

واژه‌های کلیدی:

پیشرانه جامد مرکب
HTPB
اندازه ذرات AI و AP
سرعت سوزش و خواص
مکانیکی

تأثیر اندازه ذرات جامد بر خواص مکانیکی و سرعت سوزش پیشرانه جامد مرکب HTPB/AP/AI

سید عباس وزیری*^۱، مسعود علی محمدی^۲

۱ تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی،

گروه مهندسی شیمی، دانشیار

۲ تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی،

گروه مهندسی شیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد

چکیده ...

اندازه ذرات جامد از عوامل مهم تأثیرگذار بر خواص مکانیکی و احتراقی پیشرانه جامد مرکب بر پایه رزین HTPB است؛ بنابراین در این مقاله به بررسی تأثیر اندازه ذرات جامد بر خواص احتراقی و مکانیکی پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB/AP/AI پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از میکروذرات آلومینیوم علاوه بر توزیع بهتر ذرات در پیشرانه، میزان پایداری احتراق را بدون کاهش تکانه ویژه بهبود می‌بخشد و از نظر خواص مکانیکی، میزان سختی و کرنش مناسب‌تری خواهد داشت. استفاده از ذرات ریز و درشت AP در کنار هم، خواص مکانیکی پیشرانه جامد مرکب را بهبود می‌دهد. همچنین با افزایش درصد ذرات ریزتر اکسیدکننده AP در ترکیب، سرعت سوزش پیشرانه جامد مرکب افزایش می‌یابد. جایگزینی بخشی از دانه‌های درشت AP با دانه‌های جامد ریز RDX، به دلیل پرشدن فضای خالی بین بلورهای درشت AP توسط ذرات ریز نیترامین، افزایش تراکم بارگذاری، بهبود پیوند بین اکسیدکننده و پیونددهنده، باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش درصد ازدیاد طول پیشرانه HTPB/AP/RDX خواهد شد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

vaz_in@yahoo.com

۱ مقدمه

در حال حاضر در سراسر جهان، پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه رزین HTPB (Hydroxyl terminated Polybutadiene) کارآمدترین پیشرانه‌ها برای استفاده در موتور موشک‌های حاوی پیشرانه جامد هستند. پیشرانه جامد مرکب، متشکل از ذرات جامد اکسیدکننده AP (Ammonium Perchlorate)، سوخت فلزی (Metallic) و رزین پلیمری HTPB به همراه افزودنی‌ها است که درصد اجزای تشکیل‌دهنده به تناسب کاربرد برای هر پیشرانه متفاوت است [۱].

در بین فلزات، فلز Al به دلایل متعدد از جمله افزایش انرژی آزادشده، بهبود چگالی کامپوزیت پرانرژی، درجه حرارت احتراق بالاتر و در نتیجه تکانه ویژه (Isp) بالاتر، کاهش نمای فشار، فراوانی، حرارت احتراق بالاتر، غیرسمی بودن و توانایی آن در کاهش H_2O و CO_2 ، کاربرد گسترده‌ای در پیشرانه‌های جامد مرکب دارد [۲]. یکی از مشکلات آلومینیوم، کلوخه شدن ذرات ریز آن است. با به کارگیری میکروذرات آلومینیوم یا افزایش درصد آن‌ها در ابعاد کوچک‌تر می‌توان کلوخه شدن (Agglomeration) ذرات آلومینیوم، درصد اکسید آن و هزینه‌های تولید پیشرانه‌های جامد مرکب را در مقایسه با استفاده از نانوذرات Al کاهش داد. میکروذرات آلومینیوم، میزان پایداری احتراق را بدون کاهش تکانه ویژه بهبود می‌بخشند و پیشرانه حاصل از نظر مکانیکی، میزان سختی و نرخ کرنش مناسب‌تری خواهد داشت. از دیگر اجزای جامد در پیشرانه‌های جامد مرکب، اکسیدکننده‌ها هستند. آمونیوم پرکلرات (AP) یکی از رایج‌ترین اکسیدکننده‌ها است. از AP با اندازه ذرات متنوع در پیشرانه‌های جامد مرکب برای چگالی بارگذاری بالاتر و احتراق ثابت و پایدار استفاده می‌شود. معمولاً AP با اندازه ذرات کوچک‌تر، می‌تواند اثر بیشتری بر روی سرعت سوزش داشته باشد [۳].

ذرات جامد نیترامینی نیز به عنوان جایگزین بخشی از AP به کار می‌روند. پیشرانه‌های نیترامینی دارای سرعت سوزش کم و محتوای انرژی بالا هستند. همچنین به منظور کاهش دود سوخت، به کار برده می‌شوند. اهمیت پیشرانه‌های جامد مرکب حاوی ذرات نیترامین به خاطر قابلیت پذیرش بالای بار جامد (بیش از ۸۷ درصد) و داشتن تکانه ویژه بالاتر نسبت به پیشرانه‌های حاوی ذرات AP است [۴].

هدف از ارائه این مقاله، بررسی تأثیر اندازه ذرات جامد بر خواص مکانیکی و احتراقی پیشرانه‌های جامد مرکب بر پایه HTPB است.

۲ عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی در پیشرانه‌های جامد مرکب

از جمله عواملی که بر روی خواص مکانیکی پیشرانه جامد مرکب تأثیرگذارند می‌توان به اندازه ذرات سوخت فلزی و ضخامت لایه اکسید آن، شکل و اندازه ذرات اکسیدکننده، نحوه توزیع ذرات ریز و درشت جامد، نوع و گرانیوی رزین، نرم‌کننده، اتصال‌دهنده‌های عرضی و سازگاری این عوامل با همدیگر اشاره کرد [۵، ۶].

