

## مقایسه عملکرد کاتالیست پلاتین بر پایه‌هایی به شکل فوم و مونولیت در رانشگرهای تک‌پیشران هیدروژن پراکسید

علیرضا رجبی

دانشجوی دکترا، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی

پژوهشگاه فضایی ایران

alirezaarajabi@gmail.com

محمدعلی امیری فر

کارشناس ارشد، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی

پژوهشگاه فضایی ایران

amirifar\_m@yahoo.com

فاطمه حسن پور

دانشجوی دکترا، دانشگاه تهران

fatemehasanpour@alumni.ut.ac.ir

روزبه نیک‌فر

کارشناس ارشد، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی

پژوهشگاه فضایی ایران

نورالدین قدیری معصومی

دکتری، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی

پژوهشگاه فضایی ایران

nooredin@gmail.com

### چکیده

توسعه سامانه‌های پیشران و رانشگرها یک گام مهم در راه توسعه فناوری فضایی است. رانشگرها نیروی لازم برای حرکت ماهواره از مدار به مدار دیگر و یا تغییر و اصلاح وضعیت ماهوار در یک مدار را فراهم می‌کنند. در رانشگرهای تک‌پیشران تولید نیروی پیشران با تجزیه‌ی کاتالیستی یک پیشران پراثری انجام می‌شود. پیشران هیدروژن پراکسید پراثری است، قابلیت ذخیره‌سازی مناسبی دارد و آلودگی تولید نمی‌کند. بنابراین در توسعه رانشگرهای تک‌پیشران توجه بسیاری به این پیشران شده است. کاتالیست مناسب برای تجزیه هیدروژن پراکسید از بارگذاری فلز پلاتین بر پایه‌های سرامیکی تولید می‌شود. جنس پایه می‌تواند از موادی مانند آلومینا یا کوردیریت باشد. شکل‌هایی مانند گوی، توری، فوم و مونولیت برای پایه‌ی کاتالیست استفاده شده است. شکل این پایه‌ها مساحت سطح فعال، شکل جریان سیال در محفظه و مقاومت پایه در برابر بارهای وارده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین شکل پایه کاتالیست بر عملکرد رانشگر تک‌پیشران تاثیر می‌گذارد. در پروژه‌ای در پژوهشگاه فضایی ایران تاثیر شکل پایه کاتالیست بر عملکرد رانشگری با پیشران هیدروژن پراکسید مطالعه شد. نوشتار پیش‌رو فعالیت انجام شده در این پروژه و نتایج به دست آمده را گزارش می‌کند. نتایج نشان داد که هرچند عملکرد دو شکل پایه‌ی کاتالیست نزدیک به هم بود، کاتالیست مونولیت اندکی در این آزمون عملکرد بهتری داشته است. ۵۰٪ نوسانات فشار کمتر و ۷ ثانیه ضربه ویژه بالاتر مهمترین برتری‌های کاتالیست مونولیت بر کاتالیست فوم بود. در همین حال نیروی پیشران تولیدی توسط کاتالیست مونولیت ۹٪ کمتر بود.

کلمات کلیدی: رانشگر تک‌پیشران، هیدروژن پراکسید، کاتالیست، فوم، مونولیت

### مقدمه

رانشگرها<sup>۱</sup> یکی از ابزار پرکاربرد در کنترل وضعیت و انتقال مداری ماهواره‌ها هستند. رانشگرهای تک‌پیشران<sup>۲</sup> ضربه ویژه بالاتری نسبت به رانشگرهای گاز سرد دارند و از طرفی نسبت به رانشگرهای دوپیشران<sup>۳</sup> ساده تر و دارای قابلیت اطمینان بالاتر هستند. بنابراین بهترین گزینه برای پیشران در بسیاری از ماموریت‌های فضایی رانشگرهای تک‌پیشران بوده‌اند. در رانشگرهای تک‌پیشران گاز داغ از طریق تجزیه کاتالیستی پیشران مایع تولید شده و با خروج این گاز داغ و پرفشار از نازل نیروی پیشران<sup>۴</sup> تولید می‌شود.

