نقش نانو ذرات آلومینیم در رفتار سوختن پیشرانه‌های جامد مرکب

محسن زراعتکار مقدم[۱]، عباس کبریت‌چی[۲*]

۱- کارشناس ارشد پیشرانه جامد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۲- استادیار مهندسی پلیمر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۱

پیام‌نگار: a.kebritchi@ippi.ac.ir

چکیده

کاربرد نانو ذرات فلزی در مواد پرانرژی (منفجره، پیشرانه و پیروتکنیک) گسترده است. در پیشرانه‌های جامد، نانو ذرات به‌منظور بهبود بخشیدن عملکرد به عنوان افزودنی در سوخت به کار می‌روند. در این مقاله، نقش نانو ذرات آلومینیم در رفتار سوختن پیشرانه‌های جامد مرکب بررسی و مطالعه خواهد شد. نانو ذرات آلومینیم یکی از مهم‌ترین اجزای پرانرژی سوخت فلزی در پیشرانه‌های جامد مرکب به‌شمار می‌آیند. بنابر مطالعات انجام شده، افزودن نانو ذرات آلومینیم، سبب افزایش آهنگ سوختن، کاهش میزان انباشتها، کوچک شدن قطر ذرات در حال سوختن، کاهش دمای آغاز احتراق، و نیز کاهش مقدار و اندازه ذرات خاکستر باقیمانده می‌شود. همچنین، مصرف نانو ذرات آلومینیم سبب کاهش نمای فشار در قانون آهنگ سوختن می‌شود. بر اساس این مطالعات، کاهش اندازه ذرات آلومینیم از میکرو به نانو، موجب افزایش تقریباً ۱۰۰٪ در آهنگ سوختن پیشرانه‌های جامد مرکب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نانو ذرات آلومینیم، پیشرانه‌های جامد مرکب، آهنگ سوختن، احتراق

۱. مقدمه

صنایع دفاعی یکی از نخستین زمینه‌هایی است که کشورهای پیشرفته می‌کوشند در آن حوزه از بهترین و جدیدترین فناوری‌ها بهره گیرند. از زمانی که نانوفناوری[1] به عنوان یک زمینه پژوهشی در جهان پای بر صحنه نهاد، به شدت مورد توجه صنایع نظامی قرار گرفت و به جستجوی یافتن کاربردهای نظامی آن برآمدند[۱]. گسترش دامنهٔ نانوفناوری، از اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد، تا جایی که امروزه مواد نانو ساختار در کلیه حوزه‌های گوناگون نظامی شامل صنایع دفاعی، هوافضا، دریایی و زمینی به‌کار گرفته می‌شوند[۲]. بهره‌گیری از نانو ذرات فلزی به جای ذرات میکرونی در چند سال گذشته در برنامه تحقیقاتی بخشهای دفاعی در دنیا قرار گرفته است[۳]. یکی از مهم‌ترین اجزای مورد بررسی در فرمولبندی پیشرانه‌ها، نانو ذرات آلومینیم بوده است که در نقش سوخت فلزی طی فرایند اکسایش، انرژی زیادی آزاد می‌کنند[۴]. پودر فلزات و مواد اکساینده در مقیاس نانو از جمله اجزایی‌اند که برای توسعه عملکرد موشک‌های سوخت جامد مورد توجه قرار گرفته‌اند[۵].

پیشرانه‌های جامد[2]، شامل چندین جزء شیمیایی مانند اکساینده[3]، سوخت[4]، چسب‌و بست[5]، نرم‌کننده[6]، عامل پخت[7]، تثبیت‌کننده[8] و عامل اتصال عرضی[9]اند. فرمولبندی شیمیایی پیشرانه‌های جامد متناسب با ویژگی‌های احتراق مورد نیاز برای یک مأموریت طراحی

* تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی (مرکز علم و فناوری موسم)

1. Nano Technology

2. Solid Propellants
3. Oxidizer
4. Fuel
5. Binder
6. Plasticizer
7. Curing Agent
8. Stabilizer
9. Cross-linking Agent

می‌شود[۶]. پیشرانه‌های جامد اغلب برای کاربردهای خاصی چون ماهواره[۱]، موشک[۲] و تفنگ[۳] طراحی و طبقه‌بندی می‌شوند. مواد شیمیایی با نسبت‌های مختلف منجر به ایجاد خواص فیزیکی، شیمیایی، احتراقی، عملکردی و نیز کارایی متفاوتی می‌شوند. پیشرانه‌های مرکب شامل یک سوخت فلزی، اکساینده و یک بستر بسپاری‌اند[۷]. پیشرانه‌های جامد معمولاً به عنوان سوخت موتورهای راکتی جامد[۴] و نیز در حکم نیروی پیش‌برنده موشک در تسلیحات استفاده می‌شوند. پیشرانه‌های جامد بسیار پرانرژی‌اند و پس از احتراق، محصولات گازی با دمای بالا تولید می‌کنند. انرژی تولید شده در واحد حجم پیشرانه را «چگالی انرژی پیشرانه» می‌نامند. برای تولید نیروی پیشرانش بیشتر؛ از پیشرانه‌های جامد دارای مواد چگال‌تر استفاده می‌شود که چگالی انرژی بالاتری ایجاد می‌کنند. پیشرانه‌ها به منظور تولید نیروی پیشران[۵] مورد نظر به صورت کنترل شده سوزانده می‌شوند[۸].

در صورت افزودن موادی در اندازه‌ی نانو، به پیشرانه‌های جامد مرکب، عملکرد پیشرانه‌ها به میزان قابل توجهی بهبود خواهد یافت. به طور کلی، ذرات آلومینیم در اندازه‌های نانو نسبت به ذرات میکرونی، رفتار حرارتی متفاوتی دارند. از آنجا که نانو ذرات به علت سطح ویژه بالا دارای انرژی فوق‌العاده‌ای درون خود هستند؛ به منظور دستیابی به آهنگ سوختن بالاتر و افزایش سطح انرژی پیشرانه‌ها، می‌توان از آن‌ها بهره برد[۹]. نسل جدید موشک‌ها و پیشرانه‌ها برای کاربرد در پروازهای فضایی نیاز به کارایی بالاتری دارند، که این موضوع رویکرد جدیدی را برای بهره‌گیری از مواد نانو ساختار ایجاد کرده است. بنابراین، مطالعه بر روی نقش نانو ذرات به عنوان یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در نظر گرفته می‌شود[۲]. معمولاً پودرهای فلزی به منظور دستیابی به انرژی آزاد شده بیشتر هنگام واکنش با اکسیژن، افزایش چگالی، کاهش نمای فشار[۶] و جلوگیری از ناپایداری‌های احتراق به پیشرانه‌ها اضافه می‌شوند. در مواردی، فلزات به شکل سیم یا صفحات نازک به‌منظور افزایش آهنگ سوختن و بهبود خواص مکانیکی افزوده می‌شوند. آلومینیم، منیزیم[۷]، بور[۸] و زیرکونیم[۹] در فرمولبندی‌های پیشرانه‌ها کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند[۱۰].

