

بررسی تأثیر شتاب موشک بر مکانیسم احتراق پیشرانه‌های جامد کامپوزیت

یداله بیات^{۱*}، احسان نریمانی^۲، هاتف ایروانی^۳

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail: y_bayat@muf.ac.ir

(تاریخ وصول: ۹۰/۴/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۹)

چکیده

فرمولاسیون پیشرانه‌های کامپوزیت دارای ذرات جامد آلومینیوم پرکلرات و سوخت‌های فلزی همچون ذرات آلومینیوم می‌باشند که در ماتریس بایندری پیشرانه به طور یکنواخت توزیع شده است. وجود این ذرات جامد، مکانیسم احتراق پیشرانه کامپوزیت را تحت تأثیر قرار داده و باعث بهبود پارامترهای عملکردی راکت از جمله: افزایش ایمپالس ویژه و زمان سوختن طولانی‌تر می‌شود. در این مقاله سعی شده تا اثر شتاب و پدیده‌های ناشی از آن (شامل کلوخه‌ای شدن و تشکیل حفره توسط ذرات جامد درون ماتریس پیشرانه، بازخورد گرمایی و انتقال حرارت ناشی از کلوخه‌ها به سطح در حال سوزش پیشرانه) بر روی مکانیسم احتراق سوخت‌های جامد کامپوزیت، که منجر به افزایش سرعت سوزش پیشرانه می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه تأثیر عوامل مختلفی مانند فشار، نرخ سوزش در حالت ایستا و محتوای آلومینیوم را بر روی افزایش سرعت سوزش پیشرانه تحت شتاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: پیشرانه جامد کامپوزیت، سرعت سوزش، سطح سوزش، کلوخه‌ای شدن، بازخورد گرمایی، حفره‌دار شدن، مکانیسم احتراق.

۱- مقدمه

توسط میدان شتاب ساختاری را پیش‌بینی می‌کند، سازگار است [۶-۲]. مشاهدات حاصل پس از اطفاء سطح سوزش پیشرانه حاوی آلومینیوم نشان می‌دهد، زمانی که پیشرانه تحت یک شتاب مستقیم بر روی سطح سوزش باشد، تعداد زیادی اشکال مخروطی بر روی سطح تشکیل می‌شود که ناشی از ریز قطرات آلومینیومی است که در فرآیند انتقال حرارت در سطح مشارکت کرده‌اند و متعاقب آن در نقطه‌ی تماس افزایش قابل توجهی را در سرعت سوزش به همراه

شتاب موشک در پرواز می‌تواند عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار دهد. این تأثیر در پیشرانه‌های حاوی آلومینیوم واضح‌تر است [۱]. بررسی تأثیر عوامل محیطی، همچون نوسانات شعاعی و محوری موتور و شتاب، بر روی جریان داخلی گاز و احتراق پیشرانه نشان می‌دهد که عوامل محیطی نقش مهمی را در تغییر رفتار احتراق پیشرانه ایفا می‌کنند. این یافته‌ها با تست‌های موتور که افزایش احتراق پیشرانه

۱- دانشیار

۲ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد

دارند [۷]. بردار شتاب بر مسیر حرکت موشک و همچنین بر سطح سوزش در گرین‌های درون‌سوز عمود است. در این مقاله سعی شده تا تأثیر بزرگی شتاب بر نرخ سوزش و عوامل مختلفی که می‌تواند در این میان نقشی داشته باشند مورد بررسی قرار گیرد. عواملی همچون: فلزی یا غیر فلزی بودن پیشرانه، میزان شتاب، مقدار سرعت سوزش ایستا، محتوای آلومینیوم، اثر فشار، ناپایداری احتراق، نوع سوخت جامد (دوپایه، مرکب و ...) و اکسیدایزر، بطور مستقیم یا غیرمستقیم می‌توانند بر نرخ سوزش مؤثر باشند.

۲- تئوری احتراق پیشرانه جامد تحت شتاب

تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد وقتی یک پیشرانه جامد در حال سوزش، در یک میدان شتابدار قرار گیرد، افزایش مشخصی در سرعت احتراق پیشرانه‌های جامد به وجود می‌آید که وابسته به زمان است. البته مدل‌هایی برای پیش‌بینی این افزایش سرعت سوزش^۱ به عنوان تابعی از پارامترهای مختلف برای پیشرانه‌های فلزی و غیرفلزی ارائه شده است و مشخص شده است که در پیشرانه‌های فلزی تعداد مشخصی از کلوخه‌های فلزی با اندازه تقریباً ثابت روی سطح سوزش، حفره‌هایی پدید می‌آورند که رشد می‌کنند و ذرات جامد درون ماتریس پیشرانه، درون این حفره‌های کلوخه‌ای شده^۲ و سرعت سوزش را کنترل می‌کنند. البته عوامل مختلفی از جمله ترکیب پیشرانه نیز بر روی کلوخه‌شدن تأثیر می‌گذارند. برای مثال پیشرانه‌های حاوی ذرات نیتراآمینی کلوخه‌ای شدن متفاوتی نسبت به نوع فاقد این ذرات دارند و بازده احتراق آن‌ها نیز متفاوت است [۸-۱۱].