از جمله عواملی که در خواص مکانیکی پیشرانه‌های جامد مرکب باید اندازه‌گیری شود می‌توان به مدول (Module)، استحکام کششی (Tensile Strength) و سختی (Hardness) اشاره کرد. مدول (نسبت تنش (Stress) به کرنش (Strain)) پیشرانه‌ها به میزان بار جامد بستگی دارد و با افزایش محتوای بار جامد افزایش می‌یابد. استحکام کششی پیشرانه‌های مرکب بر پایه HTPB با افزایش میزان پرکننده افزایش می‌یابد [۷، ۸]. در ادامه اثر اندازه ذرات AP، Al و نیترامین‌ها بر خواص مکانیکی پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB/AP/Al بررسی شده است.

۲-۱ بررسی اثر اندازه ذرات آلومینیوم بر خواص مکانیکی

استحکام پیشرانه تحت تأثیر ریزساختار و قطر متوسط پودر Al قرار می‌گیرد. UFAl (Ultrafine Aluminum Powder) پودر آلومینیوم فوق‌العاده ریز با ابعاد ۰/۱ میکرومتر است. تحلیل نتایج حاصل از کار محققان نشان می‌دهد که محتوای UFAl بالا، تنش بیشینه و مدول کشسانی را کاهش می‌دهد؛ اما جایگزینی تنها ۲ درصد از محتوای آلومینیوم معمولی توسط UFAl، میزان کرنش در نقطه شکست را افزایش می‌دهد. مقدار بالای UFAl بر روی کرنش در نقطه شکست و پایداری کرنش تأثیر زیادی نمی‌گذارد [۹].

در تحقیقی دیگر، دو نمونه پیشرانه حاوی میکروآلومینیوم پیرال (Pyral) (ذراتی با اندازه ۳/۶۶ میکرومتر و شکل لایه‌ای) و آلومینیوم با اندازه ۲۵ میکرومتر، برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. مقادیر در جدول ۱ نشان می‌دهد

پیونددهنده (HTPB) و اکسیدکننده (AP) عامل اصلی پیوند بین این دو بوده، نقش عوامل پیوندی، افزایش غلظت گروه‌های قطبی تشکیل شده است؛ بنابراین، پیوند هیدروژنی، قوی‌ترین پیوند بین ذرات اکسیدکننده AP و پیونددهنده HTPB است که باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۱۳]. نتایج حاصل از یافته‌های آهمت (Ahmet) و همکارانش نشان می‌دهد که با افزایش نسبت ذرات ریز به درشت AP استحکام کششی پیشرانه جامد مرکب افزایش و میزان ازدیاد طول در تنش بیشینه کاهش می‌یابد [۷].

تحقیقات بهرا (Sitakanta Behera) و همکارانش بر روی خواص مکانیکی پیشرانه‌های جامد مرکب HTPB/Al/AP/RDX نشان می‌دهد که این پیشرانه‌ها، دارای ازدیاد طول بالاتری در مقایسه با پیشرانه‌های حاوی ذرات AP خالص هستند. با توجه به ساختار مولکولی RDX که حاوی سه گروه نیترامینی روی حلقه به عنوان مکان‌هایی برای ایجاد پیوند هیدروژنی با گروه -OH پیونددهنده پلیمری HTPB هستند که باعث تشکیل کمپلکس‌هایی در فصل مشترک پرکننده پرانرژی و پیونددهنده می‌شوند؛ بنابراین جایگزینی بخشی از AP با RDX، رفتار پیوندی بین اکسیدکننده و پیونددهنده را بهبود داده، در نتیجه باعث بهبود ازدیاد طول می‌شود [۱۳، ۴].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات بلوری اکسیدکننده، تأثیر زیادی بر روی خواص کششی پیشرانه‌های مرکب نیترامینی می‌گذارد. نمونه‌های پیشرانه حاوی دانه‌های درشت AP و دانه‌های ریز نیترامین، به دلیل پرشدن فضای خالی بین بلورهای AP توسط ذرات ریز نیترامین و افزایش تراکم بارگذاری، باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش درصد ازدیاد طول پیشرانه HTPB/Al/AP/RDX خواهد شد. از طرفی ذرات بزرگ‌تر نیترامین باعث جذب بیشتر اجزای مایع (پیش‌پلیمر و نرم‌کننده) در فرمول بندی پیشرانه‌های نیترامینی شده، در نتیجه باعث کاهش استحکام این پیشرانه‌ها خواهد شد [۱۴].

۳ عوامل مؤثر بر سرعت سوزش در پیشرانه‌های جامد مرکب

از عواملی که بر سرعت سوزش تأثیرگذارند می‌توان به: شکل، نوع و اندازه ذرات اکسیدکننده، توزیع اندازه ذرات، خلوص و محتوای فلزی، نوع، شکل و اندازه ذرات

که استحکام کششی و درصد ازدیاد طول برای پیشرانه با اندازه ذرات $3/66 \mu\text{m}$ با پیشرانه دارای آلومینیوم با اندازه ذرات $25 \mu\text{m}$ قابل مقایسه هستند. نتایج نشان می‌دهد که خواص مکانیکی پیشرانه حاوی ذرات پیرال نسبت به پیشرانه حاوی ذرات آلومینیوم با اندازه $25 \mu\text{m}$ منجر به تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌شود [۱۰].

طبق یافته‌های ارلانندی (Orlandi) و همکارانش، نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که خواص مکانیکی پیشرانه‌های برپایه HTPB/Al/AP (با درصدهای وزنی ۱۷:۶۴:۱۹) به هنگام استفاده از میکروذرات آلومینیوم مطلوب‌تر از هنگام استفاده از ذرات آلومینیوم خیلی ریز ($0/2$ میکرومتری) است [۱۱]. اندازه اولیه آلومینیوم و مقدار آلومینیوم موجود در پیشرانه، اثر تعیین‌کننده‌ای بر توزیع اندازه کلوخه‌های جدا شده از سطح پیشرانه دارد. چسبیدن به سطح، تشکیل آلاینده‌ها و سازوکارهای کلوخه شدن به علت حضور آلومینیوم در سطح پیشرانه است [۱]. آلومینیوم با اندازه فوق‌العاده ریز به دلیل مشکل کلوخه شدن و چسبیدن ذرات به همدیگر به‌طور یکنواخت و یکپارچه، در زمینه پیشرانه جامد مرکب توزیع نمی‌شود و همین عامل موجب می‌شود بر روی خواص عملکردی پیشرانه و خواص مکانیکی تأثیر منفی بگذارد.

از طرفی نتایج به دست آمده از یافته‌های محققان نشان می‌دهد که میکروذرات آلومینیوم نسبت به نانوذرات آلومینیوم توزیع بهتری داشته، تمایل کمتری به کلوخه شدن دارند. علاوه بر این، توزیع میکروذرات آلومینیوم با افزایش اندازه ذرات آلومینیوم بهبود می‌یابد [۱۲، ۱].

۲-۲ تأثیر اندازه ذرات اکسیدکننده بر خواص مکانیکی پیشرانه‌ها جامد مرکب

هوری (Hori) و همکارانش پیشنهاد کردند که در پیشرانه‌های مرکب HTPB/Al/AP، پیوند هیدروژنی میان

جدول ۱ خواص مکانیکی پیشرانه [۱۰].

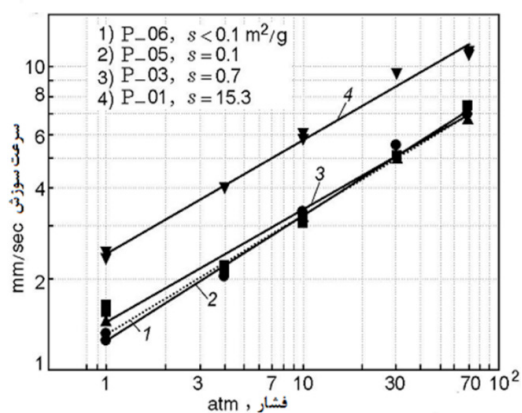
کامپوزیت	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)	مدول یانگ (MPa)
Pyral ($3/66 \mu\text{m}$)	۰/۶۹	۶	۱۹/۸
Al ($25 \mu\text{m}$)	۰/۶۲	۵	۲۱/۶

جدول ۲ خواص پودر آلومینیوم تک مدلی و سرعت سوزش پیشرانه‌های حاوی آن [۱۷].

چگالی (g/cm ³)	سرعت سوزش (mm/s) (p=30 atm)	مساحت (m ² /g)	اندازه ذره (μm)	پیشرانه
۱/۶۷	۸/۸۱	۱۵/۳	۰/۱۵	P-01a
۱/۵۶	۵/۱۴	۰/۷	۲/۵	P-03d
۱/۵۲	۴/۹۷	۰/۱	۳۰	P-05
۱/۵۹	۴/۵۱	<۰/۱	۵۰	P-06

نتایج حاصل از انجام آزمایش نشان می‌دهند که سرعت سوزش پیشرانه جامد مرکب با ترکیب آلومینیوم تک مدلی و P-01a با اندازه تقریباً ۰/۱۵ μm، نسبت به پیشرانه‌های P-05، P-03d و P-06 با کاهش اندازه ذرات آلومینیوم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و تنها به مقدار کمی تحت تأثیر حساسیت فشاری (جدول ۲) است درحالی‌که سرعت سوزش پیشرانه‌های P-05 و P-06، تفاوت چندانی ندارند (شکل ۱) [۱۷].

در تحقیقی دیگر تأثیر رفتار ذرات آلومینیوم معمولی (۱۵-۵۰ μm) در مقایسه با پیشرانه‌های حاوی ذرات فوق-العاده ریز آلومینیوم (۰/۱ μm) بر نرخ سوزش پیشرانه‌های جامد مرکب بررسی شده است. این تحقیقات بر روی پیشرانه‌های جامد مرکب با نام‌های DK-00 شامل ۱۰۰ درصد از ذرات آلومینیوم درشت تجاری (۵۰ μm)، پیشرانه DK-05 شامل ۱۰۰ درصد آلومینیوم فوق‌العاده



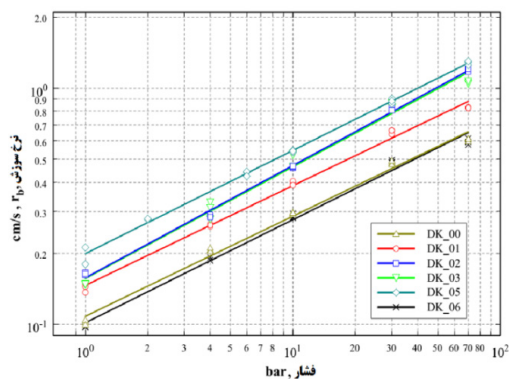
شکل ۱ تأثیر اندازه ذرات Al بر سرعت سوزش با افزایش فشار [۱۷].

