



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 1, pp.: 96-108  
2022

DOI:  
10.22034/JSSTA.2022.325976.1052

### Article Info

Received: 2022-1-29  
Accepted: 2022-4-26

### Keywords

Iridium Nanoparticles,  
Loading, Weight percentage,  
 $\gamma$ -alumina core, Hydrazine  
dissociation, Monopropellant  
thruster

### How to Cite this article

Nooredin Ghadiri Massoom,  
Alireza Rajabi, Mohammad  
Ali Amirifar, Zahra  
Amirsardari, Akram Dorani,  
Majid Kamranifar, "Study  
the Performance of  
Hydrazine Monopropellant  
Thruster Catalysts with  
Different Iridium Loading",  
*Journal of Space Science,  
Technology and  
Applications*, vol 2 (1), p.:  
96-108, 2022.

Original Article

## Study the Performance of Hydrazine Monopropellant Thruster Catalysts with Different Iridium Loading

Nooredin Ghadiri Massoom<sup>\*1</sup>, Alireza Rajabi<sup>1</sup>, Mohammad Ali Amirifar<sup>1</sup>, Zahra Amirsardari<sup>1</sup>, Akram Dorani<sup>1</sup>, Majid Kamranifar<sup>1</sup>

1. Space Transportation Research Institute

\*. Corresponding author

### Abstract

In this paper, the effects of different weight percentage of iridium (Ir) nanoparticles loadings on performance parameters of hydrazine catalyst and monopropellant thruster have been studied. Nanoparticles of iridium with different contents of 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt% has been coated on gamma-alumina of 1 to 2 mm size for decomposition of hydrazine during some various steps of calcination. These catalysts then have been tested in a 1 N thruster. The tests were conducted using a scenario of different stages of steady and pulsating fires of different times and duty cycles. The test results showed that catalyst loss was minimum with 30 wt% of iridium nanoparticles loading. Despite of this, there were no meaningful difference between other parameters such as pressure roughness, thrust, specific impulse, and catalyst crushing. The results showed a good value of characteristic velocity. All parameter values of three type of catalysts were in the expected and desired range.



مقاله پژوهشی

## مطالعه عملکرد کاتالیست‌هایی با بارگذاری‌های مختلف ایریدیوم در رانشگر تک‌پیشراشه هیدرازینی

نورالدین قدیری معصوم<sup>۱\*</sup>، علیرضا رجبی<sup>۲</sup>، محمدعلی امیری فر<sup>۳</sup>، زهرا امیرسرداری<sup>۴</sup>، اکرم دورانی<sup>۵</sup>،  
مجید کامرانی فر<sup>۶</sup>

۱. پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران  
\* (نویسنده مسئول)

دسترس پذیر در نشانی:  
[Journal.isrc.ac.ir](http://Journal.isrc.ac.ir)

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۱، صفحه ۹۶-۱۰۸  
بهار و تابستان ۱۴۰۱

DOI:  
10.22034/JSSTA.2022.325976.1052

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

واژه‌های کلیدی

نانوذرات ایریدیوم، بارگذاری، درصد  
وزنی، پایه گاما آلومینا، تجزیه  
هیدرازین، تراستر تک پیشراشه

نحوه استناد به این مقاله

نورالدین قدیری معصوم، علیرضا رجبی،  
محمدعلی امیری فر، زهرا امیرسرداری،  
اکرم دورانی، مجید کامرانی فر. "مطالعه  
عملکرد کاتالیست‌هایی با بارگذاری‌های  
مختلف ایریدیوم در رانشگر تک‌پیشراشه  
هیدرازینی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره  
اول، صفحات ۹۶-۱۰۸، ۱۴۰۱.