کلوخه‌ای شدن یا همان به هم چسبیدن ذرات جامد درون پیشرانه، در اثر فعل و انفعالات روی داده شده بر روی سطح سوزش رخ می‌دهد و در اصطلاح ذرات جامد درون ماتریس پیشرانه می‌توانند به صورت توده‌ای در آیند. بررسی احتراق ذرات آلومینیوم، با روش‌هایی مثل: تصاویر میکروسکوپی، تصاویر دیجیتالی و روش‌های آنالیز حرارتی انجام می‌پذیرد. به عنوان مثال با تصویر برداری از پیشرانه دارای پودر آلومینیوم مشخص شده که ذرات در طول فرآیند احتراق معمولاً به صورت توده‌های بزرگ شامل ۱۰۰ ذره یا بیشتر با قطر هر ذره از ۲ تا ۴۰ میکرومتر تجمع می‌کنند و رفتار احتراقی این اجزا بستگی به متغیرهای مختلفی دارد که شامل: اندازه و شکل ذره، سطح اکسید، بایندر و محیط موج احتراق دارد. در مورد نقش اندازه ذرات، تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که هنگام استفاده از نانو ذرات آلومینیوم بجای میکرو ذرات، کلوخه‌ای شدن این ذرات کاهش می‌یابد. افزودن ذرات آلومینیوم با قطر میکرو، تأثیر مطلوبی بر روی ایمپالس ویژه و پایداری

احتراق می‌گذارد. لازم به ذکر است که تغییر در اندازه ذرات باید با توجه به پارامترهای مختلف دیگر صورت گیرد که یکی از آن‌ها میانگین اندازه ذرات AP موجود در پیشرانه است. چون میانگین اندازه ذرات کلوخه‌های آلومینیومی به میانگین اندازه ذرات AP، فشار و سرعت سوزش وابسته است و نمی‌توان بدون توجه به سایر پارامترها یک یا چند پارامتر را تغییر داد [۱۵-۱۲]. تئوری توده‌ای شدن ذرات جامد در طی گذشت زمان سیر تکاملی خود را طی کرد به طوری که در سال ۱۹۶۷ میلادی گلیک^۳ و همکارانش مدلی را در مورد سطح در حال سوختن پیشرانه جامد در میدان شتابدار ارائه دادند که حاکی از این بود که روی سطح سوزش حفره‌هایی تشکیل می‌شود و ذرات در انتهای حفره، توده‌ای می‌شوند و به صورت کره‌هایی در می‌آیند که سطح سوزش را افزایش می‌دهند. کره‌ها در معرض احتراق قرار می‌گیرند و در پی آن افزایش آزادسازی گرمای ناشی از سوختن کره-های توده‌ای شده، موجب افزایش سرعت سوزش موقتی می‌شود. هرکدام از این حفره‌ها و کره‌ها قطری دارند و نسبت قطر کره به قطر حفره ثابت در نظر گرفته می‌شود. محاسبه این مقدار و تأثیر آن در افزایش سرعت سوزش موقتی مشکل است [۱۶].

در سال ۱۹۶۹ میلادی ویلوبای^۴ و همکارانش سعی کردند تا فرضیه قبلی را بهبود ببخشند. همین‌طور شکل فرضیه قبل از جمله توده‌ای شدن گلبول‌ها در انتهای حفره‌ها را حفظ کردند. فاصله‌ی کره‌ها تا سطح سوزش و سرعت انتقال حرارت آن را تخمین زدند و یک مدل فیزیکی ارائه کردند که می‌گفت: گازهای حاصل از محصولات احتراق از زیر کره‌ها در جریان است و برای این مدل فیزیکی، فرمول‌هایی را نیز ارائه کردند [۱۷].

در سال ۱۹۷۲ آقای کراو^۵ این مدل را دوباره فرمول‌بندی کرد تا دوره-ی شبه تعادلی افزایش سرعت سوزش را توضیح دهد. اما این مدل شامل حفره‌دار شدن سطح یا توده‌ای شدن آلومینیوم نبود و نمی‌توانست اطلاعات دقیقی را برای احتراق پیشرانه در میدان شتابدار ارائه دهد، به عنوان مثال در تعیین پارامترهایی مانند افزایش سرعت سوزش و قطر عددی کره‌ها دچار مشکل می‌شد [۱۸].

در سال ۱۹۷۳ ایشی^۶ و همکارانش به طور واضح افزایش سرعت سوزش یک پیشرانه CMDB^۷ را با استفاده از مدل بهبود یافته گلیک بررسی کردند و اثر توزیع آلومینیوم و سرعت سوزش ایستا بر روی افزایش سرعت سوزش را تخمین زدند [۱۹]. در سال ۱۹۷۵ آقایان میتانی^۸ و نیوکا^۸ شتاب بحرانی و توسعه یافتن حفره‌ها را گزارش کردند. آن‌ها سعی کردند که پدیده موقتی افزایش سرعت سوزش (پدیده گذرا) را با استفاده از رشد حفره‌ها توضیح دهند. میتانی در

3-Willoughby
4-Crow
5-Ishii
6-Cast Modified double base
7-Mitani
8-Nioka

1-Burning rate augmentation
2-Agglomeration

کند. این به دلیل بیشتر بودن دانسیته مواد جامد درون توده نسبت به مواد آلی مذاب روی سطح سوزش است. متراکم شدن ذرات به سرعت برخورد آنها در سطح شتابدار بستگی دارد. سرعت برخورد ذرات جامد به زمان تأمین این ذرات برای برخورد و به هم چسبیدن و تشکیل توده بستگی دارد. با تشکیل حفره‌ها، سطح سوزش دست خوش تغییرات هندسی می‌شود و افزایش سطح نسبت به سطح صاف و بدون برآمدگی و فرورفتگی به وجود می‌آید، که این خود می‌تواند عامل افزایش سرعت سوزش موقتی یا لحظه‌ای و سرعت سوزش متوسط باشد. حفره‌های تشکیل شده بر روی سطح کلوخه، ذرات جامد را درون خود دارد. به مرور زمان کلوخه رشد می‌کند و اندازه آن بزرگ‌تر می‌شود و قطر حفره نیز افزایش می‌یابد به طوری که نسبت قطر حفره به قطر توده کلوخه‌ای درون آن ثابت می‌ماند [۲۱]. با استفاده از شبیه‌سازی بالستیک درونی موتور سوخت جامد این افزایش سرعت سوزش لحظه‌ای تخمین زده می‌شود [۲۹].