فلزی، نوع و نسبت پیونددهنده و نرم کننده و کل مواد جامد، کاتالیزور و مواد افزودنی، فشار و دمای اولیه، فرایند ریخته‌گری، پخت، مهاجرت و پیرشدگی اشاره کرد [۱۵]. در ادامه به بررسی اثر اندازه ذرات سوخت فلزی Al، اکسیدکننده AP و نیترامین‌ها بر سرعت سوزش پرداخته شده است.

۳-۱ اثر اندازه ذرات آلومینیوم بر سرعت سوزش

سرعت سوزش پیشرانه‌ها با افزایش محتوای پودر آلومینیوم فوق‌العاده ریز UFAl و با افزایش فشار، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال فرمول بندی پیشرانه حاوی ۹ درصد از UFAl و ۹ درصد از آلومینیوم درشت، میزان سرعت سوزش را تا ۸۴ درصد نسبت به فرمول بندی که فقط شامل پودر آلومینیوم درشت بوده (در فشار ۱۰ مگا پاسکال) افزایش می‌دهد [۹]. سرعت سوزش آلومینیوم با اندازه ذرات ۳۰ μm و ۱۵ μm تقریباً مشابه است. سرعت سوزش آلومینیوم با اندازه ۳ μm خیلی بالاتر است و این میزان با آلومینیوم با اندازه ذره ۰/۱ μm چند برابر آلومینیوم با اندازه ۳۰ μm است. تفاوت احتراق بین آلومینیوم فوق‌العاده ریز و معمولی در سطح پیشرانه نشان می‌دهد که احتراق برای اندازه ذرات آلومینیوم ۰/۱ μm و اندازه ۳ μm در فشار ۶/۸۹ MPa نسبت به آلومینیوم ۳۰ μm بسیار نزدیک‌تر به سطح پیشرانه رخ می‌دهد و اجازه می‌دهد گرمای بیشتری به سطح پیشرانه برگردد و لذا سرعت سوزش بالاتر رود [۱۶].

در تحقیقی، پیشرانه جامد مرکب متشکل از ۶۸ درصد از آمونیوم پرکلرات (AP)، ۱۷ درصد از پیونددهنده پلی بوتادیان با هیدروکسیل انتهایی (HTPB) و ۱۵ درصد از آلومینیوم (Al) انتخاب شده است. بررسی چگونگی رابطه سرعت سوزش با اندازه ذرات Al که فقط شامل توزیع آلومینیوم تک مدلی است در جدول ۲ آمده است. پیشرانه P-06 شامل ۱۰۰ درصد میکروذرات آلومینیوم غیر کروی نوع ۰۶ با اندازه ذره تقریباً ۵۰ میکرومتر، محصول کم‌هزینه تجاری است. پیشرانه P-05 شامل ۱۰۰ درصد از میکرو ذرات آلومینیوم (جدول ۲) با اندازه تقریباً ۳۰ میکرومتر است که در کاربردهای دفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیشرانه P-03d شامل ذرات Al با ابعاد تقریباً ۲/۵ میکرومتر و پیشرانه P-01a شامل ذرات Al با اندازه تقریباً ۰/۱۵ میکرومتر، شبیه به الکس (Alex) تجاری است [۱۷].

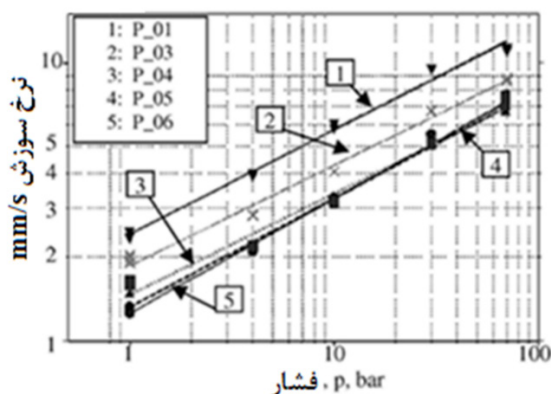


شکل ۲ مقایسه سرعت سوزش خطی [۱۸].

سرعت سوزش ذرات آلومینیوم با افزایش فشار، افزایش می‌یابد اما می‌توان این نتیجه را نیز برداشت کرد که سرعت سوزش اندازه ذرات آلومینیوم در بازه ۳/۰۳۵ تا ۵۰ میکرومتر تفاوت چندانی ندارند [۱۹].

در تجزیه و تحلیل (XRD) برای ذرات پیرال گزارش شده است که در میکروذرات آلومینیوم هیچ اثری از اکسید آلومینیوم، آشکار نیست درحالی‌که برای نانوذرات آلومینیوم، ۱۱ درصد اکسید آلومینیوم وجود دارد. میزان سرعت سوزش برای اندازه ذرات مختلف در سه فشار مختلف در جدول ۴ آورده شده است [۱۰].

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود فاصله سوختن میکروذرات آلومینیوم از سطح پیشرانه در فاصله ۳d بوده



شکل ۳ سرعت سوزش پیشرانه‌های آلومینیومی: ۶۸ درصد AP دو مدلی (۲۰ درصد ریز و ۸۰ درصد درشت)، ۱۵ درصد Al تک مدلی و ۱۷ درصد پیونددهنده HTPB (متوسط قطر ذرات فلزی به ترتیب ۰/۱۴۵، ۰/۳۶۳، ۰/۳۳۵، ۲۲/۱۶ و ۵۰ میکرومتر) [۱۹].