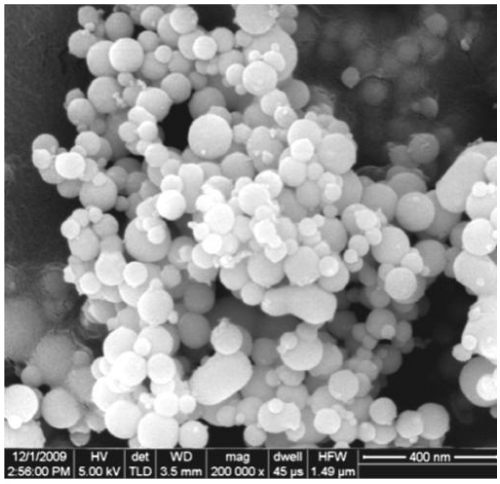
ذرات آلومینیم نسبت به سایر فلزات به علت انرژی بسیار بالاتر، حرارت احتراق بالاتر، چگالی بیشتر و در نتیجه ضربهٔ ویژه[۱۰] بیشتر کاربرد وسیع‌تری در فرمولبندی‌های پیشرانه یافته‌اند. همچنین، پودر ذرات آلومینیم اغلب موجب پایداری سوختن می‌شود[۱۰]. اخیراً، در حوزهٔ علم و فناوری نانو در توانایی تولید، کنترل و بروز خواص مواد انرژی‌زا[۱۱] در مقیاس نانو پیشرفت‌هایی به‌دست آمده که مزایای فراتری را نسبت به مواد در اندازه میکرون نشان می‌دهند. علت این امر آن است که ذرات در مقیاس نانو دارای سطح ویژه بالاتر، زمان سوختن کوتاه‌تر و احتراق کامل‌تری نسبت به ذرات در اندازه میکرون هستند[۱۳-۱۱].

اخیراً، کاربرد از ذرات آلومینیم در اندازه‌های نانو، به جای ذرات میکرونی در پیشرانه‌های جامد مرکب برای کاربردهای موشکی و پرتابه‌ای مورد توجه قرار گرفته است[۱۴]. رمودانوا[۱۲] و پوخیل[۱۳][۱۵]، آهنگ سوختن قرص‌های[۱۴] خشک تحت فشار حاوی نانو ذرات آلومینیم فوق‌العاده نرم و ترکیب‌شده با آمونیم پرکلرات و افزودنی‌های جزئی مانند سیلیس را بسیار بالا گزارش کردند. به تازگی نانو ذرات آلومینیم به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای ترکیبات پرانرژی از جانب مدا[۱۵] و همکارانش[۱۶]، جایارامان[۱۶] و همکارانش[۱۷]، گان[۱۷] و کی‌آو[۱۸][۱۸] مورد توجه قرار گرفته است. نانو ذرات آلومینیم به عنوان افزودنی در سوخت پیشرانه‌های جامد به‌کار می‌روند. منچ[۱۹] و همکارانش[۱۹] آهنگ سوختن پودر نانو ذرات آلومینیم را مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که

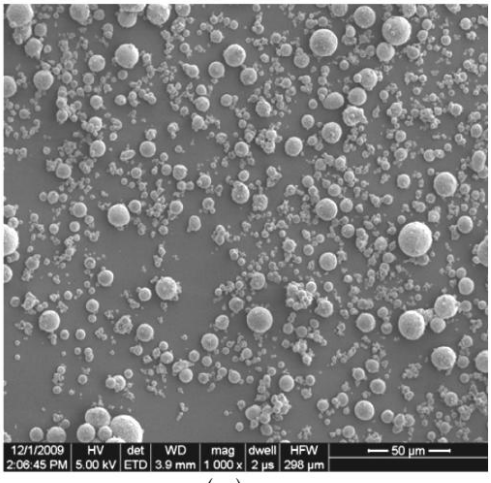
1. Space Launch
2. Missile
3. Gun
4. Solid Rocket Motors
۵. Thrust: در اصطلاح نظامی، به نیرویی است که پیشرانه به صورت واکنش (قانون سوم نیوتن) در موشک ایجاد می‌کند.
6. Pressure Exponent

7. Magnesium
8. Boron
9. Zirconium
۱۰. Specific Impulse: ضربه یا تکان کل عبارت است از انتگرال نیروی پیشران بر زمان سوختن مؤثر است و ضربهٔ ویژه برابر ضربهٔ کل بر واحد وزن پیشران است. چیزی شبیه به مفهوم کیلومترشمار در اتومبیل. بنابراین هر چه ضربهٔ ویژه بیشتر باشد عملکرد پیشران بهتر است. ضربهٔ ویژه مهم‌ترین خاصیت بالستیکی پیشرانه‌های موشکی است و مقدار آن از بیشترین اهمیت برای تعیین جرم مورد نیاز برای رسیدن به الزامات بالستیکی برخوردار است.
11. Energetic Materials
12. Romodanova
13. Pokhil
14. Pellets
15. Meda
16. Jayaraman
17. Gan
18. Qiao
19. Mench

نانو ذرات در مقایسه با میکرو ذرات آلومینیم، موجب افزایش تقریباً صددرصدی در آهنگ سوختن می‌شوند. زارکو[1] و همکارانش[۲۰] نیز گزارش کردند که جایگزین کردن پودرهای نانو به جای پودرهای تجاری، موجب کاهش زمان تأخیر آغازگری و افزایش آهنگ سوختن در حد ۲ تا ۵ برابر در محدوده‌ی فشاری ۱۰ تا ۹۰ اتمسفر می‌شود. در شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی[2] (SEM) از ذرات آلومینیم در اندازه میکرون و نانو را مشاهده می‌کنید[۲۱].