مکانیسم دیگری که برای افزایش سرعت سوزش ارائه شده، بازخورد گرمایی ناشی از تغییرات هندسی سطح سوزش است. توده درون حفره توسط گازهای احتراق به صورت شناور نگه داشته می‌شود و بازخورد گرمایی اضافی توسط توده از میان لایه‌های گازی تا سطح پیشرانه عبور کرده و دمای سطح و سرعت سوزش را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب، بازخورد گرمایی، مکانیسم حفره‌ای شدن و افزایش سطح و سرعت سوزش را پشتیبانی می‌کند. در سال ۱۹۶۹ ویلوبای و در سال ۱۹۷۲ کراو بازخورد گرمایی یک توده از ذرات فلزی درون ماتریس پیشرانه و تغییر شکل آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فرض کردند که گازهای احتراق خارج شده از زیر و نیروی اینرسی از بالا، به سطح توده فلزی درون حفره فشار وارد می‌کنند. این دو نیرو باعث ایجاد تعادل توده و همچنین تغییر شکل آن به صورت یک کره پهن شده می‌شوند. فاصله جدایش سطح توده و انتقال حرارت از طریق رسانایی ناشی از این توده بر روی سطح پیشرانه نیز محاسبه شد و برای یک پیشرانه خاص، افزایش سرعت سوزش متوسط ۱۶ درصدی را پیش بینی گردید. تأثیر رشد حفره‌ها بر روی سرعت سوزش به این صورت است که رشد حفره‌ها افزایش کلی را در سرعت سوزش در سرتاسر سطح به دنبال دارد. افزایش سرعت سوزش موضعی ناشی از حفره‌های کوچک و توده‌های درون آن است که نسبت به سطح بدون حفره، بازخورد گرمایی بیشتری را ایجاد می‌کند. طبق قانون سرعت سوزش $r = ap^n$ و وابستگی r_0 و ماکزیمم قطر حفره‌ها به شتاب و فشار را می‌توان پیش‌بینی کرد. افزایش فشار، افزایش سرعت سوزش را چه در حالت ایستا و چه در حالت شتاب‌دار به دنبال دارد. البته تأثیر فشار بر

سال ۱۹۷۶ یک دانسیته حفره ابتدایی را که بر روی رشد حفره‌ها و توده‌ها تأثیر می‌گذارد را بررسی و در قالب فرمول‌های ریاضی بیان کرد [۲۰].

اخیراً نیز دانشمندان مکانیسم کلوخه‌شدن ذرات آلومینیوم تحت موج شوک را بررسی و مورفولوژی، اندازه ذرات و فرآیند کلوخه‌شدن ذرات با اندازه‌های میکرو و نانو را با میکروسکوپ‌های الکترونی و طیف-سنجی اشعه ایکس مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۸].

۳- مبانی علمی تئوری

بر اساس تحقیقات انجام گرفته، شتاب با مکانیسم‌های متفاوتی بر روی بالستیک درونی راکت سوخت جامد تأثیر می‌گذارد. این مکانیسم‌ها عبارتند از: تأثیر بر روی کلوخه‌ای شدن و تشکیل حفره توسط ذرات جامد درون ماتریس پیشرانه، بازخورد گرمایی، اثر اینرسی روی هندسه کلوخه‌ها، افزایش سطح سوزش با تغییر هندسه کلوخه‌ها و انتقال حرارت ناشی از کلوخه‌ها به سطح در حال سوزش پیشرانه. کلوخه‌های ذرات فلزی و جامد روی سطح پیشرانه در حضور و عدم حضور شتاب تشکیل می‌شوند. اندازه کلوخه‌ها و ترکیب شیمیایی‌شان اساساً به وضعیت سوختن پیشرانه‌های کامپوزیت وابسته است. یک فاکتور مهم و تأثیرگذار بر روی کلوخه‌ها، شتابی است که در طول پرواز راکت روی آن اعمال می‌شود. زمانی که نیروی شتاب وجود داشته باشد، بعضی از کلوخه‌هایی که تشکیل شده‌اند، نمی‌توانند سطح سوزش را ترک کنند. این ذرات روی سطح نگه داشته می‌شوند و به کلوخه‌های در حال سوختن، که بر روی سطح تشکیل حفره می‌دهند، ملحق می‌شوند. در نتیجه، توزیع اندازه کلوخه‌های جدا شده در دو حالت شتاب‌دار و بدون شتاب به طور قابل ملاحظه‌ای تفاوت دارد. علاوه بر این، کلوخه‌ها بر اثر شتاب روی سطح سوزش تجمع می‌کنند و به صورت قطره‌های بزرگ درمی‌آیند. این قطرات بزرگ، رسوباتی را تشکیل می‌دهند که بعد از توقف عمل موتور، در محفظه‌ی احتراق باقی می‌مانند [۲۵-۲۲ و ۱].

برای جلوگیری از تشکیل چنین رسوباتی، چندین روش مورد مطالعه قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به فعال‌سازی آلومینیوم با استفاده از پوشش‌های کبالت، نیکل و پوشش‌های فلونوردار و همچنین تغییر در فرمولاسیون و اندازه ذرات و توزیع آنها در ماتریس پیشرانه و افزودن ذرات نیتروآمین، اشاره کرد [۲۷ و ۲۶].

