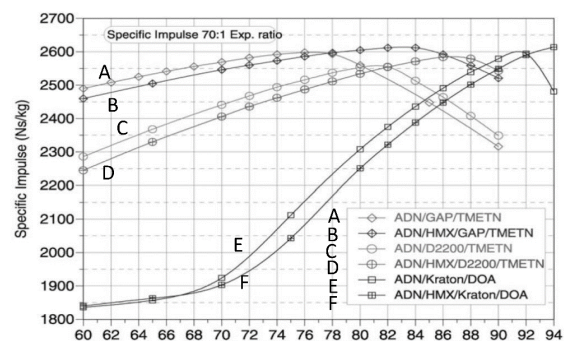
شکل ۱۴ حداکثر ایمپالس ویژه حجمی پیشران‌های ADN/ADN و GAP/TMETN, PU/TMETN, HMX (۱:۱) با پیونددهنده‌های (Polyesterurethane) و (Kraton/DOA (Di-isooctyl-adipate)) بسته به مقدار کل مواد جامد پر انرژی [۱۸].

ویژگی‌های سوزش برای فرمول بندی پیشرانه دیگر نیز وجود دارد. نرخ‌های سوزش و نماهای فشار فرمول بندی ADN با مقادیر یافت شده جانسون و همکاران مطابقت دارد. مقایسه رفتاری سوزش در دماهای محیط در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۱۹ و ۲۰ اختلاف فرمول بندی‌های ADN/GAP و AP/GAP پخته شده با بیس پروپارژیل سوکسینات را نشان می‌دهد. اگرچه فرمول بندی AP/GAP در اینجا نرخ‌های سوزش پایینی را نشان می‌دهد، تغییری به اندازه‌های ذرات کوچک‌تر AP ممکن است نرخ‌های سوزش نسبت به فرمول بندی ADN بالاتر رود. تأثیر اندازه ذرات بر رفتار سوزش فرمول بندی‌های ADN باید به جهت مخالف، باشد همان‌طور که سال‌ها پیش توسط مانلیس [۲۰] منتشر شد، اما این واقعیت هنوز هم برای پیشران‌های ADN/GAP در حال بررسی است [۱۸].

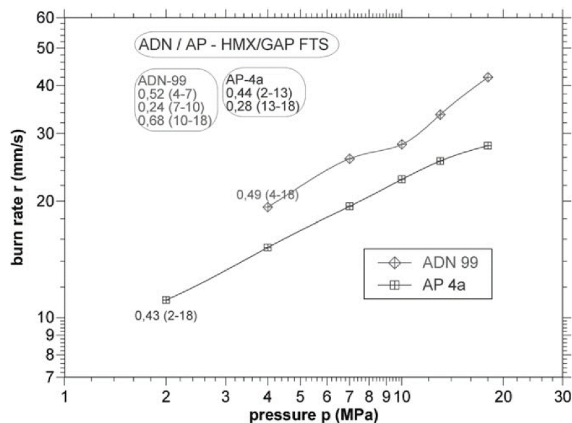
شکل ۱۹ تفاوت در رفتار سوزش فرمول بندی‌های ADN/GAP و ADN/GAP/TMETN را نشان می‌دهد که منعکس کننده افزایش نرخ‌های سوزش و عملکرد ناشی از ۳۳/۳ درصد نیترات استر در فرمول ADN109 است. شکل ۲۰ تفاوت در رفتار سوزش فرمول بندی ADN/GAP/TMETN پخته شده با آن‌هگزیل متان سوکسینات و بیس پروپارژیل سوکسینات را نشان می‌دهد. اگرچه فرمول بندی ADN109 و ADNV59 با سایر مولفه‌های فرمول بندی متفاوت ارائه می‌شوند. نرخ‌های سوزش پیشران‌های پخت با بیس پروپارژیل سوکسینات نسبت به

شکل ۱۲ مقایسه بین ایمپالس ویژه وزنی (تعادل ثابت) فرمول بندی AP/HTPB/Al و فرمول بندی ADN/GAP/Al [۱۷].

حداقل دو برابر پیشران‌های AP/HTPB است. توان فشار اندازه‌گیری شده به صورت تجربی از آزمون موتور در بیشتر موارد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های کرافورد کم‌تر است. شکل ۱۵ و ۱۶ نرخ‌های سوزش در فشارهای مختلف آزمون موتور و بمب کرافورد را نشان می‌دهد.