(الف)



(ب)

شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) ذرات آلومینیم: (الف) نانو ذرات با قطر متوسط ۸۰ نانومتر؛ (ب) میکرو ذرات با قطر متوسط ۵ میکرومتر[۲۱].

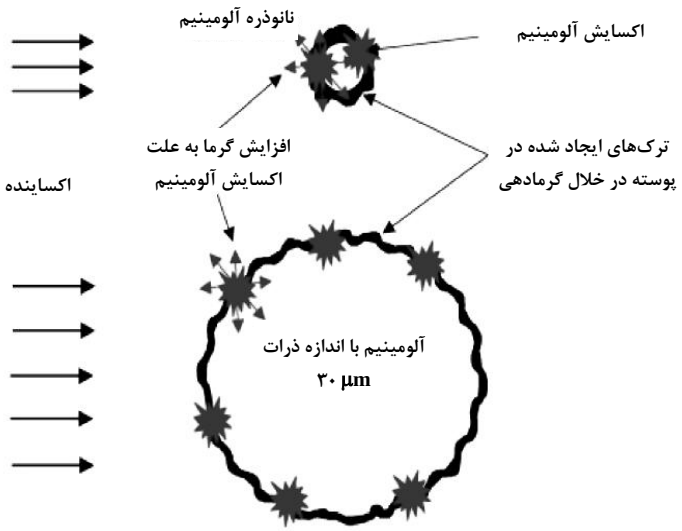
۲. دلایل کاربرد از نانو ذرات آلومینیم در پیشرانه‌های جامد مرکب

از آنجا که معمولاً ذرات اکسایننده بزرگتر از ذرات سوخت فلزی‌اند، این تفاوت در اندازه ذرات سبب می‌شود تا سوخت فلزی به همراه اکسایننده‌هایی که اندازه کوچکتری دارند، در بین فضاهای خالی اکسایننده قرار گیرند[۲۲]. ذرات آلومینیم بسیار فعال‌اند اما به‌دلیل تشکیل لایه آلومینیم اکسید (Al_2O_3) بر روی آن‌ها، فعالیت خود را تا حد زیادی از دست می‌دهند و تا از بین رفتن این لایه اکسیدی، به همان صورت باقی می‌مانند. برخلاف دیگر اجزای پیشرانه، ذرات آلومینیم به دلیل دمای ذوب بالا (حدود ^{o}C ۶۶۰) و نیز وجود لایه اکسیدی با دمای ذوب بالا (^{o}C ۲۰۴۷) در دمای سطح پیشرانه هنگام احتراق تجزیه نمی‌شوند. وقتی ذرات آلومینیم در سطح سوختن قرار می‌گیرند، این ذرات تجزیه یا تبخیر نمی‌شوند. بنابراین، در سطح سوختن باقی می‌مانند، غلیظ می‌شوند و با اکسایننده به شدت وارد واکنش می‌شوند که این شدت به غلظت ذرات آلومینیم اولیه در ساختار میکرونی پیشرانه بستگی دارد[۲۳]. سرانجام، بر اثر برخوردهای موجود به صورت توده، سطح را ترک می‌کنند[۲۴].

رفتار سوختن پیشرانه‌های جامد حاوی میکرو ذرات آلومینیمی، با پیشرانه‌های حاوی نانو ذرات آلومینیم متفاوت است. سازوکار احتراق نانو ذرات آلومینیم در پیشرانه‌ها، مشابه میکرو ذرات است. مطابق شکل (۲) به علت کوچک شدن اندازه ذرات آلومینیم، شکستن لایه اکسیدی و در معرض قرار گرفتن آلومینیم در نانو ذرات، به طور بسیار مؤثرتری صورت می‌گیرد و با افزایش محفظه‌های[3] احتراق ذرات آلومینیم، گرمای آزاد شده در واحد حجم در مقایسه با میکرو ذرات افزایش می‌یابد[۲۳].

اندازه ذرات اکسیدشده باقیمانده، به اندازه ذرات آلومینیم در داخل انباشته‌ها وابسته است که با انتخاب مناسب اندازه ذرات آلومینیم، می‌توان به ذرات اکسیدشدهٔ بهینه دست یافت. مطالعات نشان داده است که با افزایش نانو ذرات آلومینیم، میزان انباشتها کاهش می‌یابد. انباشت ایجاد شده از نانو ذرات آلومینیم، بسیار کوچک‌تر از انباشت تولید شده از میکرو ذرات است[۲۵].

1. Zarko
2. Scanning Electron Microscope (SEM)
3. Sites



شکل ۲. افزایش میزان گرما در واحد حجم با کوچک شدن اندازه ذرات آلومینیم[۲۳].