از میان مکانیسم‌های اشاره شده، کلوخه‌ای شدن ذرات جامد درون ماتریس، اهمیت بیشتری در افزایش سرعت سوزش دارد. کلوخه‌ای شدن همواره با تشکیل حفره همراه است. به عبارت دیگر، متراکم شدن ذرات و تشکیل یک توده‌ی جامد بر روی سطحی که مواد مذاب آن را پوشانده است، می‌تواند حفره ایجاد

گازهای حاصل از احتراقی است که از زیر توده به سطح آن نیرو وارد می‌کنند. با تغییر شکل توده‌های آلومینیومی و پهن‌تر شدن آن‌ها، مقدار بازخورد گرمایی کاهش یافته و در نتیجه روند افزایش سرعت سوزش، کمتر می‌شود [۳۰ و ۳۱].

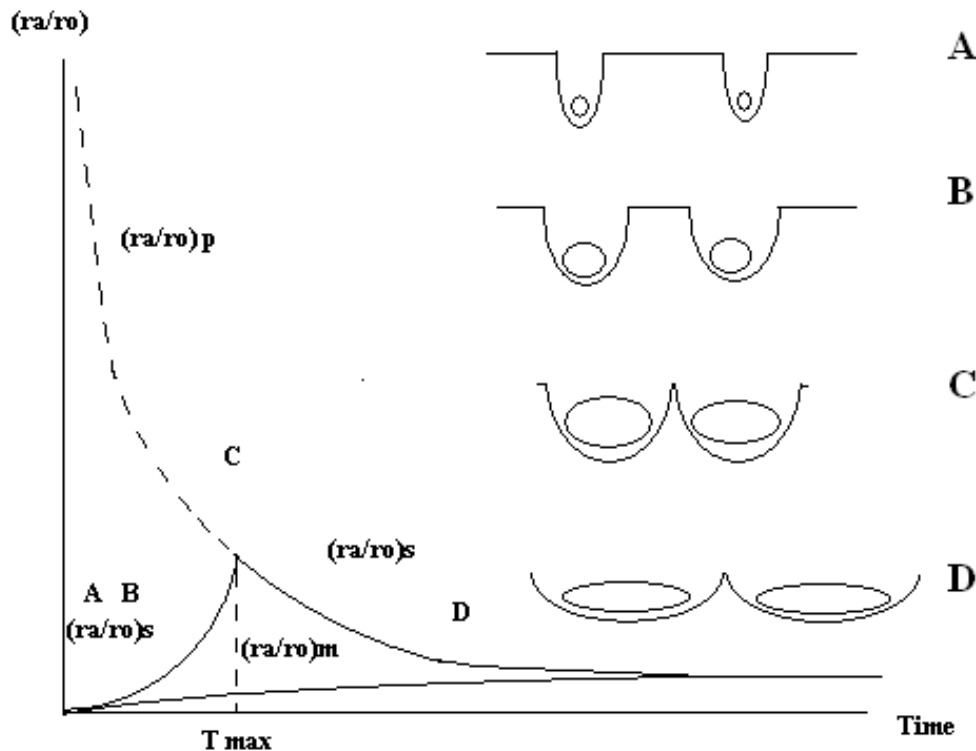
۴- نتایج آزمایشگاهی

پهن‌شدگی توده‌ها باعث می‌شود تا حفره‌ها رشد کرده و دهانه حفره‌ها باز شود. روند رشد کلوخه‌ها و باز شدن دهانه‌ی حفره‌ها در شکل ۱ به ترتیب با حروف از A تا D نشان داده شده و سرعت سوزش متناسب با هر مرحله از رشد این حفره‌ها را در زیر این حروف و روی شکل می‌توان مشاهده کرد. سرعت رشد حفره‌ها به سرعت برخورد ذرات آلومینیوم و به زمان تأمین آلومینیوم برای برخورد و توده‌ای شدن بستگی دارد. حفره‌ها آنقدر رشد می‌کنند تا اینکه با یکدیگر هم‌مرز شده و سرانجام در زمانی که آن را با t_{max} نشان می‌دهند، به هم می‌چسبند و تشکیل حفره‌های پیوسته را می‌دهند. با تشکیل حفره‌های پیوسته شیب افزایش سرعت سوزش متوسط کمتر می‌شود [۲۱-۱۸ و ۱۶].

روی مکانیسم‌های درگیر در افزایش سرعت سوزش در حالت شتاب-دار، کمی پیچیده است [۲۱-۱۶ و ۸].

۳-۱- عوامل مؤثر بر رشد حفرات

همان‌طور که قبلاً گفته شد، ذرات جامدی همچون آلومینیوم که بر روی سطح سوزش قرار گرفته‌اند می‌توانند به داخل مواد آلی مذاب روی سطح سوزش مهاجرت کنند. برای پی بردن به دینامیک ذرات آلومینیوم در نزدیکی سطح بعد از جدا شدن و همچنین برای بدست آوردن تخمینی از زمان احتراق ذرات و سرعت و ارتفاعشان از سطح در احتراق، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد، که منجر به مدل ساده‌ای می‌شود که در آن تصویری درباره‌ی چگونگی شناور بودن ذرات در لایه‌ی بایندری مذاب و اثر تنش‌های سطحی در مهاجرت ذرات آلومینیوم روی سطح و فاصله‌ی میانگین مهاجرت آن‌ها بدست می‌آید. این ذرات در اثر مهاجرت به هم می‌رسند و در ناحیه ته حفره به یکدیگر چسبیده و به صورت توده‌های کلوخه‌ای در می‌آیند. با افزودن ذرات آلومینیوم بیشتر، توده رشد کرده و بزرگ‌تر می‌شود. این توده‌ها هم‌زمان با بزرگ‌تر شدن تغییر شکل می‌دهند و به صورت کره‌های پهن در می‌آیند. دلیل این تغییر شکل، نیروهای اینرسی و فشار



شکل ۱- نمودار افزایش سرعت سوزش میانگین سطحی، در ناحیه حفره و متوسط نسبت به زمان رشد حفره [۲۱].