### چکیده

در این مقاله به بررسی تاثیر بارگذاری‌های مختلف نانوذرات ایریدیوم بر متغیرهای عملکردی کاتالیست تجزیه و تراستر تک‌پیشراشه هیدرازینی پرداخته شده است. نانوذرات کاتالیستی با درصدهای وزنی متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ایریدیوم بر روی پایه گرانول آلومینا با قطر ۱-۲ میلی‌متر با مراحل متفاوتی از فرایند تلقیح سنتز شده و در تجزیه هیدرازین در یک تراستر نیوتنی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون‌ها با استفاده از سناریویی از تعداد مختلفی از روشن شدن‌های پالسی و پایا با زمان‌های متفاوت انجام شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که کم‌ترین میزان اتلاف جرمی کاتالیست برای درصد وزنی ۳۰ درصد رخ می‌دهد. با وجود این موضوع، سایر پارامترهای مطالعه شده مانند زبری فشار، ضربه ویژه، تراستر، و خردشدگی کاتالیست‌ها اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند. نتایج نشان دادند که میزان سرعت مشخصه تراستر مقادیر مناسبی دارد. همچنین، نتایج به دست آمده برای سایر متغیرها در هر سه مقدار بارگذاری نیز در محدوده مورد انتظار و مطلوب بوده‌اند.

## ۱- مقدمه

به منظور توسعه یک رانشگر تک‌پیشران هیدرازینی با نیروی پیشران نامی یک نیوتن، ابتدا نمونه آزمایشگاهی رانشگر طراحی و ساخته شد. همچنین، کاتالیست و پیشران مناسب این رانشگرها توسعه داده شد. آزمایش‌های زیادی بر روی رانشگر و کاتالیست ساخته شده انجام شد. بخشی از این آزمایش‌ها که در این مقاله به آنها پرداخته می‌شود، در آزمایشگاه تراسترهای فضایی ابوریحان بیرونی در پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران انجام شدند.

رانشگرهای تک‌پیشران<sup>۱</sup> ضربه ویژه بالاتری نسبت به رانشگرهای گاز سرد دارند و از طرفی نسبت به رانشگرهای دوپیشران<sup>۲</sup> ساده‌تر و دارای قابلیت اطمینان بالاتر هستند [۱]. پیشران در رانشگرهای تک‌پیشران می‌تواند از مشتقات هیدرازین، هیدروژن پراکسید یا پیشران‌های سبز جدید باشد. هیدرازین<sup>۳</sup> به دلیل محتوای انرژی بالای خود از ابتدا مورد توجه توسعه‌دهندگان رانشگرها بوده است [۲]. در رانشگرهای تک‌پیشران هیدرازینی، تجزیه هیدرازین به گازهای داغ سبب افزایش فشار در محفظه رانش و تولید نیروی پیشران می‌شود. برای تجزیه هیدرازین در رانشگرهای تک‌پیشران، از کاتالیست ایریدیوم که بر پایه گاما آلومینا بارگذاری شده استفاده می‌شود. ایریدیوم فلز فعالی است که واکنش تجزیه هیدرازین به آمونیاک، هیدروژن و نیتروژن را سرعت می‌بخشد. پایه گاما آلومینا برای افزایش سطح موثر کاتالیست استفاده می‌شود. نانوذرات ایریدیوم با روش تلقیح بر روی پایه‌های گوی شکل (گرانول‌ها) و متخلخل گاما آلومینا بارگذاری می‌شود. با افزایش تعداد دفعات تلقیح می‌توان مقدار بیشتری از فلز فعال را بر روی پایه نشانند. میزان فلز فعال که به صورت درصد وزن فلز فعال به وزن پایه گزارش می‌شود، یکی از پارامترهایی است که باید در تهیه کاتالیست بهینه‌سازی شود.

رانشگرهای تک‌پیشران هیدرازینی از سال ۱۹۶۰ و از زمانی که کاتالیست شل ۴۰۵ معرفی شد استفاده می‌شوند [۲]. بسیاری از ماهواره‌ها از این رانشگرها برای کنترل وضعیت و حفظ موقعیت استفاده کرده‌اند که اغلب آن‌ها از شل ۴۰۵ یا جایگزین آن، اس

۴۰۵ به عنوان کاتالیست استفاده کرده‌اند [۳]. تعداد کمی از توسعه‌دهندگان، کاتالیست جایگزینی را برای رانشگر تک‌پیشران هیدرازینی مانند H-KC12GA پیشنهاد کرده‌اند [۴]. گوتو<sup>۶</sup> و همکاران [۴]، گزارش کرده‌اند که تغییر نوع انژکتور می‌تواند از طریق توزیع بهتر پیشران بر روی سطح کاتالیست سبب افزایش عمر رانشگر شود. قنبری و همکاران [۵]، تجربیاتی در خصوص استفاده از پایه گاما آلومینا به منظور ساخت کاتالیست‌های تجزیه هیدرازین داشته‌اند.

