

## بررسی سوزش فرسایشی در موتورهای پیشراانه جامد

معصومه ندیمی\*، سید هوشنگ خاندانی، علی اسدی

سازمان صنایع دفاع

! mndsmnds40@yahoo.com!

### چکیده

رخ دادن سوزش فرسایشی باعث انحراف نرخ سوزش از قانون رابرت می شود و می تواند تاثیرات مخربی روی عملکرد راکت داشته باشد. تا کنون مدل های گوناگونی برای پیش بینی این پدیده ارائه شده است و برای عینیت بخشیدن به آنها، روش های تجربی بسیاری نیز بر پایه سوزش دو بعدی یا حالت واقعی پیشنهاد گردیده است. در این روش ها با مقایسه ی حالتی که انتظار می رود سوزش فرسایشی رخ دهد و حالتی که بتوان عدم وقوع آن را استنباط کرد، به نتایج و پیش بینی هایی خواهند رسید. همچنین با بررسی پارامتر هایی از جمله ضخامت پیشراانه، می توان نرخ سوزش را اندازه گیری کرد. در این مقاله، عوامل مختلف موثر بر سوزش فرسایشی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه های کلیدی: پیشراانه- جامد- موتور- سوزش فرسایشی

### ۱- مقدمه

یکی از مهمترین پدیده های تأثیرگذار بر عملکرد راکت های سوخت جامد سوزش فرسایشی می باشد. در لحظات اولیه عملکرد موتورهای سوخت جامد، گازهای حاصل از احتراق با نرخ جرمی زیاد از مجاری باریک سوخت می گذرند در این لحظات به دلیل کوچکی سطح مقطع مجرای سوخت و بالا بودن نرخ جرمی گذرکننده از آن، سرعت عبور گازها فوق العاده زیاد خواهد بود. سرعت زیاد گازهای حاصل از احتراق، باعث انتقال حرارت قابل توجهی از شعله به سطح سوخت از طریق جابجایی شده و سطح را به شدت گرم میکند، در نتیجه نرخ تصعید و در نهایت نرخ سوزش سوخت جامد افزایش قابل ملاحظه ای خواهد یافت. این افزایش همان سوزش فرسایشی است. سوزش فرسایشی ناشی از افزایش شار حرارتی از فاز گاز به سطح پیشراانه می باشد. با افزایش شار انتقال گرما به سطح پیشراانه، پیشراانه به طور سریع و ناگهانی تبخیر می شود و میزان سوخت بیشتری در معرض اکسید کننده ی محفظه احتراق قرار می گیرد. سرعت سوزش می تواند بزرگتر ( فرسایش مثبت) یا کوچکتر از (فرسایش منفی) مقدار سرعت سوزش مبنای بدست آمده در غیاب یک جریان عرضی باشد.

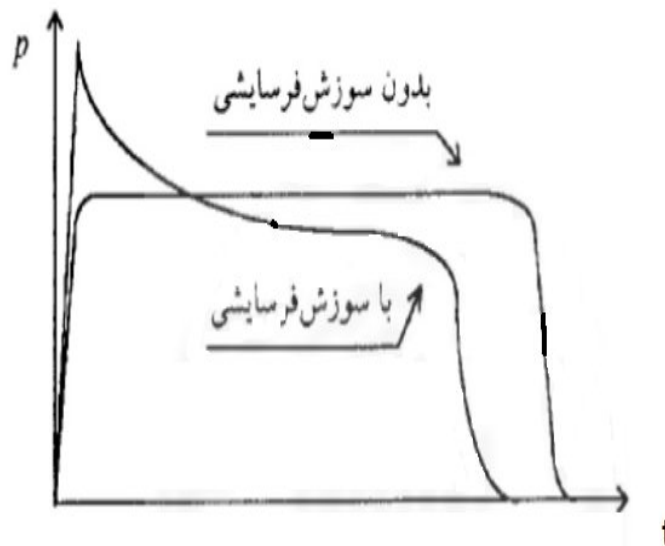
چندین تئوری برای بررسی اثر افزایش انتقال حرارت به سطح سوخت بعنوان تابعی از سرعت جریان عرضی در آن وجود دارد. این تئوری ها شامل انتقال حرارت از محفظه جریان ( استدلال می کند که میزان شار گرمایی در جریان مرکزی<sup>۱</sup> با افزایش سرعت جریان عرضی افزایش می یابد، بنابر این شار حرارتی عبوری از محفظه ی احتراق و در نتیجه حرارت اضافی ایجاد شده در سطح سوخت افزایش می یابد). "انحنای شعله"<sup>۲</sup> ( این تئوری درباره ی انحنایافتن انتشار شعله نهایی توسط جریان محفظه به سمت سطح پیشراانه و حرکت نقطه انتشار حرارت نزدیکتر به سطح، استدلال می نماید) و تلاطم. افزایش تلاطم و شکل گیری گردابه ها روی سطح پیشراانه در فاز گازی، ضریب رسانش و نفوذ گرما را به سطح سوخت افزایش می دهد. با این حال تمام مدل های توسعه یافته پیشراانه های کامپوزیتی موجود، عواملی مورفولوژی، سرعت عرضی، شعله های آتش، لبه و... را به صورت یک بعدی مطالعه و ارتباط آنها را بررسی کرده اند. آنچه مورد نیاز است یک مدل چند بعدی است که بتواند پارامترهای مختلف را شامل شود.