پیشران در رانشگرهای تک‌پیشران مایعی است که قابلیت تجزیه کاتالیستی سریع و گرمازا داشته باشد و از طرفی امکان ذخیره‌سازی طولانی مدت آن وجود داشته باشد. مایعات پونی فعال نظیر هیدروژن پراکسید ( $H_2O_2$ )<sup>۵</sup>،  $HAN$ <sup>۶</sup> و  $ADN$ <sup>۷</sup> از جمله مواد کم سمیت یا غیرسمی هستند که می‌توانند به عنوان پیشران استفاده شوند. از این میان پراکسید هیدروژن به دلیل دسترسی آسان، قیمت کم‌تر، راحتی نگهداری و حمل و نقل، عدم نیاز به سوخت (دارای دو نقش اکسند و کاهنده) و در نتیجه سادگی سیستم پیشران، گزینه مناسب‌تری برای انتخاب است [۱-۲]. آغاز تجزیه کاتالیستی پراکسید هیدروژن به عنوان منبع انرژی به سال ۱۹۳۰ در آلمان برمی‌گردد. واکنش تجزیه یک واکنش گرمازا است و بعد از افزایش دما واکنش به صورت خودبخودی پیش می‌رود. به منظور کاهش انرژی فعال‌سازی، تسریع شروع واکنش و پیشرفت خود بخودی آن در دمای محیط، واکنش به صورت کاتالیستی انجام می‌پذیرد [۳].

<sup>1</sup> thruster

<sup>2</sup> monopropellant

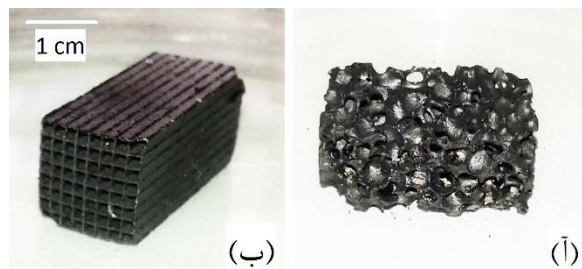
<sup>3</sup> bipropellant

<sup>4</sup> thrust

<sup>5</sup> Hydroxylammonium nitrate

<sup>6</sup> Hydrazinium nitroformate

<sup>7</sup> Ammonium dinitramide



شکل ۱- کاتالیست‌های نشانده شده بر پایه‌ی فوم (آ) و مونولیت (ب)

استفاده از پایه مونولیت و فوم به دلیل افزایش مساحت سطح فعال ظاهری به ازای واحد گرم کاتالیست سبب افزایش فعالیت کاتالیست، کاهش مقدار کاتالیست موردنیاز به ازای یک نیروی پیشران مشخص و کاهش وزن سیستم می‌شود [۱۱]. همچنین با اصلاح سطح پایه از طریق فرآیند واش کت<sup>۵</sup> و کنترل پارامترهای کلیدی در ساخت کاتالیست می‌توان به مساحت سطح مطلوب و درصد بارگذاری بالایی از فلز فعال دست یافت. یکی از مشکلات استفاده از مونولیت‌ها در تجزیه پیشرانه وجود جریان آرام اولیه در کانال‌ها است که سبب تاخیر واکنش می‌شود. افزایش طول مونولیت یا استفاده از فوم به جای مونولیت آشفته‌گی جریان را افزایش می‌دهد [۱۲-۱۳]. برخلاف پایه‌های گرانولی و توری شکل مطالعات انجام شده بر پایه‌های فوم و مونولیت محدود است. در این پژوهش به بررسی و مقایسه عملکرد دو کاتالیست پلاتین بر پایه فوم و مونولیت در تجزیه پیشرانه پراکسید هیدروژن می‌پردازیم.

در یک پروژه جاری در پژوهشگاه فضائی ایران یک رانشگر هیدروژن پراکسید در حال توسعه است. در مراحل مقدماتی یک رانشگر آزمایشگاهی ساخته شده است. در این رانشگر حسگرهای دما و فشار وجود دارند که مطالعه جریان درون رانشگر را ممکن می‌سازد. در فاز طراحی پروژه کاتالیست‌هایی با جنس و پایه مختلف ساخته و تست شده است. در مقاله حاضر نتایج مربوط به مقایسه‌ی شکل پایه‌ی کاتالیست فوم و مونولیت گزارش می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

مراحل نشانیدن پلاتین بر پایه شامل تلقیح<sup>۶</sup>، تبخیر و خشک شدن، کلسیناسیون<sup>۷</sup> و احیا است. تلقیح عبارت است از غوطه‌وری پایه در محلول نمک فلزی است. تبخیر و خشک شدن در دمای ۸۰ درجه انجام شد. کلسیناسیون در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. احیا شامل عبور گاز داغ هیدروژن از روی سطح کاتالیست در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود.