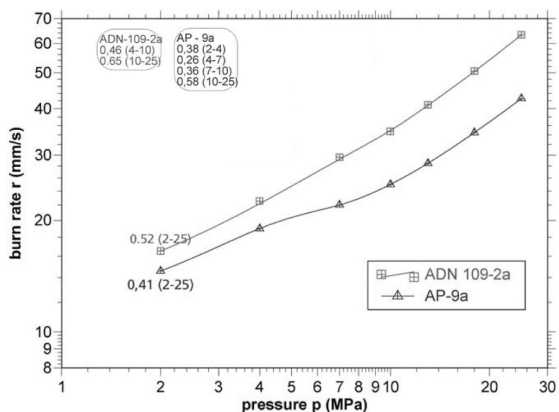


شکل ۱۳ حداکثر ایمپالس ویژه پیشران‌های ADN و ADN/HMX با پیونددهنده‌های GAP/TMETN, PU/TMETN و Kraton/DOA بسته به مقدار کل مواد جامد پر انرژی [۱۸].

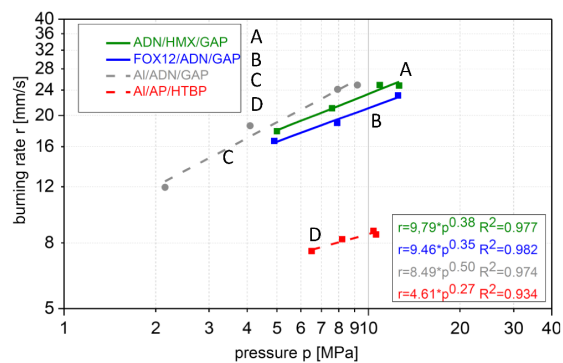


شکل ۱۷ رفتار سوزش فرمول بندی ADN/GAP پخته شده با بیس پروپارژیل سوکسینات (ADN۹۹) در مقایسه با فرمول AP/GAP (AP) [۱۸].

توسط برنامه محاسباتی فرانوفر (ICT) انجام شده است. وجود FOX12 در فرمول بندی ADN/GAP باعث کاهش حساسیت شده و خود در کلاس ۳،۱ رده بندی می شود. در مورد سایر پیشرانه‌ها بر پایه ADN/GAP و بدون FOX12 طبقه بندی مشخصی موجود نبوده و اغلب در کلاس ۳،۱ رده بندی می شوند. با انجام آزمون GAP با قطر خرج ۲۱ میلی متری به کمک برنامه محاسباتی فرانوفر (ICT)، برخی ابهامات در کالیبره کردن، قطری بزرگتر در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۸ رفتار سوزش فرمول بندی ADN/GAP (ADN109-2) پخته شده با بیس پروپارژیل سوکسینات در مقایسه با فرمول AP/GAP/TMETN (AP 9a) [۱۸].

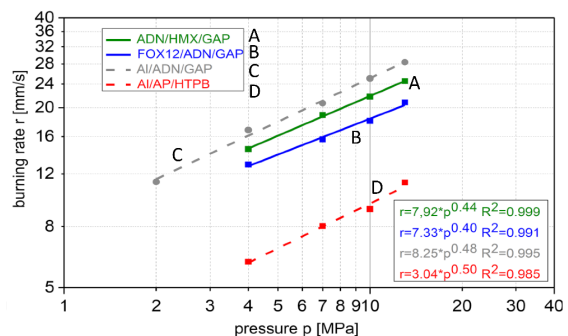


شکل ۱۵ نرخ‌های سوزش در فشارهای مختلف تست موتور [۵]

پیشرانه‌های پخت با ایزوسیانات بالاتر است. یکی دیگر از ویژگی‌های جالب این است که نرخ‌های سوزش و نماهای فشار به زمان پخت بستگی دارد. نرخ‌های سوزش پیشرانه‌های بر پایه ADN/GAP ما بین ۲۵ تا ۳۲ میلی متر بر ثانیه در فشار ۱۰ مگاپاسکال است که در حدود ۲۰ درصد بالاتر از فرمول بندی AP/GAP هستند. گرچه ممکن است نرخ سوزش AP با به کار بردن اندازه ذرات ریز از پیشرانه‌های ADN بالاتر رود. در هر دو نوع پیشرانه نماهای فشار مناسب در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۵۴ بین ۴ و ۱۸ مگاپاسکال است [۱۸].