<sup>1</sup> : core flow

<sup>2</sup> : flow bending

برای پیشرانه های کامپوزیتی نشان داده شده است که فرسایش مثبت نتیجه ی افزایش رسانایی گرمایی و ضرایب نفوذ در جریان توسعه یافته ی متلاطم در مقیاس کوچک است. برای فرسایش منفی دو نظریه وجود دارد. در نظریه ی اول ذکر شده است که سرعت واکنش در حضور اغتشاشات بزرگ کاهش می یابد و نظریه ی دوم عدم تعادل بین ضرایب انتقال (ضریب نفوذ جرمی و حرارتی در دو جریان آرام و متلاطم) را دلیل فرسایش منفی می داند. برای بررسی پیشرانه های دو پایه ۱ کینگ مدل یک بعدی که شامل تاثیر خصوصیات انتقال ناشی از تلاطم است را بسط داد. [18]

کینگ مشاهده کرد هنگامی که ناحیه فیز به عنوان قسمتی از فاز گاز رفتار کند، نتایج تجربی و تئوری همخوانی دارند. لازم به ذکر است که مدل تک بعدی کینگ با تغییر مناسب در مکانیزم جنبشی، برای هر دو نوع پیشرانه کامپوزیتی و هموژن کاربرد دارد. واضح است که گسترش یک چهارچوب واحد برای هر دو نوع پیشرانه کامپوزیتی و هموژن، یک هدف مطلوب می باشد. در حال حاضر این نکته به خوبی شناخته شده است که راکت هایی با پیشرانه جامد در معرض برشهای وابسته به زمان و پاسخ منطقه احتراق به این جریان برشی می باشند. اختلالات جریانی که تولید می شوند می توانند منطقه اکوستیک درون محفظه را اصلاح نمایند و بدلیل اتصال دوطرفه، منجر به ناپایداریهای شدید شوند. با توجه به این که سوزش فرسایشی پدیده ای است که در صورت عدم پیش بینی غیر قابل کنترل است، کاملاً آشکار خواهد بود که پیش بینی نکردن و عدم جلوگیری از اثرات سوزش فرسایشی مشکلات عمده ای را به همراه خواهد داشت که مهمترین این اختلالات، بالا رفتن فشار درون محفظه موتور به صورتی نامطلوب و در اکثر موارد مخرب خواهد بود. علاوه بر این در بعضی موارد، از این پدیده به ظاهر مخرب استفاده هدف دار می شود. به عنوان مثال در بعضی از راکت ها برای مقاصد مختلف به شتاب اولیه ی زیادی نیاز می باشد، به همین دلیل از یک بوستر جانبی استفاده می شود. اگر بتوان سوزش فرسایشی را پیش بینی نمود می توان بدون اضافه نمودن سیستم های فرعی، از موتور اصلی در لحظات اولیه به عنوان بوستر استفاده نمود. اثر سوزش فرسایشی در موتورهای پیشرانه جامد در شکل ۱ قابل مشاهده است.



!!

شکل ۱- نمودار شماتیکی اثر سوزش فرسایشی در موتورهای سوخت جامد

<sup>1</sup> : double-based

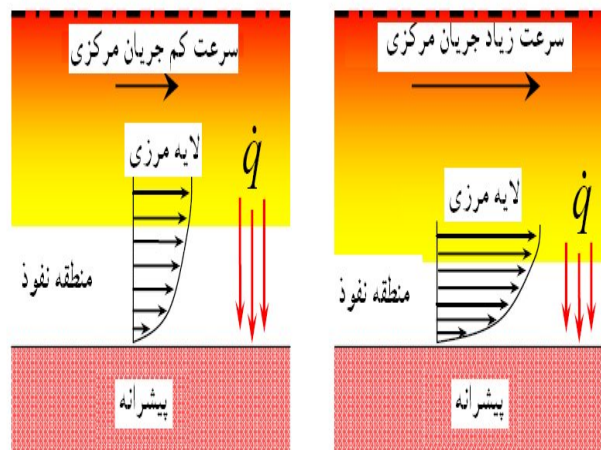
## ۲- تئوری های سوزش فرسایشی

به طور کلی محققان بر این باورند که افزایش انتقال نرخ حرارت به سطح پیشرانه از عوامل اصلی ایجاد سوزش فرسایشی است. نظریه های متفاوتی در این راستا ارائه شده است که سعی در توصیف این پدیده دارند و عمده ی آنها بر تغییر ضخامت لایه ی مرزی بین جریان مرکزی<sup>۱</sup> و سطح پیشرانه تاکید دارند. گذشته از تفاوت های موجود در مدل های ارائه شده توسط محققان، همگی بیان می کنند که افزایش دمای سطح پیشرانه ناشی از شدت انتقال گرمای منتقل شده به آن، میزان تبخیر و سوزش سطح را به سرعت افزایش می دهد و میزان بیشتری از سوخت و اکسنده وارد واکنش شده لذا افزایش میزان حرارت تولید شده پیوسته ادامه پیدا می کند.

بسیاری از این تئوری ها این افزایش انتقال حرارت را بررسی کرده اند و بر این دو نکته اشاره می کنند:

۱- افزایش سرعت جریان مرکزی ضخامت لایه مرزی را کم کرده و میزان انتقال حرارت در آن افزایش می یابد. این پدیده در شکل ۲ قابل مشاهده است.

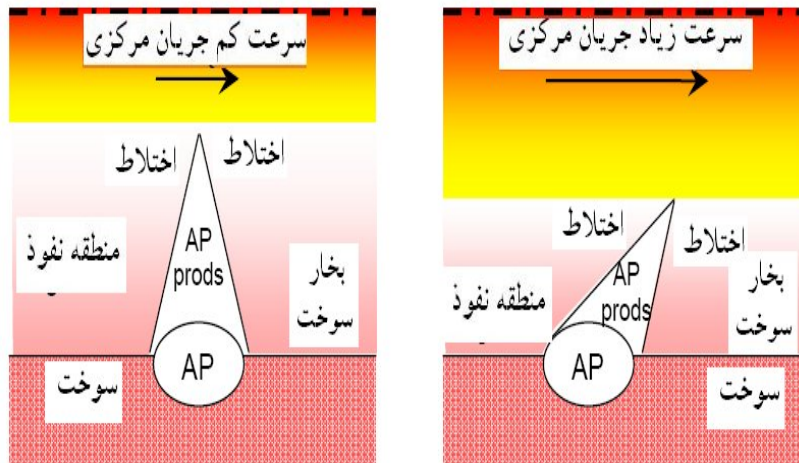
۲- اغتشاش و تغییر ایجاد شده در ناحیه ی نفوذ در سطح پیشرانه باعث افزایش محلی<sup>۲</sup> سوزش در سطح سوخت خواهد شد. در شکل ۳ و ۴ نمایشی از این رخ داد قابل مشاهده است.