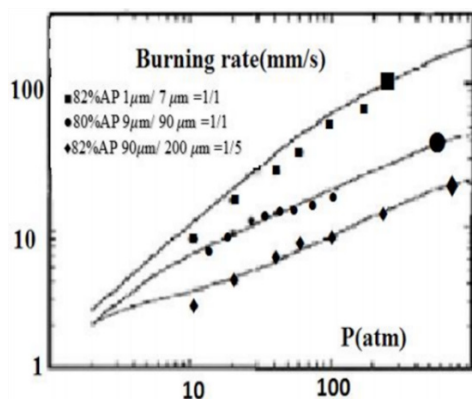
ریز ($0.1 \mu\text{m}$)، تولید روسیه) و پیشرانه DK-06 شامل ۱۰۰٪ ذرات آلومینیوم درشت ($15 \mu\text{m}$) است که در حال حاضر در کاربردهای پیشرانشی استفاده می‌شوند سه پیشرانه دیگر DK-01، DK-02، و DK-03 دارای توزیع اندازه دومدلی آلومینیوم، با اندازه‌های ۵۰ و $15 \mu\text{m}$ (آلومینیوم درشت) و $0.1 \mu\text{m}$ (Al فوق‌العاده ریز) هستند. مشخصات و چگالی این نمونه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۸].

در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود که پیشرانه‌های پایه (DK-00) در مقایسه با فرمول‌بندی پیشرانه‌های حاوی ذرات $0.1 \mu\text{m}$ ، دارای کم‌ترین سرعت سوزش خطی هستند. دیگر فرمول‌بندی‌های حاوی ذرات $0.1 \mu\text{m}$ افزایش قابل‌توجه سرعت سوزش را نشان می‌دهند. با جایگزینی آلومینیوم با اندازه ذره $50 \mu\text{m}$ با مقدار مشابه از آلومینیوم با اندازه ذره $0.1 \mu\text{m}$ ، سرعت سوزش برای DK-01 به مقدار ۴۰ درصد، برای DK-02 به مقدار ۶۰ درصد و برای DK-05 ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد. افزایش سرعت سوزش با افزایش نسبت آلومینیوم فوق‌العاده ریز افزایش می‌یابد. درحالی‌که هیچ تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در سرعت سوزش پیشرانه‌های حاوی اندازه ذرات آلومینیوم ۱۵ و ۵۰ میکرومتر وجود ندارد [۱۸].

ذرات آلومینیوم در محدوده میکرومتر (اندازه‌های بزرگ‌تر) بر اساس سازوکار توزیع گسترده، بسیار دورتر از فاز گازی شعله می‌سوزند و در نتیجه، اساساً برگشت گرمای آن به سطح سوزش تأثیر چندانی ندارد [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود

جدول ۳ فرمول‌بندی و چگالی پیشرانه‌ها [۱۸].

پیشرانه	ترکیب HTPB/AP/Al -17/68/15	چگالی اندازه‌گیری شده (g/cm^3)
DK-00	Al درشت ($50 \mu\text{m}$) ۱۰۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۰٪	۱/۵۹
DK-01	Al درشت ($50 \mu\text{m}$) ۸۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۲۰٪	۱/۶۳
DK-02	Al درشت ($50 \mu\text{m}$) ۵۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۵۰٪	۱/۶۳
DK-03	Al درشت ($15 \mu\text{m}$) ۵۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۵۰٪	۱/۶۷
DK_05	Al درشت ($50 \mu\text{m}$) ۵۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۱۰۰٪	۱/۶۶
DK-06	Al درشت ($15 \mu\text{m}$) ۱۰۰٪ و ریز ($0.1 \mu\text{m}$) ۰٪	۱/۵۸



شکل ۵ تأثیر اندازه ذرات AP بر سرعت سوزش [۲۲].

که سرعت سوزش آن در مقایسه با میکروذرات کروی آلومینیوم، افزایش می‌یابد [۱۰]. گالفیتی (Galfetti) و همکارانش، گزارش کرده‌اند که اندازه باقی‌مانده اکسید آلومینیوم، برای پیشراندهای حاوی آلومینیوم فوق‌العاده ریز در مقایسه با میکروذرات تک مدلی Al در این پیشرانده کم‌تر است. دخان (Dokhan) نیز میزان اندازه اکسید باقی‌مانده با ترکیب دومدلی از آلومینیوم ریز و میکروآلومینیوم را گزارش کرد. آن‌ها دریافته‌اند که اندازه باقی‌مانده اکسید آلومینیوم با افزایش محتوای آلومینیوم بسیار ریز در پیشرانده مرکب کاهش می‌یابد [۲۰].