تصویر رانشگر آزمایشگاهی تک‌پیشرانه و حسگرهای آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. انژکتور در این رانشگر یک سوراخ ۰/۲ میلی‌متر بود. نازل در این رانشگر کوتاه بود و نسبت مساحت خروجی به گلوگاه نازل با توجه به فشار اتمسفری انتخاب شد.

مهم‌ترین بخش هر واکنش کاتالیستی، انتخاب بستر کاتالیستی مناسب است. بنابراین توسعه بستر کاتالیستی کارآمد، قابل اطمینان، با طول عمر بالا که قادر به کارکرد تجدیدپذیر، سریع و مقاوم به پایدارکننده‌ها و ناخالصی‌های موجود در پیشرانه باشد، یکی از چالش‌های طراحی و ساخت رانشگرهای تک‌پیشرانه است. کاتالیست‌ها عموماً شامل فلزی فعال هستند که بر یک پایه‌ی غیر فلزی بارگذاری شده است. از زمان کشف تجزیه هیدروژن پراکسید تا کنون بیش از ۱۰۰ ماده با خواص کاتالیستی شناسایی شده است. فلزات فعال متداول در این فرآیند نقره، منگنز اکسید، پلاتین، ایریدیوم، روتنیوم و پالادیوم هستند. در این میان پلاتین بالاترین فعالیت را در تجزیه هیدروژن پراکسید نشان داده است [۴-۵].

انتخاب پایه نیز به اندازه انتخاب فلز فعال در کاتالیست‌ها مهم است. در حین عملیات، به علت وجود دماهای بالا و مواجهه با لرزش‌های زیاد، کاتالیست در معرض فشارهای مختلف مکانیکی و حرارتی قرار می‌گیرد و ضروری است پایه‌ی کاتالیست منتخب مقاومت حرارتی- مکانیکی بالا و همچنین فعالیت کاتالیستی پیوسته‌ای داشته باشد [۶-۷]. به منظور دستیابی به ویژگی‌های کاتالیستی مطرح شده ساخت کاتالیست بر پایه-هایی با مقاومت مکانیکی و حرارتی بالا و مساحت سطح ویژه بالا انجام می‌پذیرد. سطح ویژه بالا به معنی دستیابی به جایگاه فعال بیشتر برای کاتالیست است. پایه‌هایی که دارای حفرات و تخلخل بیشتر هستند سطح ویژه بالایی دارند.

پایه‌ها دارای اشکال مختلف گلوله شکل، توری شکل، فوم<sup>۱</sup> متخلخل و مونولیت<sup>۲</sup> است [۸-۹]. پایه‌ی فوم به شکل توده‌ای متخلخل شامل حفرات نامنظم و فراوان است. پایه‌ی مونولیت یک قطعه مکعب مستطیل دارای کانال‌های منظم و موازی با مقطع مربع در سرتاسر آن است. پایه-های توری شکل افت فشار قابل توجهی در طول بستر کاتالیست ایجاد کرده و به سرعت غیرفعال می‌شوند. برای پایه‌های کروی افت فشار کمتری گزارش شده است اما نوسانات فشار و خوردشدگی کاتالیست (حذف کاتالیست از چرخه واکنش) قابل توجه است [۱۰]. برای رفع مشکل افت و نوسان فشار و جلوگیری از خوردشدگی، استفاده از کاتالیست مونولیت و فوم پیشنهاد شده است. نمونه‌ای از کاتالیست‌های مونولیت و فوم ساخته شده در پروژه حاضر در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. جنس فلز فعال در این کاتالیست‌ها پلاتین و پایه در شکل فوم از جنس آلومینا<sup>۳</sup> و در شکل مونولیت از جنس کوردریت<sup>۴</sup> است.