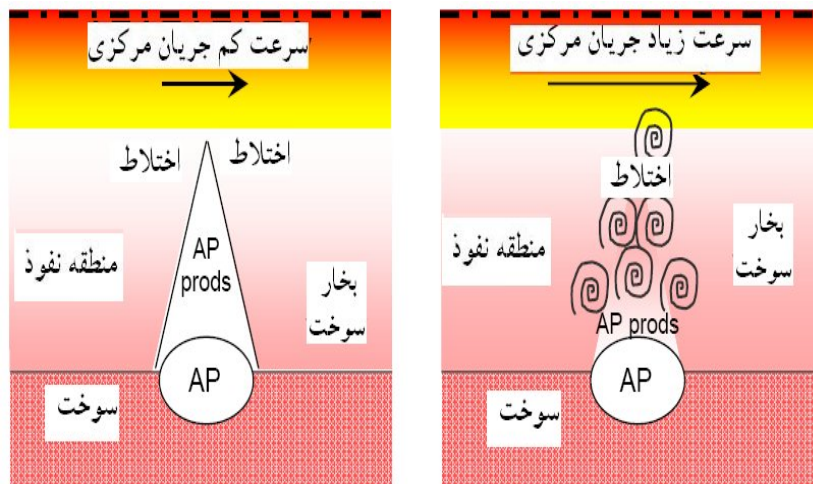
شکل ۲- افزایش انتقال حرارت به دلیل کاهش لایه مرزی

<sup>۱</sup>Core Flow

<sup>۲</sup>Local



شکل ۳- افزایش انتقال حرارت به دلیل تغییر منطقه نفوذ



شکل ۴- افزایش انتقال حرارت به دلیل اغتشاش

مهمترین موضوع صحت تاثیر هر یک از این دو نظریه یا تلفیق آنها می باشد.

در مجموع روش های نظری ارائه شده برای پیش بینی و تخمین سوزش فرسایشی به سه گروه کلی تقسیم بندی می شوند. این طبق بندی بر اساس نظریه های مختلف انجام شده است [۸].

۱. نظریه انتقال حرارت که واکنش شیمیایی و ساختار شعله را مد نظر نمی گیرد.

۲. نظریه شعله که بر اساس مکانیزم احتراق یا ساختار شعله بیان می شود.

۳. بررسی هم زمان حرارتی و ایرودینامیکی در لایه مرزی با وجود واکنش های شیمیایی.

بارزترین نظریه در شاخه انتقال حرارت، تئوری لنیر - روبیلارد<sup>۱</sup> [۱۳] می باشد. بصورت خلاصه می توان این نظریه را به این شکل بیان نمود که سوزش فرسایشی با ضریب انتقال حرارت جابجایی به سطح سوخت متناسب می باشد. شایان ذکر است که نظریه انتقال حرارت، بسته به منبع حرارتی به دو شکل انجام می گیرد. اول اینکه منبع حرارتی، دمای گازهای گذرکننده از سطح سوخت فرض می شوند دوم اینکه حرارت انتقالی به سطح سوخت، ناشی از واکنش های شیمیایی درون ناحیه سوزش با دمای شعله سوخت فرض می شود. بنابر اثر دمای گازهای جانبی بر سوزش فرسایشی به این نتیجه می رسیم که نظریه اول

<sup>۱</sup>!! Lenior&Robilard

معتبر نبوده و تئوری لنیر - روبیلارد نیز به همین سبب تخمین های درستی را ارائه نمی دهد اما روش دوم روشی است که در این تحقیق از آن استفاده شده است و صحت عملکرد آن به اثبات رسیده است. اولین کارهایی که بر اساس نظریه شعله پایه گذاری شده اند، توسط واندنکروکوو<sup>۱</sup> [۱۴] وضع شده اند. این محقق ساختار شعله و مکانیزم تجزیه فاز جامد سوخت های دو پایه را مدنظر گرفت. کینگ [۱۵] مدلی را برای سوزش فرسایشی سوخت های مرکب ارائه داد، نظریه ایشان بر اساس کج شدن، شعله را به سطح سوخت نزدیک تر می کند. کم شدن فاصله بین سطح سوخت و ناحیه آزاد سازی گرما، گرمای بازگشتی به سطح را افزایش داده و نرخ سوزش را بالا می برد. البته کج شدن شعله مخصوص سوخت های مرکب بوده و در خصوص سوخت های دوپایه، لایه واکنشی در اثر جریان های جانبی کوچکتر می شود.

سوزش فرسایشی بر اساس روش لایه مرزی اولین بار توسط کرنر<sup>۲</sup> [۱۶] ارائه شد، در این روش نظریه پرانتل - کارمن<sup>۳</sup> برای بیان میدان جریان استفاده شده است. تسوجی<sup>۴</sup> [۱۷]، رازدان [۱۸]، سوخت تحلیل نمودند گرچه باید ذکر شود که جریان در حالت وجود سوزش فرسایشی کاملاً آشفته می باشد. لنگل<sup>۵</sup> [۲۰] حل انتگرانی لایه مرزی آشفته به همراه نظریه پخش شعله را برای پیشرفت مدل خود در نظر گرفت. بدینی<sup>۶</sup> [۲۱] مدل چند معادله ای آشفته را برای حل مسئله لایه مرزی استفاده نمود. او احتراق سوخت های جامد همگن ( دوپایه ) را در نظر گرفت. گرچه تأکید فراوانی بر صحت انواع روش های مختلف در حل سوزش فرسایشی شده است، اما واقع بینانه ترین تحلیل، واکنش های متقابل بین ناحیه شعله و میدان جریان می باشد.