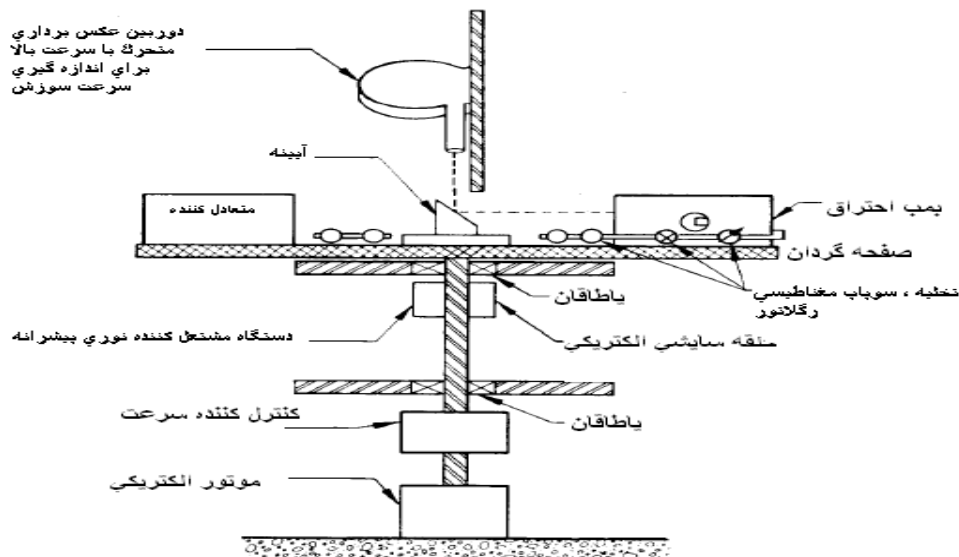
۵- دستگاه تصویر برداری و اندازه‌گیری سرعت سوزش پیشرانه تحت شتاب

دستگاهی که برای تصویر برداری از سطح در حال سوزش پیشرانه و تعیین سرعت سوزش در یک میدان شتابدار طراحی و در شکل ۲ نشان داده شده، دارای ۳ قسمت اصلی سانتریفیوژ، بمب احتراق و سیستم نوری می‌باشد. دیسک دوران کننده‌ی سانتریفیوژ با قطر حدود ۶۰ و ضخامت ورقه‌ی ۱/۲ سانتی‌متر، از جنس آلومینیوم است که به وسیله‌ی یک موتور الکتریکی با توان یک اسب بخار حرکت می‌کند. کپسول‌های تحت فشار و یک رگلاتور و شیر سلنوییدی روی دیسک سوار شده اند تا برای پیشرانه وضعیت تحت فشار را فراهم کنند. پنجره‌های شفاف برای عبور نور دور تا دور محفظه احتراق تعبیه شده است و جریانی از نیتروژن به طور یکنواخت و پیوسته از روی نمونه می‌گذرد تا از تجمع دود جلوی مجاری عبور نور جلوگیری کند. برای محاسبه نرخ سوزش، یک لامپ قوی بکار می‌رود که اجازه می‌دهد نورها از محفظه تست به سمت دستگاه ثبت کننده حرکت کنند. نرخ سوزش توسط سایه‌هایی که از سوخت نمونه به دستگاه فرستاده می‌شود، تعیین می‌گردد. محفظه احتراق تحت دو حالت شتاب مثبت و منفی می‌تواند مورد تست قرار گیرد. منظور از شتاب مثبت و منفی، جهت بردار شتاب است که می‌تواند نسبت به سطح سوزش تغییر کند. ماکزیمم سرعت این دستگاه ۲۰۰۰ دور در دقیقه است که شتاب ۹۰۰ g را در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر مرکز دیسک و در مرکز سوخت نمونه ایجاد می‌کند. برای اندازه‌گیری وابستگی نرخ سوزش به فشار از شیرها و کپسول‌های تحت فشار نیتروژن، تعبیه شده بر روی دیسک دوران کننده و یا کمپرسورهای قوی خارج از فضای دیسک، که قابلیت تزریق نیتروژن جهت بالا بردن فشار را دارد،

همان‌طور که قبلاً گفته شد شتاب، باعث افزایش سرعت سوزش می‌شود. این افزایش سرعت سوزش را به دو صورت سرعت سوزش در ناحیه حفره و سرعت سوزش میانگین روی سطح احتراق بررسی کرده و با استفاده از این دو پارامتر، افزایش سرعت سوزش متوسط را محاسبه می‌کنند.

افزایش سرعت سوزش در ناحیه حفره، با زیر نویس p ، افزایش سرعت سوزش میانگین روی سطح احتراق، با زیر نویس s و افزایش سرعت متوسط، با زیر نویس m مشخص می‌شود. به این دلیل که حساسیت پیشرانه‌های با سرعت سوزش مختلف در حالت ایستا، نسبت به شتاب یکسان نیست (بخش ۸)، افزایش سرعت سوزش را نسبت به سرعت سوزش در حالت ایستا بیان می‌کنند، مانند عبارت (Γ_a/Γ_0) که در آن Γ_a سرعت سوزش در حالت شتابدار و Γ_0 سرعت سوزش در حالت ایستا می‌باشد [۲۱].