<sup>1</sup> foam

<sup>2</sup> monolith

<sup>3</sup> alumina

<sup>4</sup> corderete

<sup>5</sup> washcoat

<sup>6</sup> impregnation

<sup>7</sup> calcination

فشار درون رانشگر، دما و دبی عبوری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که فشار در حالت پایا برای هر دو رانشگر حدود ۹ بار است. فشار حتی در استارت دوم که طولانی‌تر است مقدار ثابتی نشان نمی‌دهد و متوسط آن به تدریج اندکی افت می‌کند. مقدار این افت چند دهم بار و ناشی از افت فشار بالادست است. در استارت دوم فشار مخزن از ۱۶/۵ بار به ۱۵/۵ بار رسید. حجم کم مخزن فشارگذاری به همراه فشار بارگذاری کم سبب شد که در زمان عملکرد رانشگر فشار مخزن به تدریج افت کند. از طرفی فشار در رانشگر دارای کاتالیست فوم نوسانات بسیار بیشتری را نشان می‌دهد که مطلوب نیست زیرا نوسان فشار رانشگر سبب ایجاد نوسان در نیروی پیشران تولیدی می‌شود. مقدار قله و دره سیگنال فشار در رانشگر فوم حدود ۲ بار و در رانشگر مونولیت ۰/۸ بار اندازه‌گیری شد.

#### ۲) دما

دمای بستر کاتالیست در شکل ۳ مشاهده می‌شود. دمای پایدار در استارت اول ۲۲۶ درجه سانتی‌گراد در رانشگر فوم و ۲۱۶ درجه سانتی‌گراد در رانشگر مونولیت است. دمای بستر در استارت دوم رانشگر فوم ۲۲۶ درجه و برای رانشگر مونولیت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. دماهای اندازه‌گیری شده در این تست‌ها کمتر از دمای پیش‌بینی شده از روابط طراحی و گزارش شده در منابع است. دمای بستر در رانشگرهای تک‌پیشران هیدروژن پراکسید حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [۱۴]. در مراحل بعدی پروژه مشخص شد که حسگر دما در تست‌های ابتدایی کالیبره نبوده‌اند. بعد از کالیبراسیون دماهای اندازه‌گیری شده به دمای طراحی نزدیک شد.

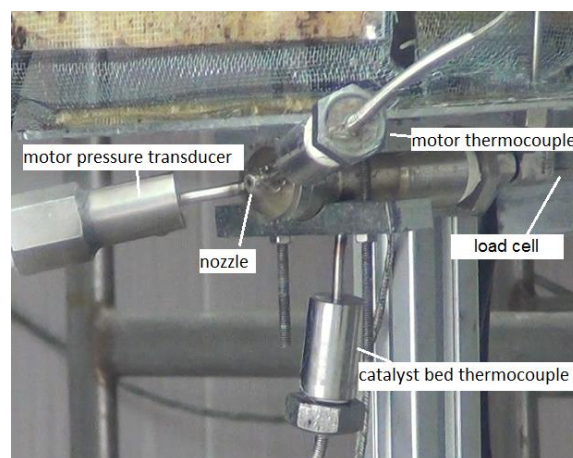
در رانشگر مونولیت دمای اندازه‌گیری شده پس از قطع جریان در استارت اول یک افزایش حدود ۸۵ درجه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین کاهشی ۴۰ درجه‌ای در ابتدای استارت دوم مشاهده می‌شود. در فیلم تست دیده می‌شود که در لحظات انتهایی استارت اول یک قطره مایع از محل اتصال ترموکوبل خارج شد. عبور این قطره از روی ترموکوبل به احتمال زیاد سبب این افت و خیز در دمای اندازه‌گیری شده است. ایجاد این قطره به دلیل وجود نشتی در محل اتصال ترموکوبل به رانشگر بوده است.

#### ۳) دبی

دبی عبوری از دبی‌سنج در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در لحظه اول هر دو استارت، فشار داخل رانشگر پایین است، بنابراین اختلاف فشار پشت انژکتور (۱۳ بار) با فشار داخل رانشگر بسیار زیاد است. به این دلیل در لحظه اولیه دبی زیادی از انژکتور عبور می‌کند. با ورود پیشران به داخل رانشگر و تجزیه‌ی آن فشار رانشگر به تدریج افزایش می‌یابد. افزایش فشار درون رانشگر سبب کاهش اختلاف فشار دو طرف انژکتور به حدود ۴ بار و در نتیجه افت دبی عبوری می‌شود. قله دبی در استارت دوم کمتر از استارت اول است زیرا در لحظه استارت دوم فشار رانشگر کمی بیشتر از صفر است. از طرف دیگر کاتالیست در استارت دوم گرم‌تر است و این سبب می‌شود فشار محفظه سریع‌تر رشد کند. دبی در حالت پایا برای رانشگر فوم ۰/۷۸ و رانشگر مونولیت ۰/۶۶ گرم بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