### ۳- اثر پارامترهای مختلف بر سوزش فرسایشی

ایجاد و تشدید سوزش فرسایشی متأثر از پارامترهای مختلفی می باشد. در ادامه اکثر پارامترهای شناخته شده که امکان ایجاد یا تشدید سوزش فرسایشی را دارند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. [۱]

#### ۳-۱- سرعت آستانه ای

بعضی از محققین [۲۲-۳۱] اعلام نموده اند که سوزش فرسایشی زمانی واقع می شود که سرعت گازهای جانبی از مقداری آستانه ای<sup>۷</sup> فراتر رود. نتایجی که توسط زوکرو<sup>۸</sup> [۲۴] در این رابطه به دست آمده نشان می دهد که هرگاه تعادلی بین کاهش انتقال حرارت بر اثر افزودن جرم به لایه مرزی و افزایش انتقال حرارت بر اثر جابجایی ایجاد شود سوزش در سرعت آستانه ای واقع خواهد شد. طبق مشاهدات کريدلر<sup>۹</sup> [۲۵] اگر دانسیته تابع فشار باشد ( جریان تراکم پذیر ) مقدار شار جرمی آستانه ای به صورت خطی با افزایش فشار، افزایش می یابد. همچنین وابستگی سرعت آستانه ای به فشار توسط زوکرو نشان داده شده است. شایان ذکر است که سرعت آستانه ای با افزایش فشار کاهش می یابد. در راستای مشاهدات زوکرو، نتایج به دست آمده توسط کمث<sup>۱۰</sup> [۳۱] نشان داد که با افزایش فشار، عدد ماخ آستانه ای کاهش خواهد یافت. مشاهدات آمبلیا و سامسو<sup>۱۱</sup> [۳۰]

<sup>۱</sup>! Vandenkerckhove

<sup>۲</sup>!! Corner

<sup>۳</sup>!! Prandtl& Karman

<sup>۴</sup>!! Tsuji

<sup>۵</sup>!! Lengelle

<sup>۶</sup>!! Beddini

<sup>۷</sup>!! Uth

<sup>۸</sup>!! Zucrow

<sup>۹</sup>! Kriedler

<sup>۱۰</sup>!! Kamath

<sup>۱۱</sup>!! Samsev&Umblia

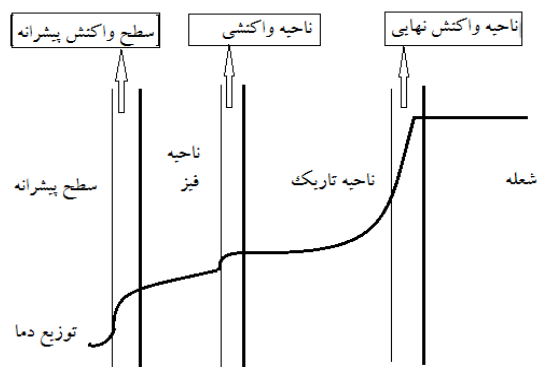
نشان داد که با افزایش دمای جریان جانبی گذر کننده از روی سوخت، سرعت آستانه ای کاهش خواهد یافت. سرعت آستانه ای را نمی توان به طرق تحلیلی بدست آورد و عموماً از تجربه به دست می آید. ضمناً به این دلیل که سرعت گازها از روابط تقریبی بدست می آیند، خطا مقدار زیادی را به خود اختصاص خواهد داد. اگر بتوان سرعت گازها را نیز از روش تجربی بدست آورد، بهبود بیشتری در اندازه گیری مقدار سرعت آستانه ای بوجود خواهد آمد. شایان ذکر است که در سوخت های دو پایه، سرعت آستانه ای آنقدر کم است که در مقایسه با سوخت های مرکب قابل اغماض می باشد چرا که سوخت دو پایه نسبت به سوخت های مرکب از حساسیت خیلی بیشتری به سوزش فرسایشی برخوردار می باشند.

### ۲-۳- سوزش منفی

در تحقیقات مربوط به سوخت های مرکب مشاهده شده که نرخ سوزش سوخت های مرکب به کمتر از سرعت آستانه ای کاهش می یابد. این پدیده توسط نتایج تجربی زوکرو [۳۴] به اثبات رسیده است. تزریق جرم به داخل لایه مرزی و کاهش انتقال حرارت از شعله به سطح سوخت، عامل ایجاد این پدیده عنوان شده است. البته این پدیده در مورد سوخت های دوپایه به ندرت و بسیار خفیف مشاهده شده است [۲].

### ۳-۳- اثر سرعت گازهای جانبی و فشار

مشاهده شده که نرخ سوزش سوخت های جامد با افزایش فشار و سرعت گازهای جانبی افزایش می یابد [۲۵-۲۸]. افزایش نرخ سوزش پیشرانه بر اثر عبور جریان های جانبی، به سبب افزایش انتقال حرارت از نواحی سوزش به سطح پیشرانه می باشد. در صورتی که جریان وجود نداشته باشد، انتقال گرما تنها به صورت هدایتی انجام گرفته و بسته به خصوصیات مولکولی گاز های حاصل از احتراق کم یا زیاد خواهد بود. همچنین گرمایی از شعله نهایی به داخل ناحیه فیز (شکل ۵) نفوذ نمی کند اما در صورتیکه در ناحیه سوزش جریان جانبی وجود داشته باشد، انتقال حرارت به وسط پیشرانه، هم از طریق هدایتی هم از طریق جابه جایی صورت می گیرد که در اکثر موارد، انتقال حرارت جابه جایی چندین برابر انتقال حرارت هدایتی است. انتقال حرارت جابه جایی ناشی از آشفتگی درون جریان است که باعث انتقال ذرات پر انرژی از نواحی سوزش به سطح پیشرانه شده و نواحی احتراقی را به سطح پیشرانه نزدیک تر می کند. این اثرات گرمایی انتقالی به سطح پیشرانه را افزایش داده و فرآیند احتراق را سرعت بیشتری می بخشد که در نتیجه نرخ سوزش پیشرانه افزایش خواهد یافت.