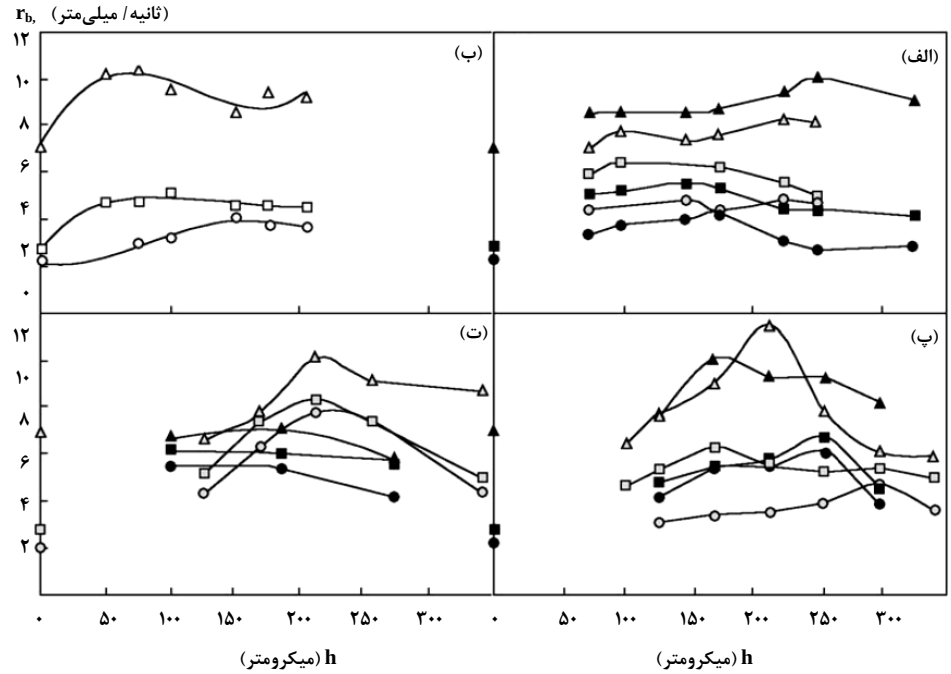
۳. احتراق ساندویچی

آهنگ سوختن سوخت‌های ساندویچی[1] با لایه میانی حاوی ذرات میکرونی یا نانو ذرات آلومینیم مخلوط با درصدهای جرمی متفاوتی از چسب و بست، در فشارهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۳). آهنگ سوختن سوخت‌های هسته‌دار از طریق شعله‌های ایجاد شده در دیواره که از رابطه‌ی بین چسب وبست و آمونیم پرکلرات تشکیل شده است، کنترل می‌شود[۲۶]. حداکثر آهنگ سوختنِ سوخت‌های هسته‌دار در ضخامتی از لایه‌ای خاص[2] رخ می‌دهد، جایی که در آن دو لبه شعله (LEF)[3] با یکدیگر به شدت در تعامل‌اند[۲۷].

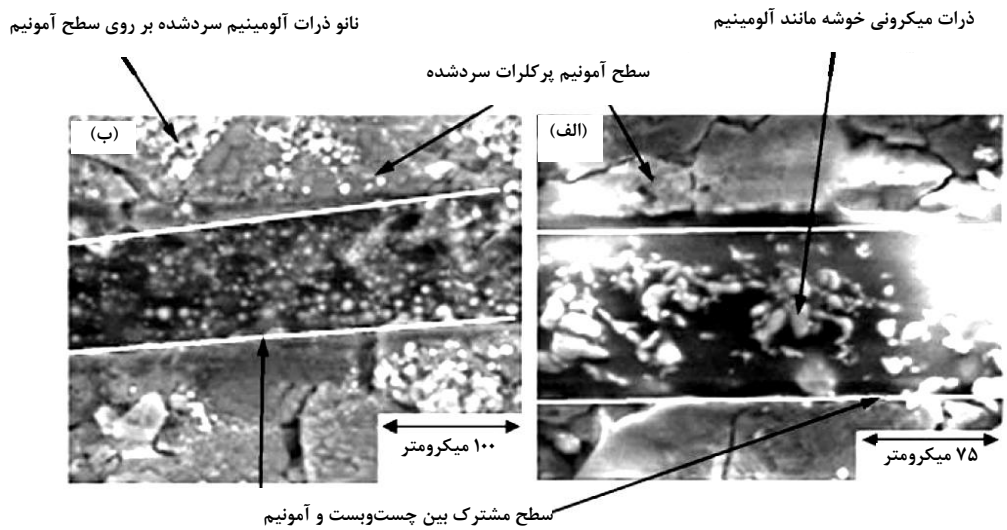
آهنگ سوختن سوخت‌های هسته‌دار حاوی نانو ذرات آلومینیم، بیشتر از سوخت‌های هسته‌دار دارای ذرات میکرونی است. علت این امر سهولت اشتعال نانو آلومینیم‌ها و احتراق تقریباً کامل و نزدیک به سطح سوختن در سوخت‌های هسته‌دار است که باعث افزایش آهنگ سوختن می‌شود[۲۵]. حداکثر آهنگ سوختن برای سوخت‌های هسته‌دار حاوی نانو ذرات آلومینیم در ضخامتی از لایه‌ی بالاتر چسب وبست نسبت به آن‌هایی است که حاوی ذرات میکرونی‌اند که این نیز به نوبه‌ی خود نسبت به سوخت‌های هسته‌دار، دارای چسب وبست خالص، بزرگترند (شکل (۳))[۲۹-۲۸]. این اثر با افزایش تعداد نانو ذرات، تقویت می‌شود. آهنگ سوختن سوخت‌های هسته‌دار پوشش داده شده با نانو ذرات آلومینیمی نسبت به آن‌ها که با ذرات میکرونی و غیر آلومینیمی در ضخامت‌های بزرگتر لایه میانی پوشش داده شده‌اند، بالاتر است. در نتیجه، اشتعال و احتراق نانو ذرات آلومینیم بین لبه شعله‌ها، حتی وقتی از هم دورند، نیز باعث افزایش برهم‌کنش‌ها می‌شود. افزایش برهم‌کنش بین لبه شعله‌ها به علت احتراق نانو ذرات آلومینیم بین آن‌ها (به علت شعله‌ی پیش آمیخته سوخت- اکساینده بر روی لایه میانی سوخت‌های هسته‌دار حاوی چسب وبست مخلوط شده با ذرات آمونیم پرکلرات) به همین ترتیب است[۲۹-۲۸].

برخی ذرات آلومینیم بر روی سطح سوختن لایه آمونیم پرکلرات سوخت‌های هسته‌دار در نمونه‌های رو به خاموشی مشاهده می‌شوند. در شکل (۴)، انباشت ذرات آلومینیم روی سطح سوختن لایه چسب‌وبست در سوخت‌های هسته‌دار، شامل هر دو نوع آلومینیم، مشاهده می‌شود. در این شکل، سوخت‌های هسته‌دار پوشش داده شده با نانو ذرات آلومینیم مشاهده می‌شوند که اندازه نمونه انباشتهای خوشه‌ای مانند نانو ذرات آلومینیم تقریباً حدود µm ۱ تا µm ۵ است. این اندازه نسبت به اندازه طبیعی ذرات آلومینیم اولیه گنجانده شده در لایه میانی بسیار بزرگتر است. همچنین، انباشت مشابهی از ذرات میکرونی آلومینیم دیده می‌شود اما اندازه خوشه‌های انباشته، به طور چشمگیری بزرگتر از ذرات آلومینیم اولیه نخواهند بود (شکل (۴)). پس این امکان وجود دارد که نانو ذرات آلومینیم انباشته به شکل خوشه، نسبت به اندازه منحصر به فردشان با توجه به چگالی بالا، تقریباً بزرگ باشند[۲۷].