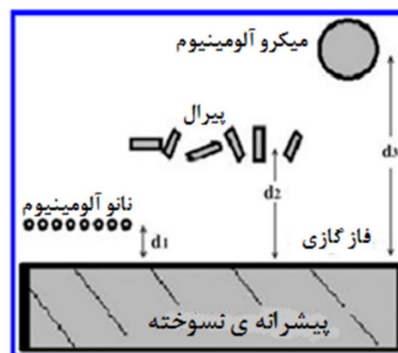
۳-۲ تأثیر اندازه ذرات اکسیدکننده بر سرعت سوزش

اکسیدکننده، جزء اصلی پیشرانده جامد کامپوزیتی است که بیش از ۷۰ درصد وزنی پیشرانده را تشکیل می‌دهد، بنابراین یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی سرعت سوزش است. به‌طور کلی، سرعت سوزش پیشراندهای جامد با گرمای حاصل از سوختن اکسیدکننده رابطه مستقیم دارد، هرچه دمای شعله اکسیدکننده کم‌تر باشد سرعت سوزش آن نیز کم‌تر خواهد بود [۲۱]. با افزایش اندازه ذرات اکسیدکننده، از سرعت سوزش کاسته می‌شود اما برای حفظ سرعت سوزش و ایمنی پیشرانده در حد مناسبی از اندازه ذرات مختلف AP استفاده می‌شود [۲۲]. شکل ۵ تأثیر استفاده از اندازه ذرات تک‌مدلی و چندمدلی بر سرعت سوزش را بیان می‌کند. شکل ۶ اختلاف در سرعت سوزش با محتوای متفاوت AP را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، سرعت سوزش با افزایش مقدار

جدول ۴ اثر اندازه ذرات و سطح ویژه Al بر سرعت سوزش [۱۰].

سرعت سوزش (mm/s)	مساحت (m ² /g)	اندازه ذرات آلومینیوم (μm)	فشار (bar)	آلومینیوم (%)
۷/۵	۰/۰۷	۳۰	۶۹	۱۸
۸	۰/۱	۱۵		
۱۰	۰/۷	۳		
۴۰	۲۱	۰/۱		
۷	<۰/۱	۵۰	۷۰	۱۵
۷	۰/۱	۳۰		
۷	۰/۷	۲/۵		
۱۱/۵	۱۵/۳	۰/۱۵		
۸	۰/۱	۱۵	۷۰	۱۵
۳۱	۴۳	۰/۰۵		
۸	<۰/۱	۵۰		
۱۸	۱۴	۰/۱۵		

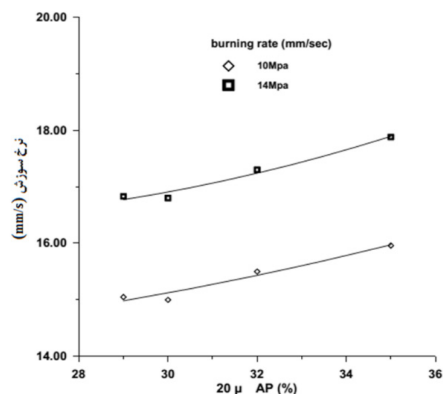
است، درحالی‌که نانوذرات آلومینیوم در نزدیک سطح پیشرانده در فاصله d_1 می‌سوزند که همین عامل باعث شود سرعت سوزش در نانوذرات آلومینیوم افزایش یابد و فاصله سوختن ذرات پیرال از سطح پیشرانده حداثی بین این دو ذره است. در نتیجه، شار حرارتی بالاتری برای ذرات پیرال در نزدیک سطح پیشرانده انتشار می‌یابد



شکل ۴ طرح‌واره فرایند احتراق ذرات آلومینیوم در اندازه‌های مختلف (d_۳ > d_۲ > d_۱) [۱۰].

جدول ۵ مساحت سطح و قطر ذرات اکسیدکننده AP [۲۳].

نمونه	شکل AP	D _w (میکرومتر)	S _w (m ² /kg)
A	متخلخل	۸/۱	۲۱۰۰
G	توخالی	۳/۶	۳۱۰۰
I	کروی	۳/۱	۲۰۰۰
L	کروی	۱۳۰	۶۰



شکل ۶ اختلاف در سرعت سوزش با نسبت های مختلف AP [۲۲].

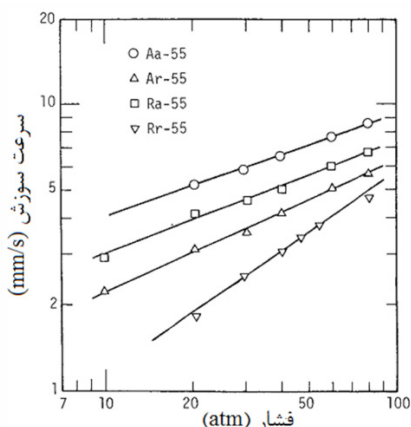
توجه به افزایش خواص حرارتی و همچنین بارگذاری بیشتر ذرات جامد عملکرد مطلوب تری به همراه دارند [۲۴]. پیشرانه های نیترامینی به دلیل کاربرد وسیعی که از سال های ۱۹۸۰ میلادی به بعد پیدا کردند اهمیت ویژه ای یافته اند. این پیشرانه ها دارای سرعت سوزش کم و محتوای انرژی بالا هستند و به منظور رسیدن به تکانه ویژه بالاتر و همچنین به عنوان اکسیدکننده پیشرانه ها برای کاهش دود پیشرانه به کار برده می شوند. اهمیت پیشرانه های جامد مرکب حاوی ذرات نیترامین به خاطر قابلیت بارگذاری بالای جامد (بیش از ۸۷ درصد) و داشتن تکانه بالاتر نسبت به پیشرانه های حاوی ذرات AP است [۴].