شکل ۵- ساختار سوزشی پیشرانه ی دو پایه (همگن)

در شارهای جرمی بیش از شار آستانه ای، سوزش فرسایشی در فشارهای پایین بروز بیشتری نسبت به فشارهای بالا دارد.

### ۳-۴- اثر نرخ سوزش سوخت

در نتایج آزمایشگاهی اثبات شده که سوخت های با نرخ سوزش کمتر نسبت به سوخت هایی که نرخ سوزش بیشتری دارند به پدیده سوزش فرسایشی حساس تر می باشند [۲۲، ۲۴، ۳۲، ۳۳]. تحقیقات رازدان و کور<sup>۱</sup> [۳۳] در این رابطه نشان دهنده این واقعیت است که برای یک سوخت معین با تنها اختلاف در نرخ سوزش، نرخ سوزش فرسایشی متفاوت خواهد بود. نظریه ای که گرین<sup>۲</sup> [۲۲] در این رابطه ارائه داد به نحوه تشکیل لایه مرزی روی سطح سوخت بازمی گردد بدین صورت که لایه مرزی تشکیل شده روی ناحیه سوزش سوخت های جامد با نرخ سوزش کمتر، با شرایط ثابت بودن سرعت گازهای جانبی، قطورتر از حالت با نرخ سوزش بیشتر می باشد. ضخامت لایه مرزی گرادیان دمای داخل آن را کاهش داده و گرمای بازگشتی به سطح سوخت را کاهش می دهد که در نتیجه سوزش فرسایشی کمتری را خواهیم داشت.

### ۳-۵- اثر دمای اولیه سوخت

سوزش فرسایشی با کاهش دمای اولیه سوزش افزایش می یابد [۲۴، ۳۳]. بر اثر کاهش دمای اولیه سوخت، نرخ سوزش عادی کاهش خواهد یافت، از طرفی به دلیل بروز بیشتر سوزش فرسایشی در سوخت های با نرخ سوزش کمتر، با کاهش دمای اولیه سوخت، سوزش فرسایشی بروز بیشتری خواهد داشت. همچنین با افزایش دمای اولیه سوخت، سوزش فرسایشی بروز کمتری خواهد داشت.

### ۳-۶- اثر دمای گازهای جانبی

در اکثر موارد، دیده شده که در فشار و سرعت معین گازهای جانبی، سوزش فرسایشی مستقل از دمای گازهای جانبی می باشد [۲۳، ۳۰، ۳۲، ۳۴]. کینگ [۳۲] در طی آزمایش های متعددی برای دماهای مختلف، این حقیقت را به اثبات رسانیده است. اسبورن و بوریک<sup>۱</sup> [۳۴] نیز این مطلب را برای سوخت های دو پایه تصدیق نموده اند. این آزمایش ها در دماهای ۲۵۹۴ تا ۳۷۶۷ درجه کلون انجام شده اند. در توجیه این مطلب می توان اضافه نمود که اکثر حرارت انتقالی به سطح سوخت ناشی از گرمای ایجاد شده بر اثر سوزش خود سوخت با دمای شعله آن می باشد چرا که دمای شعله خود سوخت، تأثیر بسزایی بر نرخ سوزش سوخت در هر حال (با و بدون جریان) دارد و جریان های جانبی تنها باعث بازگشت بیشتر گرما از شعله نهایی خود سوخت به سطح آن شده و نرخ سوزش را افزایش می دهند. در نهایت می توان نتیجه گرفت که دمای گازهای گذرکننده، اثر چندانی در تعیین نرخ سوزش ندارند. پس مدل هایی که بر اساس افزایش انتقال حرارت به سطح سوخت، تنها بر اثر عبور گازهای داغ پایه گذاری شده اند (مدل لنیر-روبیلارد) [۱۳] نادرست بوده و با جواب های علمی سنخیت ندارند.

### ۳-۷- اثر اضافه نمودن فلز به سوخت

تحقیقات متعددی در ارتباط با اثر افزایش فلزات مختلف به سوخت انجام شده که عمدتاً اثر افزایش آلومینیوم بوده و اثر کمی را بر سوزش فرسایشی سوخت از خود نشان داده است [۳۵، ۳۶]. البته افزایش ذرات آلومینیوم در سوخت باعث کم شدن ناپایداری احتراق و در بعضی موارد افزایش ایمپالس ویژه سوخت خواهد شد.

<sup>۱</sup>!! Razdan&Kuo

<sup>۲</sup>! Green

### ۳-۸- اثر ترکیبات تشکیل دهنده گاز جریان آزاد

در آزمایشات سوزش فرسایشی، رایج است که مقداری سوخت را درون محفظه ای به نام مولدگاز<sup>۲</sup> قرار داده و برای ایجاد گاز گذرکننده از روی سوخت نمونه تحت آزمایش، مورد استفاده قرار می دهند. واضح است که باید اثر ترکیبات گازی خارج شده از مولد های گاز را بر سوزش فرسایشی بررسی نمود. بدین منظور وایلز<sup>۳</sup> [۳۷] بر پایه این مهم تحقیقات لازم را انجام داد و در مولدگازهای خود سه نوع سوخت استفاده نمود و عملاً مشاهده کرد که نوع سوخت مولد گاز اثری بر سوزش فرسایشی ندارد. همچنین اسبورن و بوریک [۳۴] نتایج فوق را برای سوخت های دو پایه به اثبات رساندند.

### ۳-۹- اثر تراکم پذیری

تعدادی از محققین عدد ماخ را تغییر داده و اثر آنرا بر سوزش فرسایشی مطالعه نموده اند و به این نتیجه رسیده اند که اکثر این اثرات خود را در سرعت گازهای جانبی نشان می دهند [۲۶، ۳۱، ۳۷-۳۹، ۴۰].