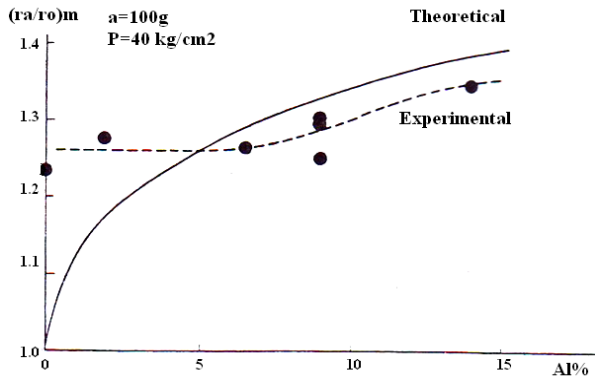
مثلاً در مورد یک پیشرانه خاص با نام PB05 شامل ۱۵ درصد $CTPB^1$ و ۷۶/۸ درصد AP و ۸/۲ درصد آلومینیوم که نمای فشار آن $n=0.283$ و سرعت سوزش ایستای آن ۷/۰۷ میلی‌متر بر ثانیه است، مشاهده شده که به علت رشد توده، افزایش سرعت سوزش در ناحیه حفره $(\Gamma_a/\Gamma_0)_p$ از ۱/۸ به ۱/۳ میلی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. اما سرعت سوزش میانگین سطحی $(\Gamma_a/\Gamma_0)_s$ به ماکزیمم مقدار خود (یعنی میلی‌متر بر ثانیه $1/45 = (\Gamma_a/\Gamma_0)_{max}$) در ۰/۴۴ ثانیه (t_{max}) می‌رسد. این زمانی است که حفره‌های مجزا به هم چسبیده و کل سطح سوزش را می‌پوشاند. افزایش سرعت سوزش متوسط $(\Gamma_a/\Gamma_0)_m$ با احتساب تغییرات $(\Gamma_a/\Gamma_0)_s$ و زمان سوختن t_b چیزی حدود ۱/۳۲ میلی‌متر بر ثانیه تخمین زده شده است [۲۱].



شکل ۲ - دستگاه سانتریفیوژ تصویربرداری و اندازه‌گیری سرعت سوزش تحت شتاب [۲۵].

موجود در لایه‌ی ابتدایی سطح سوزش را محاسبه کند [۲۱، ۲۳ و ۲۴ و ۲۵].

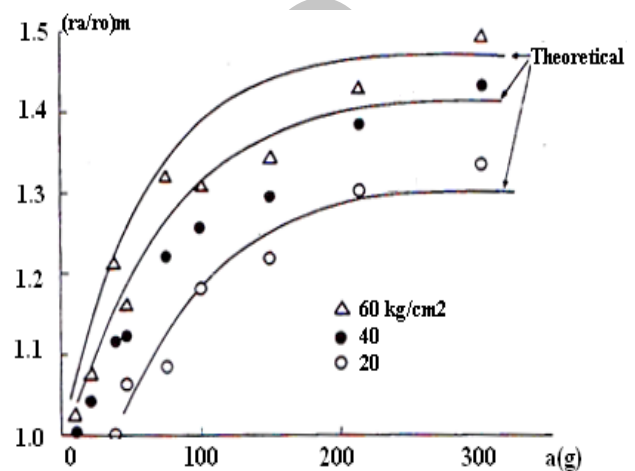
استفاده می‌شود. با استفاده از این سیستم می‌توان نمونه‌ها را بسته به شرایط از ۱ تا ۱۰۰ اتمسفر تحت فشار قرار داد [۲۵].



شکل ۴- تاثیر محتوای آلومینیوم پیشرانه بر افزایش سرعت سوزش پیشرانه تحت شتاب [۲۱].

۶- تأثیر فشار و شتاب بر افزایش سرعت سوزش

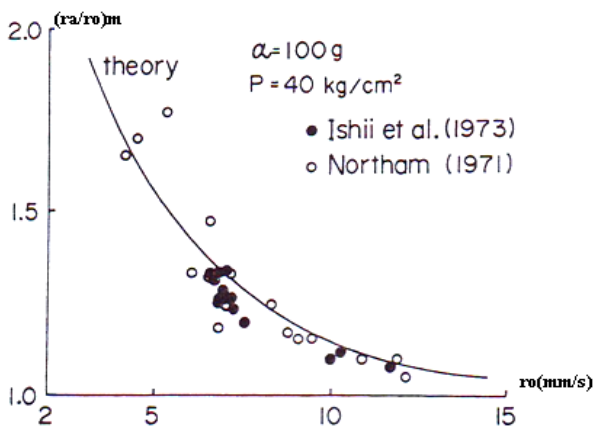
آنالیز پیشرانه PB05 نشان می‌دهد که با افزایش فشار و شتاب مطابق با قانون سرعت سوزش $(r = a p^n)$ ، سرعت سوزش متوسط افزایش می‌یابد (شکل ۳). برای شتاب‌های پایین افزایش سرعت سوزش متوسط $(r_a/r_o)_m$ تقریباً برابر یک می‌شود و این بدین معنی است که در شتاب‌های پایین، شتاب تأثیر کمی بر روی نرخ سوزش دارد [۲۱].



شکل ۳- تاثیر فشار و شتاب بر افزایش سرعت سوزش متوسط [۲۱].

۸- تأثیر سرعت سوزش ایستا بر افزایش سرعت سوزش تحت شتاب

r_o یا سرعت سوزش در حالت ایستا را می‌توان به عنوان مهم‌ترین فاکتور برای تأثیر شتاب روی سرعت سوزش به حساب آورد. به این صورت که پیشرانه‌های دارای r_o کم در میدان شتاب‌دار حساس‌تر هستند. هر چه r_o در یک شتاب ثابت کمتر باشد، افزایش سرعت سوزش بیشتر است (شکل ۵) [۲۱].