فشارگذاری توسط یک مخزن هوای فشرده و از طریق رگولاتور<sup>۱</sup> انجام می‌گرفت. مسیر فشارگذاری همچنین دارای یک فیلتر ۱۰ میکرون برای جلوگیری از عبور آلودگی‌ها و شیر اطمینان برای افزایش ایمنی بود. در هر آزمون شیر برقی پیشران توسط فرمان دستی باز می‌شد و داده‌های خروجی حسگرها توسط سامانه جمع‌آوری داده‌ها به کامپیوتر وارد می‌شد. در آزمون‌های انجام شده شیر پیشران در زمان آزمون نیز یک بار باز و بسته می‌شد تا عملکرد پیشران در هنگام قطع و وصل پیشران ارزیابی شود. بنابراین این آزمون می‌تواند داده‌ها را به استارت اول و دوم تقسیم نمود.

در این رانشگر از دو حسگر دما و یک حسگر فشار استفاده شده است. حسگر دمای انتهایی رانشگر در این سری از تست‌ها دچار ایراد شده و نتایج آن در این گزارش وجود ندارد. رانشگر بر روی یک میز پاندولی اندازه‌گیری نیروی پیشران نصب شد؛ بنابراین رانشگر می‌توانست در جهت محور نیروی پیشران آزادانه حرکت کند و اندازه‌گیری نیروی پیشران توسط حسگر لودسل<sup>۲</sup> امکان‌پذیر بود. لودسل استفاده شده از نوع S-type و متعلق به شرکت zemic بود. برای اندازه‌گیری فشار از فشارسنج شرکت TML ژاپن استفاده شد. حسگر دما ترموکوبل‌های نوع K بودند. دبی‌سنج استفاده شده از نوع کوریولیس<sup>۳</sup> و متعلق به شرکت Endress Hauser آلمان بود. سیال استفاده شده هیدروژن پراکسید ۹۰٪ بود که از منابع داخلی تامین شد.



شکل ۲- تصویر رانشگر و سنسورهای آن

#### نتایج

نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای متغیرهای فشار، دما، دبی، زمان پاسخ، پیشران، ضربه ویژه و بازده ضربه پیشران در ادامه آمده است. تمام نمودارها در این گزارش توسط تابع smooth در نرم‌افزار Tecplot با تعداد عبور ۱۰۰ و ضربه ۰/۵ با شرط مرزی fixed هموار شده است.

(۱) فشار

<sup>1</sup> regulator

<sup>2</sup> load cell

<sup>3</sup> coriolis

## ۴) زمان پاسخ

زمان پاسخ را می‌توان به این صورت تعریف کرد: فاصله زمانی بین لحظاتی که فشار در رانشگر بین ۱۰٪ تا ۹۰٪ فشار در حالت عملکرد پایا تغییر می‌کند. در تست فعلی فشار حالت پایا را می‌توان ۹ بار دانست. بر این اساس زمان پاسخ در رانشگر در هر استارت فاصله زمانی بین فشار ۰/۹ تا ۸/۱ بار است. زمان پاسخ فشار در رانشگر فوم در استارت اول ۴/۶۰ ثانیه و در استارت دوم ۳/۷۷ ثانیه بود. زمان پاسخ فشار در رانشگر مونولیت در استارت اول ۴/۹۳ ثانیه و در استارت دوم ۱/۹۵ ثانیه بود. این زمان‌های پاسخ برای رانشگر فضائی مطلوب نیستند و انتظار می‌رود با پیشرفت پروژه و بهبود طراحی این مقادیر کاهش یابند. زمان پاسخ فشار در رانشگر مونولیت در استارت دوم بهبود چشم‌گیری داشته که دلیل اصلی آن را می‌توان گرم شدن کاتالیست دانست. در این رانشگر دما در شروع استارت دوم حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و در شروع استارت اول ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. زمان پاسخ فشار در رانشگر فوم نیز در استارت دوم بهبود داشته است، اما از نظر کمی به خوبی رانشگر مونولیت نبود.