### ۳-۱۰- اثر اندازه موتور

مقایسه هایی که بین موتورهای آزمایشگاهی کوچک<sup>۴</sup> و موتورهای واقعی انجام شده، نشان می دهند که در موتورهای کوچک، سوزش فرسایشی بروز فوق العاده بیشتری دارد. بر اساس مشاهدات سادرهولم<sup>۵</sup> [۲۶]، مقدار سوزش فرسایشی با عکس قطر هیدرولیکی سوراخ داخلی گرین<sup>۱</sup> متناسب است. نتایج نشان دهنده این واقعیت هستند که با کاهش قطر سوخت، نرخ سوزش فرسایشی، افزایش قابل ملاحظه ای می یابد این افزایش به سبب کاهش قطر و رفتار لایه مرزی روی سطح سوخت می باشد. جهت تأکید بر اثر کاهش قطر، نتایجی برای نسبت تشدید نرخ سوزش در شرایط سرعت ثابت جریان و قطر متغیر، توسط رازدان و کوو [۶] ارائه شده اند. نتایج ثابت نگه داشتن سرعت گازهای جانبی و کوچک نمودن قطر داخلی سوخت نشان می دهد که کاهش قطر سوخت، موتور را نسبت به سوزش فرسایشی فوق العاده حساس تر می نماید. مطلب قابل توجه در اینجا اختلاف در نحوه تشکیل لایه مرزی (توسعه یافته و یا در حال توسعه) درون کانال با قطرهای مختلف است.

### ۳-۱۱- اثر غیر یکنواختی در سوراخ سوخت

بر طبق مشاهدات رازدان و کوو شکل طولی کانال داخلی سوخت در تعیین مقدار سوزش فرسایشی بسیار مؤثر است بطوریکه با واگرا نمودن کانال داخلی سوخت می توان سوزش فرسایشی را به شدت کاهش داد. چرا که با واگرا نمودن سوراخ داخلی، سرعت محلی گازها کم شده و بدنبال آن، سوزش فرسایشی کاهش خواهد یافت.

### ۳-۱۲- اثر خواص سوخت

<sup>۱</sup>! Burik& Osborn

<sup>۲</sup>!! Gas Generator

<sup>۳</sup>! Viles

<sup>۴</sup>!! Subscale

<sup>۵</sup>!! Saderholm



سوزش فرسایشی به شدت تحت تأثیر نوع ترکیبات<sup>۲</sup> استفاده شده در سوخت های مرکب است [۱۰، ۳۶]. زوکرو [۲۴] به این نتیجه رسید که نوع ترکیبات بکار رفته در سوخت، سرعت آستانه ای را مورد تغییر و تحول قرار می دهد. قابل توجه است که نتایج نشان دهنده این واقعیت می باشند که سوخت های دوپایه نسبت به سوخت های مرکب به سوزش فرسایشی حساس ترند تا حدی که سوخت های دوپایه با نرخ سوزش بیشتر نسبت به سوخت های مرکب با نرخ سوزش کمتر، به سوزش فرسایشی حساس تر می باشند.

#### ۴- روش های شبیه سازی سوزش فرسایشی

همانطور که قبلاً اشاره شد، روش های شبیه سازی پدیده سوزش فرسایشی به سه دسته تقسیم بندی می شوند. البته روش های دیگری نیز توسط افراد مختلف ارائه شده اند که این روش ها یا به نحوی در قالب این سه روش می گنجد و یا اینکه روش های آنچنان معتبری نیستند که بتوان از آنها نام برد. همچنین مدل هایی نیز وجود دارند که ترکیبی از روش های ارائه شده می باشند.

پژوهشگران متعددی از مدل های ارائه شده استفاده نموده اند تا قادر به شبیه سازی پدیده سوزش فرسایشی در موتورهای پیشراجه جامد باشند. هر کدام از مدل های ارائه شده مزایا و معایب خاص خود را دارد و بطور مشخص نمی توان به خوبی و بدی مطلق مدلی از این مدل ها رأی قطعی داد [۱]. شایان ذکر است که بعضی از این مدل ها برای بعضی از پیشراجه ها نسبت به مدل های دیگر کارآمدتر و ره گشایتر می باشند. اما در مجموع هر سه روش تقریباً از ارزش برابری برخوردار می باشند [۱]. همانطور که در بخش قبل عنوان شد، به صورت مطلق نمی توان اظهار نظر کرد که چه مدلی بهترین و کامل ترین روش برای مدل سازی سوزش فرسایشی است، اما اگر بحث را بر سوخت معینی متمرکز کنیم شاید بتوان روش بهتری را از روش های دیگر برای آن نمونه خاص انتخاب نمود. متداول ترین روشی که در حال حاضر برای انواع پیشراجه ها بکار می رود، روش تحلیل لایه مرزی آشفته روی سطح سوزش می باشد. البته تحلیل به همراه در نظر گرفتن معادلات بقای جرم، مومنتوم، و انرژی انجام می گیرد که پس از حل جریان، ضرایب انتقال را تصحیح نموده و نرخ بازگشت حرارت از شعله به سطح پیشراجه محاسبه می شود و در نهایت نرخ سوزش تخمین زده می شود. اما واضح ترین ایرادی که این روش دارد مشکلات عدیده ای است که سر راه حل معادلات حاکم وجود دارند. به همین سبب ابتدا سعی شده تا مدل ساده ای برای وارد نمودن آشفتگی به معادلات اضافه شود. مدل استفاده شده، مدلی است صفر معادله ای که در این مدل اثرات دمش گاز از سطح پیشراجه نیز در نظر گرفته شده است [۲] سپس معادلات جریان را به دو بعد تعمیم داده و از مدل دو معادله ای  $k - \epsilon$  برای وارد نمودن آشفتگی استفاده شده است.