ویژگی های سرعت سوزش پیشرانه مرکب حاوی RDX/AP به طور متوسط بین ویژگی های سرعت سوزش پیشرانه های مرکب حاوی AP و پیشرانه های حاوی RDX قرار دارد؛ به طوری که سرعت سوزش پیشرانه های حاوی RDX/AP کم تر از سرعت سوزش پیشرانه های حاوی AP خالص است. جدول ۶ و شکل ۷ مربوط به پیشرانه جامد مرکب HTPB/Al/AP با اندازه ذرات AP ریز و درشت با نسبت ۴۰/۴۰ و با کد (Aa-55)، نمونه پیشرانه HTPB/Al/AP/RDX با AP درشت و RDX ریز با کد (Ar-55)، نمونه پیشرانه HTPB/Al/AP/RDX با AP ریز و RDX درشت با کد (Ra-55) و نمونه HTPB/Al/RDX با اندازه ذرات ریز و درشت RDX با نسبت ۴۰/۴۰ و با کد (Rr-55) است [۹].

نتایج به دست آمده از جدول ۶ نشان می دهد که سرعت سوزش پیشرانه های حاوی RDX/AP به اندازه ذرات RDX و AP در پیشرانه، وابستگی شدیدی دارد؛

AP و کاهش اندازه ذرات و افزایش فشار افزایش می یابد [۱۳،۲۳]. قابل تصور است که ذرات ریز AP در سطح سوزش به عنوان نتیجه ای از جریان سریع گاز تمایل به ترک سریع تر سطح پیشرانه را دارند و بنابراین، ساختار شعله پیشرانه تهیه شده با AP ریز می تواند تبدیل به شعله پیش اختلاط شود که در سطح سوزش آن، جریان سریع گازی، شامل محصولات تجزیه AP، محصولات تجزیه HTPB و محصولات احتراقی شعله وجود دارد. در مقابل، ذرات AP درشت تمایل به ماندن در سطح سوزش را دارند و چون AP درشت آن قدر بزرگ است که تنها به میزان خیلی کم توسط گازهای تولیدشده در سطح سوزش متفرق می شود؛ ساختار شعله پیشرانه تهیه شده با AP درشت تمایل به شعله نفوذی دارد [۲۳]. بنابراین با افزایش اندازه ذرات AP سرعت سوزش کم تر می شود. جدول ۵ چهار نمونه پیشرانه حاوی ذرات AP تهیه شده توسط ماکوتو (Macoto) و همکارانش را نشان می دهد. نتایج به دست آمده از مطالعات ماکوتو و همکارانش نشان می دهد که سرعت سوزش پیشرانه های تهیه شده با AP کروی، بیشتر به اندازه ذرات AP بستگی دارد؛ به طوری که اندازه ذرات کوچک تر AP، اثر بیشتری بر نرخ سوزش می تواند داشته باشد. ولی در پیشرانه های تهیه شده با AP متخلخل سرعت سوزش نه تنها به اندازه ذرات بلکه بیشتر به خلأ موجود در ذرات وابسته بوده، بنابراین حفره ها در ذرات AP متخلخل اثر مثبت بیشتری بر سرعت سوزش خواهند داشت [۱۳،۲۳].

پیشرانه های جامد مرکب حاوی نیترامین ها نسبت به پیشرانه های جامد مرکب حاوی AP خالص، با



شکل ۷ نمودار سرعت سوزش بر حسب فشار برای نمونه‌های پیشرانه حاوی RDX، RDX/AP و AP [۹].

مکانیکی بهبود یافته، درصد ازدیاد طول پیشرانه HTPB/AP/RDX افزایش می‌یابد.

تفاوت احتراق بین آلومینیوم فوق‌العاده ریز و معمولی در سطح پیشرانه نشان می‌دهد که احتراق برای اندازه ذرات ریز آلومینیوم ($1 \mu\text{m}$ و $3 \mu\text{m}$) نسبت به آلومینیوم درشت ($30 \mu\text{m}$) بسیار نزدیک‌تر به سطح پیشرانه رخ می‌دهد و اجازه می‌دهد گرمای بیشتری به سطح پیشرانه برگردد و سرعت سوزش بالاتر رود.

با افزایش درصد اکسیدکننده AP و اندازه ذرات ریزتر آن، سرعت سوزش در پیشرانه جامد مرکب افزایش می‌یابد. در پیشرانه‌های حاوی ذرات اکسیدکننده AP/RDX، به کارگیری ذرات درشت RDX در کنار ذرات ریز AP سرعت سوزش را افزایش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد هنگامی که ذرات ریز میکروآلومینیوم با ذرات درشت AP همراه شوند به دلیل قرارگیری ذرات ریز در فضاهای خالی ذرات درشت و در نتیجه، دانه‌بندی و توزیع بهتر، سرعت سوزش بالاتری خواهند داشت.

جدول ۶ پیشرانه‌های حاوی اکسیدکننده‌های RDX/AP و RDX [۹].

HTPB	AP ($20 \mu\text{m}$)	AP ($200 \mu\text{m}$)	RDX ($5 \mu\text{m}$)	RDX ($120 \mu\text{m}$)	نماد
۲۰	۴۰	۴۰	-	-	Aa- (55)
۲۰	-	۴۰	۴۰	-	Ar- (55)
۲۰	۴۰	-	-	۴۰	Ra- (55)
۲۰	-	-	۴۰	۴۰	Rr- (55)

به طوری که با کاهش اندازه ذرات اکسیدکننده‌ها سرعت سوزش افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود پیشرانه‌های حاوی ذرات ریز و درشت AP سرعت سوزش بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌های پیشرانه حاوی AP/RDX خواهد داشت؛ به طوری که جایگزینی ذرات RDX با ذرات AP سرعت سوزش را به سمت ناحیه سوزش متوسط بین سرعت سوزش پیشرانه‌های حاوی RDX و AP کاهش می‌دهد [۹].