۱۱ حساسیت پیشرانه‌های جامد مرکب

برای تعیین حساسیت انفجاری، آزمایش‌های مربوط به GAP در لوله‌های پلی متیل متاکریلات (Polymethylmethacrylate) با قطر ۲۱ میلی متر انجام می شود. برای تعیین طبقه بندی، آزمون پلیمر گلیسیدیل آزید در مقیاس کوچک



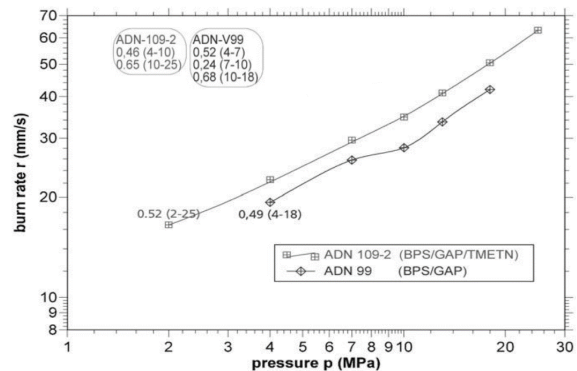
شکل ۱۶ نرخ‌های سوزش در فشارهای مختلف بمب کرافورد [۵]

چکش آلمانی بم (BAM) و دستگاه اصطکاک بزرگ با استفاده از صفحات و پین‌های چینی تعیین می‌شود [۱۸]. حساسیت به ضربه و اصطکاک برای پیشران‌های AP/GAP و ADN/GAP بیش تر، کم تر یا برابر است؛ ولی پیشران‌های ADN حساسیت بیش تری نسبت به اندازه ذرات کوچک تر پیشران‌های AP دارند. پیشران‌های AP/GAP دارای حساسیت کم حتی با نیترات استر است. پیشران‌های ADN/GAP نسبت به اصطکاک ۷۰ تا ۱۶۰ نیوتن حساس هستند و برخی فرمول بندی‌ها به ضربه ۲ تا ۵ نیوتن - متر خیلی حساس هستند. در مقایسه پیشران‌های دو پایه و پایه و Al/AP/HTPB (الف) گستره حساسیت‌ها در مقدار مشابهی قرار دارند. جدول ۶ مقدار حساسیت به ضربه و اصطکاک پیشران‌های مختلف بر پایه ADN/GAP شامل چهار دسته پیشران Al/AP/HTPB (الف)، Al/ADN/GAP (ب)، ADN/HMX/GAP (ج)، ADN/FOX12/GAP (د) را نشان می‌دهد. با این شرایط حساسیت به اصطکاک پیشران دو پایه (FS) ۱۲۰ نیوتن و حساسیت به ضربه پیشران دو پایه (IS) ۵ نیوتن متر، حساسیت به اصطکاک پیشران Al/AP/HTPB (FS) ۱۲۰-۶۰ نیوتن و حساسیت به ضربه پیشران Al/AP/HTPB (IS) ۵-۸ نیوتن متر و حساسیت به اصطکاک پیشران AP/HTPB (FS) ۱۲۰-۳۰ نیوتن و حساسیت به ضربه پیشران AP/HTPB (IS) ۴-۳ نیوتن متر است.

جدول ۵ نتایج آزمون پلیمرگلیسیدیل آزید در قطر خرج ۲۱ میلی متری (کد ترمودینامیکی استاندارد) [۵].

پیشران	الف	ب	ج	د
پلی متیل متاکریلات (میلی متر)	۰	۴	۴	۱
فشار اولیه (مگا پاسکال)	۸۳	۶۲	۶۲	۷۷
کلاس	< ۱/۳	۱/۳*	۱/۳*	۱/۳

*مشخص نیست. آزمون GAP با قطر خرج ۵۰ میلی متری لازم است.