1. Sandwiches Fuels
2. Particular Lamina
3. Leading Edge of the Flame (LEF)



شکل ۳. آهنگ سوختن (r_b) نسبت به ضخامت لایه (h) برای سوخت‌های هسته‌دار با آلومینیم پرشده از لایه چسب وبست با تغییرات فشار، اندازه ذرات آلومینیم، و محتویات آلومینیم در لایه میانی: (الف) ۲۵٪ ذرات میکرونی یا نانو آلومینیمی مخلوط شده با لایه چسب وبست؛ (ب) لایه چسب وبست خالص (بدون آلومینیم)؛ (پ) ۴۰٪ ذرات میکرونی یا نانو آلومینیمی مخلوط شده با لایه چسب وبست؛ (ت) ۱۵٪ ذرات میکرونی یا نانو آلومینیمی مخلوط شده با لایه چسب وبست. نقاط سفید به چسب وبست خالص، خاکستری به چسب وبست پوشش داده شده با ذرات نانو آلومینیم و سیاه به چسب وبست پوشش داده شده با ذرات میکرونی آلومینیم اشاره دارند (در مرجع هم از عکس سیاه و سفید استفاده شده است). منظور از دایره‌ها فشار ۲MPa، مربع‌ها فشار ۳/۵MPa و مثلث‌ها فشار ۷MPa است[۲].



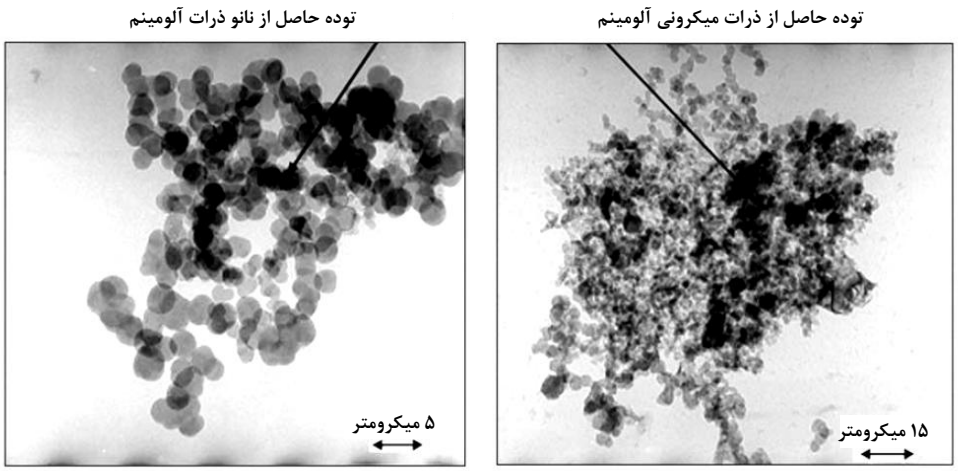
شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) سوخت‌های هسته‌دار با؛ (الف) ۲۵٪ ذرات میکرونی آلومینیم سرد شده در فشار ۲MPa؛ و (ب) ۲۵٪ نانو ذرات آلومینیم[۲۷].

در شکل (۵) توده‌های[1] آلومینیمی ایجاد شده از سوخت‌های هسته‌دار سوخته شده را مشاهده می‌کنید. ذرات آلومینیمی اساساً کدرند، بنابراین، در عکس‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)[2] به صورت سیاه رنگ ظاهر می‌شوند. توده آلومینیم به ازای هر دو اندازه ذرات آلومینیمی (میکرونی و نانو) ایجاد می‌شود. مطابق ریزنگاشتهای تصویر میکروسکوپ الکترونی قبلی (شکل (۴))، حداکثر اندازه توده‌های حاصل از نانو ذرات آلومینیمی ۵ µm خواهد بود. توده حاصل از ذرات میکرونی در شکل (۵)، گستره‌ی بزرگی از خوشه‌بندی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که بلافاصله بعد از اشتعال، در طی یک احتراق ناقص سرد و خاموش می‌شود[۲۷].

۴. مقایسه نانو ذرات آلومینیم و تفاوت آن با میکرو ذرات آلومینیم

در جدول (۱) مقایسه‌ای از برخی ویژگی‌های ذرات آلومینیم با اندازه نانو و میکرونی شامل رنگ، وزن، اندازه ذرات توده، چگالی توده، میزان جذب رطوبت، توزیع و قطر ذرات ارائه شده است.

بنابراین، مطابق مقایسه مندرج در جدول (۱)، چگالی توده به میزان زیادی به اندازه ذرات وابسته است. مساحت سطح بالای پودر نانو ذرات آلومینیم فعالیت آن را زیاد می‌کند و رطوبت تأثیری منفی در هنگام استفاده از پودر آلومینیم خواهد داشت[۱۰].



شکل ۵. ریزنگاشتهای میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) توده‌های آلومینیمی خاموش شده از سوخت‌های هسته‌دار در فشار 5MPa[۲۷].

جدول ۱. مقایسه برخی از ویژگی‌های ذرات آلومینیم با اندازه نانو و میکرونی[۱۰].

برخی از ویژگی‌ها	نانو ذرات آلومینیم	میکرو ذرات آلومینیم
رنگ	خاکستری تیره	خاکستری روشن
وزن و اندازه ذرات توده	بسیار سبک وکوچک	سنگین‌تر و بزرگ
چگالی توده	$<0/1 g/cm^3$	$>1/5 g/cm^3$
میزان جذب رطوبت	۵٪ جرمی	۵٪ جرمی >
تعداد ذرات	زیاد	کم

1. Agglomerates
2. Transmission Electron Microscope (TEM)

۵. مزیتهای استفاده از آلومینیم در سوخت

- افزایش چگالی
- آزادسازی گرمای زیاد در خلال اکسایش و افزایش ضربهٔ ویژه (استفاده ۱۵٪ آلومینیم باعث افزایش ۱۰ درصدی ضربهٔ ویژه می‌شود.)
- ارزانی نسبی
- امنیت نسبی: افزایش آلومینیم حتی به مقدار کم مانع ایجاد مشکلات اساسی ناشی از احتراق (که در طراحی موتورها متداولند) می‌شود[۲۴].

۶. ایرادهای استفاده از آلومینیم

- دودزایی
- درخشش گازهای خروجی
- تداخل با خطوط اطلاعاتی جنگی داخلی و سامانهٔ هدایت راداری
- آلوده شدن سکوی پرتاب با آلومینیم اکسید (Al_2O_3)
- آثار زیانبار بر محتویات موتور در حرارت بالا
- ایجاد جریان دو فازی (جریان دو فازی گرم یک محیط برای ترکیبات داخلی موتور نامطلوب است)
- افزایش خطر آتش‌سوزی ناشی از انباشت توده و خارج شدن همراه با انفجار[۲۴].