۴ نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام‌شده بر روی پیشرانه‌های حاوی ذرات فوق‌العاده ریز آلومینیوم، مشاهده می‌شود وقتی که بارگذاری محتویات ریز، بالا باشد مانع خیس خوردن تمام ذرات به وسیله پیونددهنده شده و در نتیجه خواص مکانیکی پیشرانه ضعیف می‌شود.

با توجه به ساختار RDX، جایگزینی بخشی از AP ریز با دانه‌های ریز نیترامین، منجر به بهبود پیوند بین پیونددهنده و اکسیدکننده می‌شود. همچنین به دلیل پرشدن فضای خالی بین بلورهای AP درشت توسط ذرات ریز نیترامین و افزایش تراکم بارگذاری، خواص

مراجع

1. Agrawal J.P., "High Energy Materials", Propell Explos Pyrot. *John Wiley & Sons*, USA, **2010**.
2. Babuk V.A., Vassiliev V.A., and Sviridov V.V., "Propellant Formulation Factors and Metal Agglomeration in Combustion of Aluminized Solid Rocket Propellant", *Combust. Sci. Technol.*, 161, 261-289, **2001**.
3. Chu H.T., "Studying on Burning Rate of Propellant under Diverse Parameters", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, USA*, 2, 24-26, **2012**.
4. Damse R.S., and Singh, H., "Nitramine-Based High Energy Propellant Compositions for Tank Guns", *Defe Sci J*, 50, 75-81, **2000**.
5. Mehmood Z., Khan M.B., Abbas T., and Ahmad N., "Influence of Solid Particle Size on Burning and Mechanical Properties of AP/Al/HTPB Composites", *Key Eng. Mater.*, 510, 500-506, **2012**.
6. Kok M., "Production and Mechanical Properties of Al₂O₃ Particle-Reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites", *J. Mater. Process. Technol.*, 161, 381-387, **2005**.
7. CMEZ, A.G., et al. "Mechanical and Burning Properties of Highly Loaded Composite Propellants", *J. Appl. Polym. Sci.*, 67, 1457-1464, **1998**.
8. Callister, W. D., and Rethwisch, D. G., "Materials Science and Engineering, an introduction". New York: Wiley, **2007**.
9. Shalom A., Aped H., Moshe K., David H. "The Effect of Nanosized Aluminum on Composite Propellant Properties", *AIAA.*, 3604, **2005**.
10. Verma S., and Ramakrishna P.A., "Effect of Specific Surface Area of Aluminum on Composite Solid Propellant Burning", *J. Propul. Power.*, 29, 1200-1206, **2013**.
11. Vaziri S.A., et al., "Effects of Nano-Particles in Composite Solid Propellants", (Fa), *Iranian Sci. Associ. of Energ. Mater.*, 34-40, **2014**.
12. Zare A., et al., "Mapping Of Aluminum Particle Dispersion In Solid Rocket Fuel Formulations, *Chemical Rocket Propulsion*", 673-688, **2017**.
13. Behera S., "Effect of RDX on Elongation Properties of AP/HTPB Based Case Composite Propellants", *Sci Spec*, 31-36, **2009**.
14. Radwan A., "Steess Strain Properties of Nitramine Composite Rocket Propellants", *Fraunhofer-Institut fur Chemische Technologie (ICT)*, 12, 41 – 45, **2001**.
15. Luigi D.L., "Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants", *AIAA.*, 143, **1992**.
16. Dokhan A., et al., "The Effects of Al Particle Size on The Burning Rate and Residual Oxide in Aluminized Propellants", *The Joint Propulsion Conference and Exhibit.*, 3581, **2001**.
17. DeLuca L.T., Galfetti L., Severini F., Meda L., Marra G., Vorozhtsov A.B., Sedoi V.S., and Babuk V.A., "Burning of Nano-Aluminized Composite Rocket Propellants, *Combustion, Explosion and Shock Waves*", 41, 680-692, **2005**.
18. Olivani A., Galfetti L., Severini F., Colombo G., Cozzi F., Lesma F., and Sgobba M., "Aluminum Particle Size Influence on Ignition and Combustion of AP/HTPB/Al Solid Rocket Propellants", *Advances in Rocket Propellant Performance, Life and Disposal for Improved System Performance and Reduced Costs.*, *Nato Unclassified*, 1-12, **2002**.
19. Babuk V., Dolotkazin I., Gamsov A., and Glebov A., "Nanoaluminum as A Solid Propellant Fuel", *J. Propul. Power.*, 25, 482-489, **2009**.
20. Jayaraman K., Mulla I., Chakravarthy S. R., and Sarathi R., "Aluminium Agglomerate Size Measurement of the Nano/Micro-Aluminized Composite Propellants", *AIAA.*, Orlando, Florida, **2010**.
21. Kosky J.P., Sunol A. K., and Herren N., "Nano-Structured Propellants and Launch Systems", *Space Propulsion Systems*, **2012**.
22. Duterque J., Ftrubert J., Trubert J. F., "Combustion of Solid Propellants", *ONERA*, France, **2002**.
23. Kohga M., "Burning Characteristics of AP/HTPB Composite Propellants Prepared with Fine Porous or Fine Hollow Ammonium Perchlorate", *Prop Explo Pyrotech*, 31, 50-55, **2006**.
24. Ramesh K., Jawalkar S. N., Sachdeva S., and Bhattacharya B., "Development of a Composite Propellant Formulation with a High Performance Index Using a Pressure Casting Technique", *Central European Journal of Energetic Materials*, 9, 49-58, **2012**.