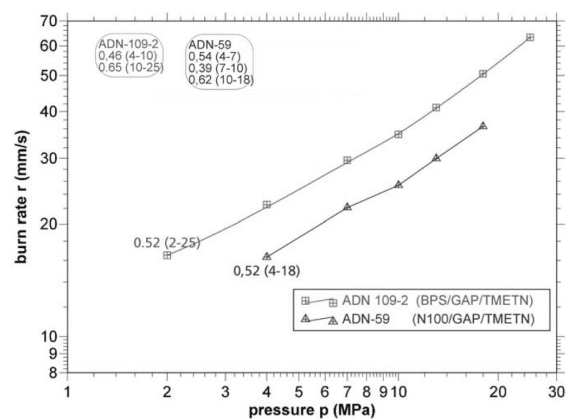


شکل ۱۹ رفتار سوزش پیشران‌های

ADN/GAP/TMETN (ADN109-2) پخته شده با

بیس پروپارژیل سوکسینات در مقایسه با ADN V99 بدون TMETN [۱۸].

آزمون حساسیت حرارتی در مقیاس کوچک توسط اندازه‌گیری‌های کالری سنجی رویشی تفاضلی اندازه‌گیری می‌شود حدود یک میلی گرم نمونه پیشران در جریان حرارتی آرگون با نرخ گرمایی ۵ درجه بر دقیقه افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل کالری سنجی نرخ شتاب (Accelerated Rate Calorimetry) نمونه‌های پیشران حدود ۳۰۰ میلی گرم و ۴۰۰ میلی گرم است. حساسیت مکانیکی با ضربه و اصطکاک آزمایش می‌شود حساسیت به ضربه و اصطکاک با استفاده از



شکل ۲۰ رفتار سوزش پیشران ADN/GAP/TMETN (ADN109-

2) پخته شده با بیس پروپارژیل سوکسینات در مقایسه با پیشران

ADNV59 پخته شده با آن هگزیل متان سوکسینات [۱۸].

جدول ۶ حساسیت به ضربه و اصطکاک پیشرانه‌های مختلف [۵].

پیشرانه	(الف)	(ب)	(ج)	(د)
حساسیت به اصطکاک (نیوتن)	۱۲۰	۱۴۴	۷۲	۱۰۸
حساسیت به ضربه (نیوتن متر)	۶	۵	۳	۶

جدول ۷ اتلاف انرژی پیشرانه AI/ADN/GAP [۵].

اتمسفر	اتلاف پس از ۱۵ روز (ژول بر گرم)	گرمای انفجاری (ژول بر گرم)	۵ درصد گرمای انفجاری (ژول بر گرم)
هوا	۱۵	۷۰۲۵/۵	۳۵۱
آرگون	۷	۶۸۱۴/۲	۳۴۱

محاسبه به کمک برنامه محاسباتی فرانهوفر (ICT) با بار چگالی ۰/۱ گرم بر

سانتی متر مکعب

۱۲ پایداری شیمیایی

پایداری پیشرانه‌های بر پایه ADN/GAP با استفاده از نمونه‌ای از فرمول بندی AI/ADN/GAP توصیف می‌شود. روش کلی برای ارزیابی پایداری، اندازه‌گیری میزان تلفات گرما است که باید کم‌تر از ۵ درصد از محتوای پرانرژی کل باشد. تلفات گرما در هوا و آرگون توسط میکروکالری سنج جریان گرما (Heat Flow Microcalorimetry (HFMC)) اندازه‌گیری می‌شود. پس از ۱۵ روز اتلاف انرژی به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از ۵ درصد مقدار گرمای انفجار است. جدول ۷ مقدار اتلاف انرژی پیشرانه AI/ADN/GAP در هوا و آرگون را نشان می‌دهد. در مورد ثبات خلأ هیچ چیز قابل توجهی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۴۴ ساعت مشاهده نشد. داده‌ها به‌طور رسمی به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۴۰ ساعت مطابق با قانون تعمیم‌یافته وانت هوف تبدیل شده‌اند. تشکیل گاز محاسبه شده ۱/۴۰ میلی‌لیتر بر گرم در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. روش STANAG 4556، به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. اگر تغییر گاز از یک گرم ماده آزمایش کم‌تر یا برابر ۲ میلی‌لیتر باشد، مطابق با این تعریف پیشرانه پایدار است.