۷. مهم‌ترین مزایای افزودن نانو ذرات آلومینیم

از مهم‌ترین مزایای افزودن نانو ذرات آلومینیم، می‌توان به افزایش آهنگ سوختن، کاهش میزان انباشتها و قطر ذرات در حال سوختن، کاهش دمای شروع احتراق و نیز کاهش مقدار و اندازه خاکستر باقی‌مانده اشاره کرد. بنابر بررسی‌ها، مشخص شده است که علت این تأثیرات، احتراق نانو ذرات آلومینیم در نزدیکی سطح احتراق است و از آنجا که ذرات ریز آلومینیم سریع‌تر مشتعل می‌شوند، جبهه شعله به سطح سوختن نزدیک‌تر می‌شود[۳۰]. در شکل (۷) تصویری از احتراق پیشرانه‌های حاوی آلومینیم در اندازه نانو و میکرو را مشاهده می‌کنید. یکی از مزایای استفاده از نانو ذرات آلومینیم در ساختار شعله، افزایش تمرکز درخشندگی ناحیه شعله است. نواحی درخشان ناشی از سوختن قطرات آلومینیم در پیشرانه‌های حاوی تک میکرو ذرات آلومینیمی و جدا از یکدیگر، در ساختار شعله است. با افزایش درصد جرمی نانو ذرات آلومینیم از طریق جایگزینی با ذرات معمولی آلومینیم، تعداد نواحی درخشان و توزیع پراکندگی آن بیشتر می‌شود. نزدیک‌تر شدن شعله به سطح سوختن همراه با ایجاد نواحی تابش قوی‌تر و زیادتر، باعث افزایش حرارت برگشتی به سطح سوختن می‌شود که مهم‌ترین نتیجه‌ی آن افزایش آهنگ سوختن است[۳].

استفاده از نانو ذرات آلومینیم در فرمولبندی پیشرانه‌ها گسترش چندانی نیافته است و مهم‌ترین دلیل آن هزینه‌ی زیاد استفاده از نانو ذرات آلومینیم است[۱۰]. نخستین محصول حاصل از اکسایش آلومینیم، Al_2O_3 است که فاز متراکم محصولات به‌شمار می‌آید و به نتایج مطلوبی چون کاهش ناپایداری احتراق منجر می‌شود. این ذرات اکسید باقیمانده، به طور مؤثری به کاهش نوسانهای بسامدهای پایین تا متوسط می‌انجامند و نتایج نامطلوبی مانند خوردگی نازل (شیپوره) و ایجاد دود خروجی دارند[۳۰].

منشاء ذرات اکسیدی باقیمانده عبارتند از:

۱- Al_2O_3 ناشی از لایه اکسیدی

۲- Al_2O_3 ناشی از احتراق ذرات آلومینیم

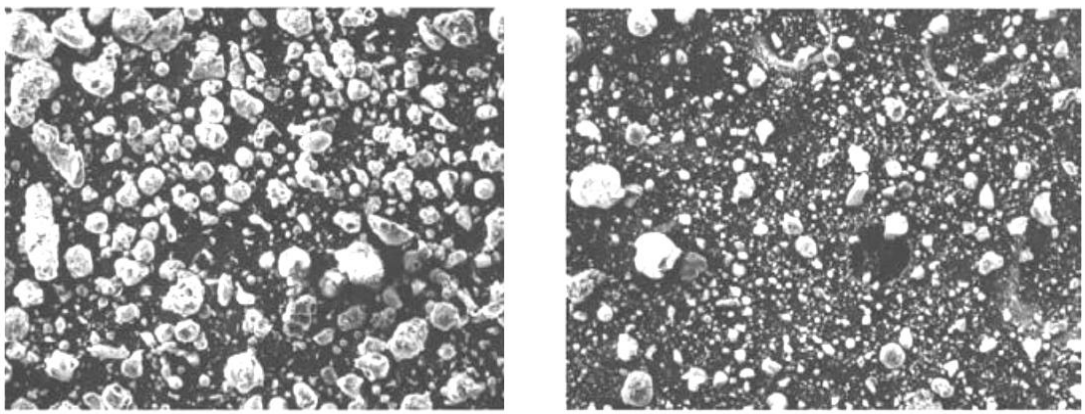
انباشت حاصل از احتراق نانو ذرات آلومینیم (شکل (۶)- الف)، بسیار کوچک‌تر از انباشتهای ناشی از احتراق میکرو ذرات آلومینیم (شکل (۶)- ب) است[۳۰].

۸. مقایسه آهنگ سوختن ذرات میکرونی و نانو ذرات آلومینیم

سنجش آهنگ سوختن می‌تواند به سه محدوده‌ی ویژه فشار تقسیم شود که برای نانو ذرات آلومینیمی در پودر اولیه، نانو ذرات انباشته نشده و ذرات میکرونی را در شکل (۸) مشاهده می‌کنید. این سه محدوده عبارتند از:

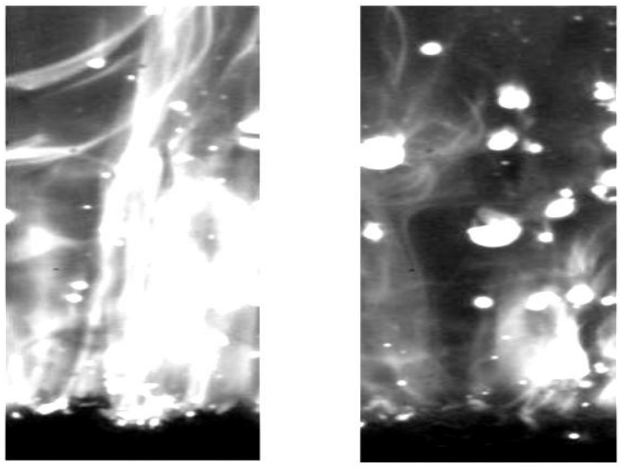
۸. ۱ مرحله اول، از فشار ۱ تا ۷ یا ۸MPa: برای نانو ذرات آلومینیم و ذرات آلومینیم انباشته نشده، به ترتیب، توان فشار (در رابطه‌ی قانون ویله[1] یا ساینت رابرت[2]، معادله۱) ۳۰ و ۳۶۶ تخمین زده می‌شود که با افزایش فشار، آهنگ سوختن کاهش خواهد یافت.

1. Vieille
2. Saint Robert



(الف) (ب)

شکل ۶. ذرات خاکستر باقیمانده در؛ (الف) پیشرانه‌های حاوی نانو ذرات آلومینیم با اندازه ۱۷۰nm؛ و (ب) ذرات خاکستر باقیمانده در پیشرانه‌های حاوی آلومینیم با اندازه ۳۰µm [۳۰].