شکل ۵- تاثیر سرعت سوزش ایستا بر افزایش سرعت سوزش تحت شتاب [۲۱].

۷- تأثیر محتوای آلومینیوم بر افزایش سرعت سوزش تحت شتاب

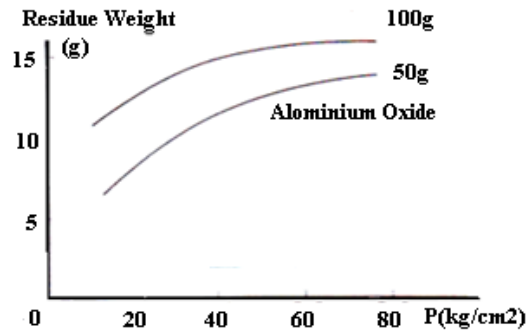
در پیشرانه‌هایی که محتوای آلومینیوم آن‌ها کم است، تأثیر شتاب بر افزایش سرعت سوزش نیز از نظر تئوری باید کمتر باشد. اما این نتیجه در عمل برای پیشرانه‌های حاوی AP صادق نیست. شکل ۴ نشان می‌دهد که نمودار تئوری افزایش سرعت سوزش با افزایش محتوای آلومینیوم روند صعودی دارد. در صورتی که داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد زمانی که محتوای آلومینیوم به صفر نزدیک شود، باز هم افزایش سرعت سوزش متوسط مشاهده می‌شود. گزارش‌هایی مبنی بر حفره‌دار شدن سطح سوزش پیشرانه‌های کامپوزیت فاقد آلومینیوم نیز وجود دارد. کلوخه‌های آلومینیوم متناسب با اندازه ذراتشان درون ماتریس پیشرانه تشکیل می‌شوند. روش مونت کارلو^۱ با استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند در هر مرحله از احتراق، جابه‌جایی سطح سوزش، تعداد و اندازه ذرات آلومینیوم

۹- اثر شتاب بر روی محصولات حاصل از احتراق

مطالعات تئوری بر روی محصولات حاصل از احتراق در دو شتاب ۱۰۰g و ۵۰g نشان می‌دهد که با افزایش شتاب، درصد اکسید آلومینیوم درون محصولات احتراق که به صورت پودر سفید رنگی

سرعت سوزش می‌شوند توضیح داده شده‌اند، تغییرات لحظه‌ای سرعت سوزش با زمان (که یک پدیده گذرا است) را می‌توان با پدیده کلوخه‌ای شدن و تشکیل حفره توضیح داد. زمان میانگین افزایش سرعت با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از موتور مقایسه شده و تأثیر فشار، شتاب، سرعت سوزش ایستا و مقدار آلومینیوم بکار رفته در فرمولاسیون بر روی سرعت سوزش پیشران‌های آلومینیوم‌دار پیش‌بینی شده است. نتایج بررسی‌ها برای تأثیر فشار و شتاب، حاکی از این است که با افزایش هر کدام از این عوامل سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد. در مورد افزایش محتوای آلومینیوم تا حدود ۲۰٪ نیز سرعت سوزش بالاتر خواهد رفت، البته این روال با عبور از مرز ۳۰ یا ۴۰٪ دیگر ادامه نخواهد داشت. با کاهش سرعت سوزش ایستا حساسیت پیشران به شتاب بیشتر می‌شود و سرعت سوزش آن افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش شتاب، درصد آلومینیوم اکسید در محصولات احتراق نیز بیشتر می‌شود، که این حالت حاکی از صورت گرفتن احتراق کامل‌تر در پیشرانه است. مقایسه تجزیه‌ای و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ذرات AP که در پیشران‌های کامپوزیت موجود هستند، نیز پتانسیل افزایش دادن سرعت سوزش در میدان شتابدار را دارند. اما این اثر توسط تأثیر ذرات Al در پیشران‌های حاوی Al زیاد، پوشانده می‌شود.

ظاهر می‌شوند، نیز افزایش می‌یابد. در این حالت، احتراق کامل صورت گرفته است. با افزایش فشار نیز این روند مشاهده می‌شود.



شکل ۶- نمودار افزایش درصد اکسید آلومینیوم با افزایش شتاب در فشارهای متفاوت [۲۱].

این نتایج تئوری با نتایج اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی نیز مطابقت دارد (شکل ۶). نتایج حاصل از اندازه‌گیری محتوای آلومینیوم در محصولات احتراق با روش تیتراسیون با EDTA و آنالیز اسپکترو شیمیایی آلومینیوم بعد از استخراج با دستگاه جذب اتمی، نیز این مطلب را تایید می‌کنند [۲۰].

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله، فرایندهایی که در اثر شتاب منجر به افزایش