## ۵) پیشران

پیشران تولیدی توسط دو رانشگر در این آزمون‌ها در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در این شکل استارت دوم به صورت قسمتی جدا-قسمت راست- رسم شده و زمان در محور افقی از ابتدای هر استارت (لحظه‌ای که پیشران شروع به افزایش می‌کند) در نظر گرفته شده است. بنابراین زمان در قسمت راست شکل‌ها با زمان در شکل ۳ یکی نیست. مقدار میانگین پیشران پایا در هر دو استارت برای رانشگر فوم ۰/۸۴ نیوتن و برای رانشگر مونولیت ۰/۷۷ نیوتن اندازه‌گیری شد. نوسانات پیشران در رانشگر فوم به مراتب بیشتر از رانشگر مونولیت است و این ناشی از نوسانات فشار است که پیش از این به آن اشاره شد. زمان پاسخ پیشران در استارت دوم برای هر دو رانشگر کوتاه‌تر از این زمان در استارت اول است. همچنین زمان پاسخ در رانشگر مونولیت بهتر از رانشگر فوم است. این رفتار پیشران با توجه به آنچه در مورد زمان پاسخ فشار گفته شد قابل توجیه است.

## ۶) ضربه ویژه

ضربه ویژه معرف پیشران تولیدی به ازای واحد دبی جرمی و شاخص مناسبی برای ارزیابی عملکرد رانشگر است. ضربه ویژه  $I_{sp}$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} \quad ۱$$

که در آن  $F$  پیشران،  $\dot{m}$  دبی جرمی و  $g$  شتاب گرانش زمین است. ضربه ویژه به همراه دبی و پیشران در شکل ۴ مشاهده می‌شود. پیش از شروع به کار رانشگر در هر استارت، از آنجا که دبی و پیشران نزدیک به صفر هستند، نویز موجود در دیتا سبب می‌شود تغییرات زیادی در ضربه ویژه اندازه‌گیری مشاهده بشود. در حالت عملکرد پایا اما این نوسانات کمتر شد. در رانشگر فوم ضربه ویژه در حالت پایا استارت اول ۹۷ ثانیه و در حالت پایای استارت دوم به طور متوسط ۱۰۸ ثانیه است. در رانشگر مونولیت، ضربه ویژه در حالت پایا استارت اول ۱۰۴ ثانیه و در حالت پایای استارت دوم به طور متوسط ۱۱۶ ثانیه است. عملکرد رانشگر مونولیت از نظر ضربه ویژه برتر از رانشگر فوم بود. با این حال ضربه ویژه در هر دو رانشگر کمتر از مقدار مورد انتظار در رانشگرهای تک‌پیشران هیدروژن پراکسید بود.

## ۷) بازده ضربه پیشران

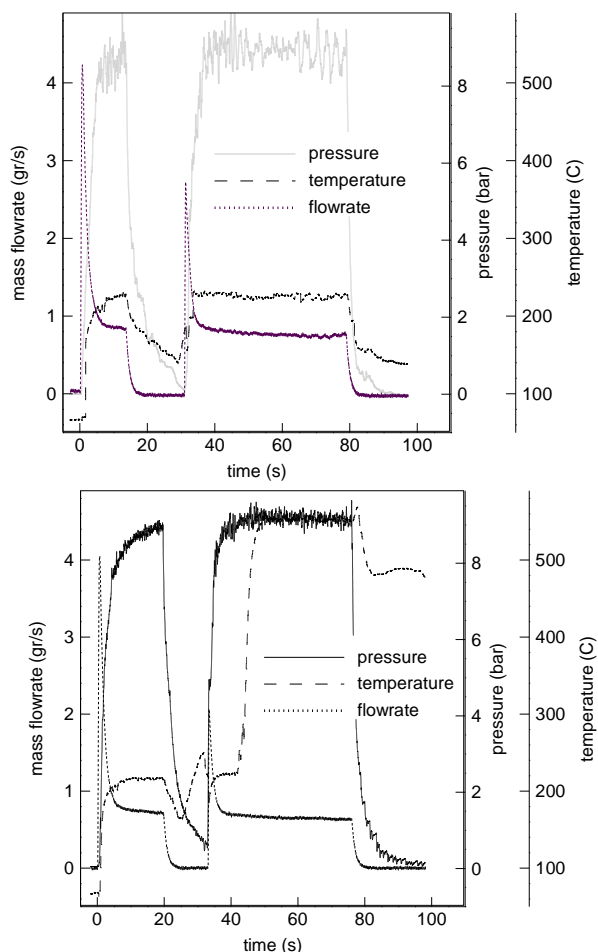
ضربه پیشران  $C_F$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_F = \frac{F}{p_c A_t} \quad ۲$$