(الف) (ب)

شکل ۷. تصویری **از احتراق پیشرانه. (الف) پیشرانه با نانو ذرات آلومینیم؛ و (ب) پیشرانه با ذرات میکرونی آلومینیم**[۳۱].

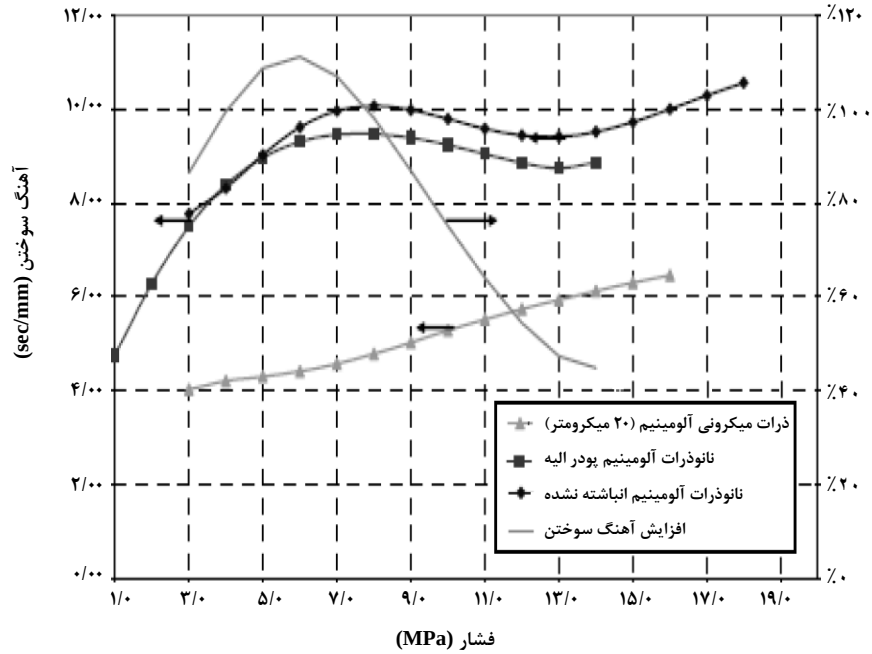
$$r = ap^n \quad (۱)$$

در این معادله، r آهنگ سوختن، a ضریب ثابت، و n نمای (توان) فشار است. مقادیر a و n برای فرمولبندی‌های مختلف متفاوت است.

۸. ۲ مرحله دوم، تغییر تدریجی فشار بین ۷ تا ۱۳MPa: با افزایش فشار پیشرانه‌های حاوی آلومینیم، افزایش آهنگ سوختن مشاهده می‌شود.

۸. ۳ مرحله سوم، فشارهای بالاتر از ۱۵ تا ۲۰MPa: با اندازه‌گیری در یک بمب بسته، در توان فشار سرعت احتراق افزایش چشمگیری اتفاق خواهد افتاد (به ترتیب، ۵، ۵۴ و ۶۲ برای نانو ذرات آلومینیم انباشته نشده، نانو ذرات آلومینیم اولیه و پودرهای آلومینیمی با اندازه میکرونی).

بنابر سه مرحله‌ی بالا، از دیدگاه بالستیکی با نشاندن نانو ذرات آلومینم به جای ذرات میکرونی، آهنگ سوختن در فشار متوسط تا ۱۱۰٪ افزایش می‌یابد اما برای فشارهای بالاتر محدوده ۱۵ MPa تا ۲۰MPa تنها با ۴۰٪ بازده و در فشار بین ۸ MPa تا ۱۵MPa، نتایج مغایرت دارد و آهنگ سوختن وابستگی کمی به فشار نشان می‌دهد[۳۱].



شکل ۸. سیر تکاملی آهنگ سوختن اندازه‌گیری شده با روش فراصوتی[۳۱].

۹. نتیجه‌گیری کلی

افزودن ذرات نانو به فرمولبندی پیشرانه جامد، به افزایش آهنگ سوختن، کاهش ضربهٔ ویژه (I_{SP}) و کاهش تراکم سوخت فلزی می‌انجامد. از جمله علتهای تغییر خواص بر اثر حضور نانو ذرات در مقایسه با میکرو ذرات، سطح ویژه بالاتر در نانو ذرات و تراکم بالای شکست‌های سطحی در آنهاست. نانو ذرات فلزی دارای سطح ویژه بالاتر، تأخیر در اشتعال[۱] کوتاه‌تر، زمان سوزش کوتاه‌تر و احتراق کامل‌تری نسبت به میکرو ذرات دارند. بهره‌گیری از نانو ذرات آلومینیم سبب کاهش نمای فشار در قانون آهنگ سوختن می‌شود و از این‌رو، آهنگ سوختن به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد. در واقع نانو ذرات آلومینیم در مقایسه با میکرو ذرات، موجب افزایش حدود ۱۰۰٪ در آهنگ سوختن می‌شود. با کاهش اندازه ذرات آلومینیمی سطح ویژه آن افزایش می‌یابد که به ارتقای کارایی احتراقی آن‌ها می‌انجامد. میزان افزایش آهنگ سوختن با نسبت نانو ذرات آلومینیم رابطه دارد، اما افزایش نانو ذرات آلومینیم تغییر زیادی در چگالی پیشرانه‌های جامد مرکب ایجاد نمی‌کند. به طور کلی، نانو ذرات آلومینیم، سبب افزایش آهنگ سوختن، کاهش انباشته‌ها، قطر ذرات در حال سوختن، دمای شروع احتراق و نیز میزان و اندازه خاکستر باقیمانده می‌شود.

۱. Ignition Delay: میزان آتش‌گیری سوخت‌ها با معیاری به نام تأخیر در اشتعال (یا پس‌افت اشتعال) اندازه‌گیری می‌شود. یعنی، یک فاصله‌ی زمانی از لحظه‌ی تماس بین واکنشگرها تا لحظه‌ی آغاز واکنش طول می‌کشد که تأخیر در اشتعال نامیده می‌شود. معمولاً این تأخیر در مقیاس چند میلی ثانیه است و نباید از مقدار مشخصی تجاوز کند. بنابراین، هرچه میزان تأخیر در اشتعال کوتاهتر باشد پیشرانه عملکرد مناسب‌تری دارد.