۲ درصد در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان آزمون در محدوده ۸ تا ۷۲ ساعت است. گزارش فنی نشان می‌دهد در ۸ ساعت اول تلفات گرمی دارای مقادیر بالایی است. امکان پیش‌بینی اندازه‌گیری اتلاف گرمی مازاد در دمای ۷۰، ۸۰ و ۸۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۳۰ روز در مدت زمان کارکرد به‌وسیله مولفه‌های آرنیوس انجام می‌شود. اگر تلفات گرمی ۵ درصد فرض شود، زمان کارکرد می‌تواند ۳۶ سال در دمای ذخیره‌سازی ۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۲ سال در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد باشد. پایداری حرارتی توسط دمای خود اشتعالی (۱۵۶/۵ درجه سانتی‌گراد در ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه) و نرخ خود گرمایشی آدیاباتیک (شروع ۱۲۴ درجه سانتی‌گراد و دفلگیشن دمای ۱۵۶ درجه سانتی‌گراد) تعیین می‌شود و ADN تعیین‌کننده دمای خوداشتعالی و نرخ خود گرمایشی بی‌دررو است. [۵].

۱۳ نتیجه‌گیری

دسته پیشرانه‌های بر پایه ADN/GAP در زمره پیشرانه سبز محسوب می‌شوند و این ترکیب متضمن معرفی پیشرانه‌ای با انرژی بالا و کم‌اثر است و جایگزین مناسبی برای پیشرانه‌های AP/HTPB دودزا به دلیل عدم انتشار اسیدکلریک است. اضافه کردن پودر آلومینیوم، رویکردی کلاسیک برای افزایش ایمپالس ویژه نظری پیشرانه‌های جامد می‌شود. مقدار مطلوب آلومینیوم در حدود ۱۶ تا ۱۸ درصد است. اما فرمول بندی پیشرانه با ADN، اکسیدکننده بدون کلر و GAP - پیونددهنده‌ای

نتایج، مطابق با قانون تعمیم‌یافته وانت هوف به‌طور رسمی به ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تغییر یافتند. به دلیل وجود ماده ADN، آزمون اتلاف گرمی داچ (Dutch) به‌عمل آمده است و به‌جای دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به همراه زمان آزمون و اصول استاندارد انجام شده است [۵]. در جدول زیر نتایج آزمون اتلاف گرمی داچ نشان داده شده است. مطابق آزمایش‌ها، آزمون اتلاف گرمی داچ (Dutch) به‌طور کامل انجام شده است. مقدار محدوده آن از

جدول ۸ نتایج آزمون اتلاف جرمی داچ [۵].

اتلاف جرمی (اندازه- گیری شده) در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد (درصد)	اتلاف جرمی (اندازه- گیری شده) در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد (درصد)	زمان آزمون (ساعت)
۵/۴۵	۰/۳۵	۰-۸
۶/۷۰	۰/۴۳	۰-۷۲
۱/۲۵	۰/۰۸	۸-۷۲

AP حدود ۲ درصد بیشتر از پیشرانه‌های ADN است. با این وجود عملکرد بهینه پیشرانه‌های ADN بیش‌تر از پیشرانه‌های AP است. بدین ترتیب، حداقل ویژگی‌های دود و آگزوز تمیز محیط‌زیست و ایمپالس ویژه بالا و نرخ سوزش بالا تنها با فرمول‌بندی‌های ADN امکان‌پذیر است. نرخ‌های سوزش و نماهای فشار توسط اندازه‌گیری‌های کرافورد در دماهای محیط تعیین شده است. نرخ‌های سوزش بالا و نماهای فشار مناسب برای هر دو ADN/GAP و فرمول‌بندی AP/GAP مشاهده شده است. نرخ سوزش پیشرانه‌های ADN/GAP حداقل دو برابر پیشرانه‌های AP/GAP است. حساسیت به ضربه و اصطکاک برای پیشرانه‌های ADN/GAP و AP/GAP بیش‌تر یا کم‌تر یا برابر است؛ ولی پیشرانه‌های ADN حساسیت بیش‌تری نسبت به اندازه ذرات کوچک‌تر پیشرانه‌های AP دارند. در مقایسه با پیشرانه‌های دو پایه و AI/AP/HTPB گستره حساسیت‌ها در مقدار مشابهی قرار دارند.