با بازبینی مطالعات و مشاهدات مختلف [۱] و بررسی اثر پارامترهای متفاوت بر سوزش فرسایشی می توان به این نتیجه رسید که مهم ترین پارامترهای مؤثر بر این پدیده، فشار و سرعت گازهای جانبی می باشند. نتایج بدست آمده از روش حاضر همخوانی قابل قبولی را با نتایج تجربی نشان می دهد.

#### ۵- روش های کنترل سوزش فرسایشی

##### ۵-۱- واگرایی کانال داخلی گرین

<sup>۱</sup>!! Port

<sup>۲</sup>!! Binders

بنابر دانشی که تاکنون به دست آمده است، سوزش فرسایشی زمانی بروز می کند که سرعت گازهای جانبی، از مقدار آستانه ای بگذرد و یا به عبارتی قبل از سرعت آستانه های و در سرعت های کم جریان عرضی، اثر سوزش فرسایشی قابل اغماض می باشد. با فرض ثابت بودن مقطع کانال داخلی گرین، دبی جرمی گازهای ناشی از احتراق سطح پیشرانه در طول سوخت افزایش یافته و در انتهای سوخت به حداکثر مقدار خود می رسد. در نتیجه این فرآیند و به دلیل ثابت بودن سطح مقطع کانال عبور گازها، سرعت از سر تا انتهای سوخت مدام در حال افزایش است که امکان رسیدن و حتی گذشتن سرعت از مقدار آستانه ای وجود خواهد داشت. گذشتن از سرعت آستانه ای به معنای وقوع سوزش فرسایشی است. برای کنترل سوزش فرسایشی کافی است تدبیری اندیشیده شود که سرعت گازهای عبوری از مقدار آستانه ای عدول نکند. شایان ذکر است، همانطور که قبلاً عنوان شد در سوخت های جامد دوپایه می توان گفت که سرعت آستانه ای مفهوم عملی ندارد، اما در این نوع سوخت ها سوزش فرسایشی به سرعت جریان، حساسیت فراوانی دارد، به صورتی که با افزایش سرعت، سوزش فرسایشی به شدت افزایش می یابد. در این حالت روشی که برای جلوگیری از اثرات شدید سوزش فرسایشی توصیه می شود واگرا نمودن کانال داخلی سوخت جامد است ( شکل ۶).



شکل ۶- پیشرانه جامد با کانال واگرا شده

#### ۵-۲- استفاده از سوخت با نرخ سوزش بالاتر

روش دیگری که برای کنترل سوزش فرسایشی توصیه می شود، استفاده از سوخت های با نرخ سوزش بالاتر است. چرا که هر قدر نرخ سوزش سوخت در حالت بدون گازهای جانبی بیشتر باشد، حساسیت سوخت به سوزش فرسایشی بسیار کمتر خواهد بود. روش دیگری که در همین راستا پیشنهاد می شود جایگزین نمودن سوخت با نرخ سوزش بالا در مقاطعی از سوخت که سوزش فرسایشی احتمال وقوع بیشتری دارد می باشد.

#### ۵-۳- افزایش فشار محفظه

با افزایش فشار درون محفظه موتور، نرخ سوزش سوخت افزایش خواهد یافت و بنابر بند ۲ حساسیت به سوزش فرسایشی کاهش خواهد یافت. البته افزایش فشار محفظه مشکلات عدیده ای را به همراه خواهد داشت، که پیش بینی و کنترل آنها ضروری می باشد.

#### ۵-۴- کوچک کردن گلوگاه نازل

با کوچک کردن گلوگاه نازل دو نتیجه خواهیم گرفت. اول اینکه فشار محفظه افزایش می یابد که اثر افزایش فشار، در بند ۳ شرح داده شد، اثر دوم کاهش عدد بی بعد ماخ و در نتیجه سرعت در مقاطع انتهایی سوخت است که در کاهش سوزش فرسایشی نقش بسزایی خواهد داشت.

#### ۵-۵- تغییر سوخت از دوپایه به مرکب

سوخت های دوپایه نسبت به سوخت های مرکب به سوزش فرسایشی حساس تر می باشند، به صورتی که سوخت های دوپایه با نرخ سوزش بیشتر نسبت به سوخت های مرکب با نرخ سوزش کمتر به سوزش فرسایشی حساس ترند. از این رو یکی از روش های کم کردن اثر سوزش فرسایشی، استفاده از سوخت های مرکب بجای سوخت های دوپایه یا جایگزینی سوخت مرکب بجای سوخت دوپایه در مقطعی که سوزش فرسایشی بروز بیشتری دارد، می باشد.

#### ۶- نتیجه گیری:

سوزش فرسایشی در موتورهای سوخت جامد، قادر به بر هم زدن تمامی برنامه ها و پیش بینی های طراح موتور است. پیش بینی طراح در عملکرد موتور سوخت جامد، عمدتاً نیروی پیشران و مدت زمان عملکرد موتور می باشند و این دو شاخص در ارتباط مستقیم با نرخ سوزش سوخت جامد می باشند. از طرفی به دلیل اینکه سوزش فرسایشی، نرخ سوزش سوخت را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد، تعیین پارامترهای طرح، بدون شناسایی اثرات سوزش فرسایشی تقریباً ناممکن خواهد بود. همچنین فشار درون محفظه موتور نیز تابع نرخ سوزش سوخت جامد است، از این رو مقدار فشار محفظه نیز غیر قابل پیش بینی خواهد بود و نهایتاً امکان از هم گسیختگی بدنه موتور، اجتناب ناپذیر خواهد بود. اثر دیگری که سوزش فرسایشی عامل بوجود آورنده آن است، سوزش سریع تر انتهای سوخت و عبور گازهای فوق العاده گرم از روی بدنه موتور در زمان های انتهایی سوزش است. در نتیجه مقاومت پوسته به دلیل کاهش تنش تسلیم فلز در دماهای بالا و اضافه شدن تنش های حرارتی، به شدت کاهش یافته، تخریب بدنه موتور کاملاً معقول و قابل پیش بینی است. از مطالب عنوان شده به این نتیجه می رسیم که پیش بینی نحوه اثرگذاری سوزش فرسایشی بر نرخ سوزش سوخت جامد در شرایط مختلف محیطی، فوق العاده حائز اهمیت می باشد.