در این رابطه  $A_t$  مساحت گلوگاه نازل و  $p_c$  فشار محفظه است. برای جریان تک‌آنتروپی و بدون افت ضربه پیشران تابع خواص گاز درون محفظه و شرایط خروجی است و مقدار آن از رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$C_F = \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + \frac{(p_e - p_a) A_e}{p_c A_t} \quad ۳$$

در رابطه بالا  $k$  نسبت گرماهای ویژه گاز،  $p_e$  فشار خروجی،  $p_a$  فشار محیط و  $A_e$  مساحت خروجی نازل است. بازده ضربه پیشران  $\eta_{CF}$



شکل ۳- تغییرات فشار، دما و دبی رانشگر با کاتالیست فوم (بالا) و مونولیت (پایین)

عملکرد رانشگر تک پیشرانه هیدروژن پراکسید با استفاده از دو کاتالیست با پایه‌های فوم و مونولیت ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این دو کاتالیست عملکرد نزدیکی داشتند؛ با این وجود عملکرد کاتالیست با پایه‌ی مونولیت اندکی بهتر بود. نوسانات کمتر فشار، ضربه ویژه بالاتر و زمان پاسخ بهتر از نمودهای این عملکرد بهتر بودند.

**مراجع**

(1) Zhang, Q. and Shreeve, J. N. M., 2013, "Ionic liquid propellants: future fuels for space propulsion", *Chemistry-A European Journal*, 19, 15446-15451.

(2) Amrousse, R., Hori, K., Fetimi, W., and Farhat, K., 2012, "HAN and ADN as liquid ionic monopropellants: thermal and catalytic decomposition processes", *Applied Catalysis B: Environmental*, 127, 121-128.

(3) Tian, H., Zhang, T., Sun, X., Liang, D. and Lin, L., 2001, "Performance and deactivation of Ir/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in the hydrogen peroxide monopropellant thruster", *Applied Catalysis A: General*, 210(1), 55-62.

(4) Dolci, S., Dell'Amico, D. B., Pasini, A., Torre, L., Pace, G. and Valentini, D., 2015, "Platinum Catalysts Development for 98% Hydrogen Peroxide Decomposition in Pulsed Monopropellant Thrusters" *Journal of Propulsion and Power*, 31(4), 1204-1216.

(5) Pirault-Roy, L., Kappenstein, C., Guerin, M., Eloirdi, R. and Pillet, N., 2002, "Hydrogen peroxide decomposition on various supported catalysts effect of stabilizers", *Journal of Propulsion and Power*, 18(6), 1235-1241.

(6) Kappenstein, C., Brahmi, R., Amariei, D., Batonneau, Y., Rossignol, S. and Joulin, J. P., 2006, "Catalytic decomposition of energetic compounds-Influence of catalyst shape and ceramic substrate", *AIAA Papers*, 4546.

(7) Batonneau, Y., Kappenstein, C.J. and Keim, W., 2008, "Catalytic Decomposition of Energetic Compounds: Gas Generators and Propulsion", *Handbook of Heterogeneous Catalysis*.

(8) Krejci, D., Woschnak, A., Scharlemann, C. and Ponweiser, K., 2012, "Structural impact of honeycomb catalysts on hydrogen peroxide decomposition for micro propulsion", *Chemical Engineering Research and Design*, 90(12), 2302-2315.

(9) Amariei, D., Amrousse, R., Batonneau, Y., Brahmi, R., Kappenstein, C. and Cartoixa, B., 2010, "Monolithic catalysts for the decomposition of energetic compounds", *Studies in Surface Science and Catalysis*, 175, 35-42.