پرانرژی-اسیدکلریک تولید نمی‌کند و ایمپالس ویژه پیشرانه‌های بر پایه ADN/GAP بیش‌تر از پیشرانه‌های جامد مرکب مثل AP/GAP است و علت بالا بودن ایمپالس ویژه پیشرانه‌های ADN/GAP، وزن مولکولی پایین و عدد مولی بالای گازهای احتراق است. با توجه به چگالی بالاتر AP ایمپالس ویژه حجمی پیشرانه‌های

مراجع

- Schmitt R. J., Bottaro, J. C., & Penwell, P. E., Synthesis of Cubane Based energetic Molecules; SRI International Menlo Park Ca, **1993**.
- Teipel U., Energetic Materials: Particle Processing and Characterization, *John Wiley & Sons*, **2006**.
- Yang R., Thakre, P., & Yang V., Thermal Decomposition and Combustion of Ammonium Dinitramide, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 41, 657-679, **2005**.
- Wingborg N., Andreasson, S., de Flon J., Johnsson M., Liljedahl M., Oscarsson C., & Wanhatalo M., Development of ADN-based minimum Smoke propellants, *In 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (p. 6586), **2010**.
- Gettwert, V., Bohn M. A., & Weiser V., Performance of ADN/GAP Propellants Compared to Al/AP/HTPB, In *Inert Munitions and Energetic Materials Technology Symposium*, **2015**.
- Thakre P., Duan Y., & Yang V., Modeling of Ammonium Dinitramide (ADN) Monopropellant Combustion with Coupled Condensed and Gas Phase kinetics, *Combustion and Flame*, 161, 347-362, **2014**.
- Vo N. D., Jung M. Y., Oh D. H., Park J. S., Moon, I., & Oh M., Moving Boundary Modeling for Solid Propellant Combustion, *Combustion and Flame*, 189, 12-23, **2018**.
- Davenas A. (Ed.), *Solid rocket propulsion technology*, Newnes, **2012**.
- Kubota N., *Propellants and Explosives, Thermochemistry and Combustion*, **2001**.
- Chaturvedi S., Dave P. N., Solid Propellants: AP/HTPB Composite Propellants, *Arabian Journal of Chemistry*, 1-8, 2015.
- Pang, W., Effect of Ammonium Dinitramide (ADN) on the Characteristics of Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB) Based Composite Solid Propellant, *J Chem Sci Technol*, 2, 53-60, **2013**.
- Hinshaw C. J., Wardle R. B., & Highsmith T. K., Propellant Formulations Based on Dinitramide Salts and Energetic Binders, U.S. Patent No. 5741998. **1998**.
- Wingborg N., Skarstind M., Sjöblom M., Lindborg A., Brantlind M., Johansson J., Kjellberg J., GRAIL., *Green Solid Propellants for Launchers*, **2015**.
- Yang Z., Xin Ping L., & Qing Xuan Z., Simulation Study of the Morphologies of Energetic Block Copolymers Based on Glycidyl Azide Polymer, *Journal of Applied Polymer Science*, 129, 480-486, **2013**.
- Mura C., Fruci S., Lamia P., Cappello M., Filippi S., & Polacco G., Synthesis of GAP and PAMMO Homopolymers from Mesylate Polymeric, *Journal of Energetic Materials*, 34, 216-233, **2016**.
- Agrawal J. P., *High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, *John Wiley & Sons*, **2010**.
- Weiser V., Franzin A., Gettwert V., & DeLuca L. T., Combustion of Metallised ADN/GAP Solid Rocket Propellants with Focus on Agglomeration Effects, In *5th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS 2013)*, *Munich, Germany*, 1-5, **2013**.
- Menke K., Heintz T., Schweikert W., Keicher T., Krause H., *Formulation and Properties of ADN/GAP Propellants, Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials*, 34, 218-230, **2009**.
- Wingborg N. Swedish Defence Research Agency, FOI SE-147 25 Tumba, Sweden Niklas.Wingborg@foi.se **2015**.
- Manelis G. B., Thermal Decomposition of Dinitramide Ammonium Salt, In *Proc. 26th Int. Ann. Conf. ICT*, 4-7, **1995**.