مراجع

- [1] Rashkovskii S. A. "Effect of Acceleration on Agglomeration of Aluminum Particles During Combustion of Composite Solid Propellants."; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 43, No. 6, 654-663, 2007.
- [2] Montesano, J.; Behdinan, K.; Greatrix, D. R.; Fawaz, Z. "Internal chamber modeling of a solid rocket motor: Effects of coupled structural and acoustic oscillations on combustion."; *Journal of Sound and Vibration* 311, 20-38, 2008.
- [3] Gottlieb, J.J.; Greatrix, D.R. "Numerical study of the effects of longitudinal acceleration on solid rocket motor internal ballistics."; *Journal of Fluids Engineering* 114, 404-410, 1992.
- [4] Greatrix, D.R. "Parametric analysis of combined acceleration effects on solid propellant combustion."; *Canadian Aeronautics and Space Journal* 40, 68-73, 1994.
- [5] Greatrix, D.R. "Combined structural oscillation effects on solid rocket internal ballistics"; *AIAA/ASME/SAE/ASEE 35th Joint, Propulsion Conference*, Los Angeles, CA, USA, June, AIAA Paper No. 99-2509, 1999.
- [6] Solanki, N. "Effect of External Pulse on Solid Propellant Rocket Internal Ballistic"; degree of Master of Applied Science Graduate Department of Aerospace Studies University of Toronto, 2000.
- [7] Davenas, A. "Solid rocket Propulsion Technology."; Pergamon Press Ltd, Headington Hill, Oxford OX3 OBW, England, 1993.
- [8] Mitani, T. "Pit formation on the accelerated solid propellant combustion surface."; (to appear in A.I.A.A. J.), 1976.
- [9] Glotov, O. G. "Condensed Combustion Products of Aluminized Propellants. IV. Effect of the Nature of Nitramines on Aluminum Agglomeration and Combustion Efficiency"; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 42, No. 4, 436-449, 2006.
- [10] King, M. K. "Critical Review: Modeling of Acceleration Effects on Solid Propellant Combustion."; *AIAA Journal* Vol. 14, No. 1 z
- [11] Northam, G. B. "Effects of Composition on Acceleration Induced Burning-Rate Augmentation."; *AIAA Journal* Vol. 11, NO. 6, 1973.
- [12] Sutton, G.P.; Biblarz, O. *Rocket Propulsion Elements*, Wiley, New York, 2001.
- [13] Rashkovsky, S. A. "Statistical Simulation of Aluminum Agglomeration during Combustion of Heterogeneous Condensed Mixtures"; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 41, No. 2, 174-184, 2005.
- [14] De Luca L. T.; Galfetti, L.; Severini, F.; Meda, L.; Marra, G.; Vorozhtsov, A. B.; Sedoi, V. S.; Ba buk, V. A. "Burning of Nano-Aluminized Composite Rocket Propellants"; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 41, No. 6, 680-692, 2005.
- [15] Glotov, O. G.; Zhukov V. A. "Evolution of 100- μ m Aluminum Agglomerates and Initially Continuous Aluminum Particles in the Flame of a Model Solid Propellant.I. Experimental Approach"; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 44, No. 6, 662-670, 2008.
- [16] Glick, R.L.; Hodge, B.K.; Caveny, L.H.; "Effect of acceleration of the burning rate of composite propellants."; *AIAA*, 67-470, 1967.
- [17] Crowe, C. T.; Willoughby, P. G. "Effect of spin on the internal ballistics of a solid propellant motor."; *AIAA*, 66-523 1969.
- [18] Northam, G. B. "Effect of the acceleration vector transient burning rate of an aluminized solid propellant."; *Journal of Spacecraft and Rockets*, 8, 1133. 1971.

- [19] Ishii, S.; Niioka, T.; Mitai, T. "An analytical and experimental study for solid propellant combustion in an acceleration field."; *Combustion Science and Technology*, 8, 177, 1973.
- [20] Niioka, T.; Mitai, T.; Ishii, S. "Observation of the combustion surface by extinction tests of spinning solid propellant rocket motors."; *Proceedings of the Eleventh International Symposium of Space Technology and Science*, 77, 1975.
- [21] Mitani, T.; Niioka, T. "An analytical model of solid propellant combustion in an acceleration field."; *Combustion Science and Technology*, Vol 15, 107-114, 1977.
- [22] Margolin, A. D.; Krupkin, V. G. "Effect of overloads on the combustion rate of compositions containing up to 80% aluminum."; *Combust., Expl., Shock Waves*, 14, No. 3, 305-310, 1978.
- [23] Rashkovsky, S. A. "Metal agglomeration in solid propellants combustion: Part 1. Dynamical model of process."; *Combust. Sci. Technol.*, 139, 125-148, 1998.
- [24] Rashkovsky, S. A. "Metal agglomeration in solid propellants combustion: Part 2. Numerical experiments, *ibid*", 149-169.
- [25] Willoughby, P.G.; Baker, K. L. Hermsen, R.W. "Photographic study of solid propellant burning in an acceleration environment."; *Physical Sciences Laboratory*, 1033-1045, 1970.
- [26] Hahma, A.; Gany, A.; Palovuori, K. "Combustion of Activated Aluminum", *Combustion and Flame*, 145 464-480, 2006.
- [27] Glotov, O. G.; Yagodnikov, D. A.; Vorob'ev, V. S.; Zarko, V. E.; Simonenko, V. N. "Ignition, Combustion, and Agglomeration of Encapsulated Aluminum Particles in a Composite Solid Propellant. II. Experimental Studies of Agglomeration", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 43, No. 3, 320-333, 2007.
- [28] Yan, Z.X. Deng, J.; Luo, Z.M. "A comparison study of the agglomeration mechanism of Nano-and micrometer aluminum particles."; *Materials characterization* 61, 198-205, 2010.
- [29] Greatrix, D.R. "Transient Burning Rate Model for Solid Rocket Motor Internal Ballistic Simulations."; *International Journal of Aerospace Engineering* Volume 2008, Article ID 826070, 10 pages, 2008.
- [30] Wang, X.; Jackson, T.L.; Buckmaster, J. "Numerical simulation of the 3-dimensional combustion of aluminized heterogeneous propellants."; *Proceedings of the Combustion Institute* 31, 2055-2062, 2007.
- [31] Babuk, V. A.; Vasil'ev, A. N. Potekhin. "Experimental Investigation of Agglomeration during Combustion of Aluminized Solid Propellants in an Acceleration Field."; *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 45, No. 1, 32-39, 2009.
- [32] Changdong Sheng, Xianglin Shen. "Modelling of acoustic agglomeration processes using the direct simulation Monte Carlo method."; *Aerosol Science* 37, 16-36, 2006.

Archive of SID