(10) Torre, L., Pasini, A., Romeo, L., Cervone, A. and d'Agostino, L., 2009, "Performance of a monopropellant thruster prototype using advanced hydrogen peroxide catalytic beds", *Journal of Propulsion and Power*, 25(6), 1291.

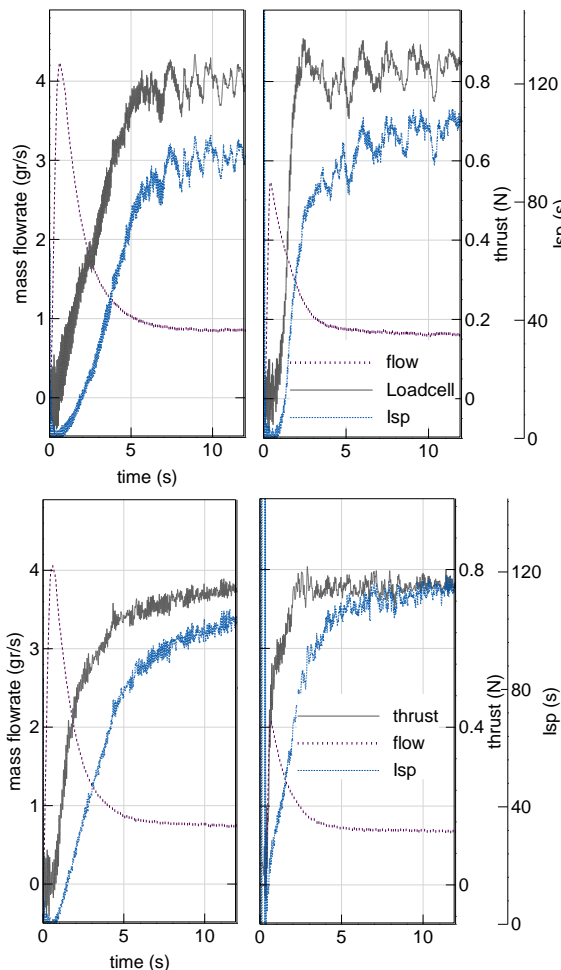
(11) Romeo, L., d'Agostino, L. and Calderazzo, F., "Testing of innovative catalyst beds for hydrogen peroxide monopropellant thruster", In *XX AIDAA congress, Milano, Italy, June*.

(12) Krejci, D., Woschnak, A., Scharlemann, C. and Ponweiser, K., 2011, "Hydrogen peroxide decomposition for micro propulsion: simulation and experimental verification", *AIAA Paper*, 5855.

(13) Krejci, D., Woschnak, A., Scharlemann, C. and Ponweiser, K., 2012, "Structural impact of honeycomb

نسبت مقدار ایده‌آل ضریب پیشران از رابطه ۳ به مقدار تجربی آن از رابطه ۲ است.

ضریب پیشران ایده‌آل و تجربی و بازده ضریب پیشران در جدول ۱ آمده است. فشار خروجی اندازه‌گیری نشده و فرض شده است که جریان تا فشار محیط منبسط شود. بنابراین جمله آخر رابطه ۳ حذف می‌شود. ملاحظه می‌شود که بازده ضریب پیشران برای رانشگر فوم ۰/۰۴ بیشتر از بازده ضریب پیشران در رانشگر مونولیت بود. بنابراین عملکرد نازل در رانشگر فوم اندکی بهتر از رانشگر مونولیت بود.



شکل ۴- پیشران، دبی و ضربه ویژه در رانشگر فوم (بالا) و مونولیت (پایین) در استارت اول (چپ) و دوم (راست)

جدول ۱- بازده ضریب پیشران در استارت دوم

رانشر فوم	رانشر مونولیت	
۱/۰۶	۱/۱۳	C <sub>F</sub> تجربی
۱/۲۴	۱/۲۴	C <sub>F</sub> تئوری
۰/۹۱	۰/۸۷	بازده ضریب پیشران

**نتیجه‌گیری**

catalysts on hydrogen peroxide decomposition for micro propulsion", *Chemical Engineering Research and Design*, 90(12), 2302-2315.

(14) Scharlemann, C., Schiebl, M., Marhold, K., Tajmar, M., Miotti, P., Kappenstein, C., ... & Hunter, C., 2006, "Development and test of a miniature hydrogen peroxide monopropellant thruster", *AIAA Paper*, 4550, 2006.