مراجع

[۱] قیاسوندی، فاطمه، "نقش نانو تکنولوژی در امنیت ملی و صنایع دفاعی"، نشریه دانش، http://www.magiran,com, (2012).

[2] Sun, Y., Li, S., "Combustion Characteristics of Coated Nono Aluminum in Composite Propellants". Defence Science Journal, 56(4), 543-50, (2006).

[3] Yang, V., Brill, T. B., Ren, W. Z., "Solid Propellant Chemistry Combustion and Motor Interior Ballistics". American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2000).

[۴] بلاغی‌اینالو، ابراهیم؛ دهنوی، محمدعلی؛ بلاغی‌اینالو، اسماعیل؛ "فرمولبندی پیشرانه جامد مرکب حاوی نانو ذرات آلومینیم"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، کدمقاله ۱۰۲۴۱، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، صفحه ۱-۱۰۲۴۱ تا ۷-۱۰۲۴۱، (۱۳۹۱).

[۵] سیف، فرهاد؛ قاسمی، محمدعلی؛ "تأثیر نانو ذرات آلومینیم در رفتار احتراقی یک سوخت جامد"، همایش ملی نانو مواد و نانو تکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، (۱۳۸۸).

[6] Kubota, N. "Survey of rocket propellants and their combustion characteristics." American Institute of Aeronautics and Astronautics, 90, 1–52, (1984).

[7] Beckstead, M. W., Puduppakkam, K., Thakre, P., Yang, V. "Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients." Progress in Energy and Combustion Science, 33, 497-551, (2007).

[8] Thakre, P., Yang, V. "Solid Propellants." Encyclopedia of Aerospace Engineering, (2010).

[9] Gao, D., Zhang, W., Zhu, H., Liu, X. "Application of nano-aluminum in composite propellant." Journal of Solid Rocket Technology, 30(5), 420-423, (2007).

[10] Agrawal, J. P. "High Energy Materials Propellants, Explosives and Pyrotechnics." Wiley-Vch Verlag Gmbh & Co Kgaa, (2010).

[11] Yetter, R. A., Risha, G. A., Son, S. F. "etal particle combustion and nanotechnology." Proceedings of the Combustion Institute, 32(2), 1819 –38, (2009).

[12] Dreizin, E. L. "Metal-based reactive nanomaterials." Progress in Energy Combustion Science, 35(2), 141–67, (2009).

[13] Granier, J. J., Pantoya, M. L. "Laser ignition of nanocomposite thermites." Combustion and Flame, 138(4), 373-83, (2004).

[14] Jayaraman, K., Chakravarthy, S. R., Sarathi, R. "Accumulation of Nano-Aluminium during Combustion of Composite Solid Propellant Mixtures." Combustion, Explosion and Shock Waves, 46(1), 21–29, (2010).

[15] Romodanova, L. D., Pokhil, P. F. "Action of silica on the burning rates of ammonium perchlorate compositions." Fiz. Goreniya Vzryva, 6(3), 285–290, (1970).

[16] Meda, L., Marra, G., Galfetti, L., Severini, F., De Luca, L. "Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants." Mater. Sci. Eng. C., 27(5-8), 1393-396, (2007).

[17] Jayaraman, K., Anand, K. V., Chakravarthy, S. R., Sarathi, R. "Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion." Combustion and Flame, 156(8), 1662-673, (2009).

[18] Gan, Y., Qiao, L. "Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles." Combustion and Flame, 158, 354-68, (2011).

[19] Mench, M. M., Yeh, C. L., Kuo, K. K. "Propellant Burning Rate Enhancement and Thermal Behavior of Ultra-Fine Aluminum Powders (Alex)." Proc. of the 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 30, (1998).

[20] Simonenko, V. N., Zarko, V. E. "Comparative Study of the Combustion Behavior of Composite Propellants Containing Ultra Fine Aluminum." Proc. of the 30th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 21, (1999).

[21] Gan, Y., Qiao, L. "Combustion characteristics of fuel droplets with addition of nano and micron-sized aluminum particles." Combustion and Flame, 158, 354-68, (2011).

[22] Pivkina, A., Ulyanova, P., Frolov, Y., Zavyalov, S., Schoonman, J. "Nanomaterials for Heterogeneous Combustion." Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 29(1), 39-48, (2004).

[23] Davenas, A. "Solid Rocket Propulsion Technology." Aerospace vehicles. Engines, Oxford. Newyork. Seoul .Tokyo, (1993).

[24] Price, E. W., Sigman, R. K. "Solid Propellants Chemistry, Combustion, and Motor, Interior Ballistics." Combustion of Aluminized Solid Propellants, Ed. By Yang, V. (2000).

[25] Sarathi, R., Sindhu, T. K., Chakravarthy, S. R. "Generation of nano-aluminium powder through wire explosion process and its characterization." Mater. Charact., 58(2) 148–155, (2007).

[26] Price, E. W. "Effect of multi-dimensional flamelets in composite propellant combustion." J. Propuls. Power, 11(4), 717–728, (1995).

[27] Jayaraman, K., Chakravarthy, S. R., Sarathi, R. "Accumulation of Nano-Aluminium during Combustion of Composite Solid Propellant Mixtures." Combustion, Explosion, and Shock Waves, 46(1), 21–29, (2010).

[28] Lee, S. T., Price, E. W., Sigman, R. K. "Effect of multi-dimensional flamelets in composite propellant combustion." J. Propuls. Power, 10(6), 761–768, (1994).

[29] Navaneethan, M., Srinivas, V., Chakravarthy, S. R. "Coupling of leading edge flames in the combustion zone of composite solid propellants." Combust. Flame, 153, 574–592, (2008).

[۳۰] بلاغی‌اینالو، ابراهیم؛ دهنوی، محمدعلی؛ بلاغی‌اینالو، اسماعیل؛ سمنانی رهبر، مجتبی؛ "مطالعه‌ی تأثیر نانوذرات آلومینیم بر عملکرد احتراقی پیشرانه‌های مرکب بر پایه‌ی آمونیوم پرکلرات." تحقیق و توسعه مواد پرانرژی، ۱(۱۶)، ۵۳-۵۹، (۱۳۹۱).

[31] Galfetti, L., Deluca, L. T., Severini, F., Colombo, G., Meda, L., Marra, G. "Pre and post-burning analysis of nano-aluminized solid rocket propellants." Aerospace Science and Technology, 11(1), 26-32, (2007).