#### مراجع:

- [1] L. Green, Erosive burning of some composite solid propellants, Jet Propul 24 (1954) 9-15.
- [2] T. Marklund, A. Lake, Experimental investigation of propellant erosion, ARS Journal 30 (2) (1960) 173-178.
- [3] J.C. Gordon, J. Duterque, G. Lengelle, Solid propellant erosive burning, J. Propul. Power 8 (4) (1992) 741-747.
- [4] V.K. Bulgakov, A.I. Karpov, A.M. Lipanov, Numerical studies of solid propellant erosive burning, J. Propul. Power 9 (6) (1993) 812-818.
- [5] J.C. Gordon, J. Duterque, G. Lengelle, Erosive burning in solid propellant motors, J. Propul. Power 9 (6) (1993) 741-747.
- [6] M.K. King, Erosive burning of solid propellants, J. Propul. Power 9 (6) (1993) 785-805.
- [7] J.A. Furfaro, Erosive burning study utilizing ultrasonic measurement techniques, AIAA Paper (2003) 2003-4806.
- [8] S. Krishnan, K.K. Rajesh, Erosive burning of ammonium perchlorate/hydroxylterminated-polybutadiene propellants under supersonic crossflows, J. Propul.

- Power 19 (4) (2003) 741–747.
- [9] E.M. Landsbaum, Erosive burning of solid rocket propellants – a revisit, J. Propul. Power 21 (3) (2005) 470–477.
- [10] J. Moss, S. Heister, K. Linke, Experimental program to assess erosive burning in segmented solid rocket motors, AIAA Paper (2007) 2007–5782.
- [11] W. Cai, P. Thakre, V. Yang, A model of AP/HTPB composite propellant combustion in rocket-motor environments, Combust. Sci. Technol. 180 (12) (2008) 2143–2169.
- [12] W. Cai, P. Thakre, V. Yang, Transient combustion response of AP/HTPB composite propellant to acoustic oscillations in a rocket motor, Combust. Sci. Technol. 181 (4) (2009) 597–617.
- [13] H. Tsuji, An aerothermochemical analysis of erosive burning of solid propellants, in: Proceedings of the 9th International Symposium on Combustion, Williams & Wilkins, Baltimore, MD, 1963, pp. 384–393.
- [14] V.N. Vilyunov, A.A. Dvoryashin, An experimental investigation of erosive burning effects, Combust. Explo. Shock Waves 7 (1) (1971) 38–42.
- [15] V.N. Vilyunov, A.A. Dvoryashin, On the influence of the initial temperature of solid fuel on the effect of negative erosivity, Fizika Gorenia i Vzryva 9 (4) (1973) 602.
- [16] R.A. Beddini, Reacting turbulent boundary-layer approach to solid propellant erosive burning, AIAA J. 16 (9) (1978) 898–905.
- [17] R.A. Beddini, Aerothermochemical analysis of erosive burning in a laboratory solid-rocket motor, AIAA J. 18 (11) (1980) 1346–1353.
- [18] M.K. King, Model for prediction of double-base propellant burn rate, including cross-flow effects, AIAA J. 20 (10) (1982) 1432–1439.
- [19] A. Ishihara, N. Kubota, Erosive burning mechanism of double-based propellants, in: Twenty-first Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1986, pp. 1975–1981.
- [20] V.K. Bulgakov, A.I. Larpov, A.M. Lipanov, Numerical studies of solid propellant erosive burning, J. Propul. Power 9 (6) (1993) 812–818.
- [21] B.A. McDonald, S. Menon, Direct numerical simulation of solid propellant combustion in crossflow, J. Propul. Power 21 (3) (2005) 460–469.
- [22] G.I. Taylor, Fluid flow in regions bounded by porous surfaces, Proc. R. Soc. London, A 234 (1956) 456.
- [23] F.E.C. Culick, Rotational axisymmetric mean flow and damping of acoustic waves in solid propellant rocket motors, AIAA J. 4 (1966) 1462–1464.
- [24] G.A. Flandro, Effects of vorticity on rocket combustion stability, J. Propul. Power 11 (4) (1995) 607–625.
- [25] T.S. Roh, I.S. Tseng, V. Yang, Effects of acoustic oscillations on flame dynamics of homogeneous propellants in rocket motors, J. Propul. Power 11 (4) (1995) 640–650 (Value of shear rate provided by V. Yang, private communication).
- [26] Q. Zhao, P.L. Staab, D.R. Kassoy, K. Kirkkopru, Acoustically generated vorticity in an internal flow, J. Fluid Mech. 413 (2000) 247–285.
- [27] J. Buckmaster, T.L. Jackson, The effects of time-periodic shear on a diffusion flame anchored to a propellant, Combust. Flame 120 (2000) 211–221.
- [28] A.H.G. Isfahani, J. Zhang, T.L. Jackson, The effects of turbulence-induced timeperiodic shear on a flame anchored to a propellant, Combust. Flame 156 (2009) 1084–1098.
- [29] M.W. Beckstead, R.L. Derr, C.F. Price, A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames, AIAA J. 8 (12) (1970) 2200–2207.
- [30] P. Venugopal, F.M. Najjar, R.D. Moser, DNS and LES computations of model solid rocket motors. in: AIAA-2000-3571, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, AL, July 16–19, 2000.
- [31] P. Venugopal, F.M. Najjar, R.D. Moser, Numerical simulations of model solid rocket motor flows. in: AIAA Paper 2001-3950, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, UT, July 8–11, 2001.