استحکام مکانیکی و مقاومت نسبت به تنش‌های وارده را می‌توان با کنترل کردن بارگذاری ذرات فلز فعال بر روی پایه آلومینا بهینه کرد. همچنین، درصد تجزیه هیدرازین نیز با تغییر در درصد بارگذاری فلز تغییر می‌کند [۶ و ۷].

برای بهینه‌سازی میزان بارگذاری فلز فعال تست‌هایی در یک راکتور آزمایشگاهی انجام شد و نتایج آن گزارش شده است [۸]. با این حال، شرایط عملکرد کاتالیست در رانشگر با شرایط عملکرد کاتالیست در راکتور آزمایشگاهی متفاوت است. نحوه تزریق هیدرازین بر روی کاتالیست، نحوه بسته‌بندی کاتالیست‌ها<sup>۷</sup>، خلوص هیدرازین، دما و فشار در رانشگر با راکتور آزمایشگاهی تفاوت دارند. بنابراین، تست‌هایی با کاتالیست‌هایی با بارگذاری‌های مختلف ایریدیوم در رانشگر هیدرازینی انجام شد.

سه کاتالیست با درصد وزنی فلز فعال ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ برای تست آماده شدند. شش تست برای ارزیابی این کاتالیست‌ها تعریف شد: هر کاتالیست دو بار در رانشگر تست شد که تکرارپذیری نتایج نیز برآورد شود. بنابراین دو تست با کاتالیست ۱۰٪، دو تست با کاتالیست ۲۰٪ و دو تست با کاتالیست ۳۰٪ انجام شد. برای هر کاتالیست دو آزمون در دو روز متفاوت، با فاصله بیشتر از دو هفته انجام شد. در هر تست، از کاتالیست نو (مصرف نشده) استفاده شد. سعی شد که همه متغیرهای آزمون ثابت نگاه داشته شود. به ویژه، برای آن‌که نتایج قابل مقایسه باشد، روند آزمون در همه تست‌ها ثابت نگاه داشته شد.

در این مقاله، عملکرد کاتالیست‌هایی با درصد بارگذاری‌های مختلف فلز فعال با هم مقایسه می‌شوند. مقدار متوسط هر پارامتر

5 S-405  
6 Goto  
7 packing

1 Monopropellant  
2 Bipropellant  
3 Hydrazine  
4 Shell-405

جدول ۱. مشخصات رانشگر، پیشراشه و کاتالیست

اجزای رانشگر		
نوع مدل	شماره	قطعه
نمونه آزمایشگاهی	MONO-NLS1	بدنه
-	PN:N20PCVNS28	شیر
تک اریفیس با قطر ۰/۲۲ میلی‌متر	INJ-22-1	انژکتور
اتمسفیری با نسبت مساحت ۳	-	نازل
پیشراشه		
مقدار (mL)	درصد خلوص	پیشراشه
۵۰۰	٪ ۹۹/۸	هیدرازین

به منظور مقایسه میان کاتالیست‌های تولید شده و کاتالیست شناخته شده شل ۴۰۵، مشخصات آن‌ها در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۲. مشخصات کاتالیست مورد آزمون و کاتالیست شل ۴۰۵

تحقیق حاضر	شل ۴۰۵	کاتالیست
گاما آلومینا	گاما آلومینا	پایه کاتالیست
۳۰	۳۵-۳۰	درصد وزنی/ فلز فعال
کروی	کروی	شکل هندسی پایه
~۲	۱/۵ - ۳	قطر گرانول پایه (mm)
۲۰۰-۱۵۰	۱۶۰-۱۳۰	مساحت (m <sup>2</sup> /g)
۰/۳	۰/۳	حجم حفرات (cc/g)
۱۰-۸	۱۰	قطر حفرات (nm)

رانشگر آزمایش شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. این نسخه آزمایشگاهی رانشگر است و بنابراین حسگرهای دما و فشار، برای ارزیابی عملکرد، روی بدنه نصب شده‌اند. از جداساز حرارتی (قطعه استوانه‌ای سوراخ‌دار در شکل ۱) در این تست‌ها استفاده نشده است. به دلیل آن‌که تست‌ها در شرایط اتمسفری (فشار ۰/۸۹ بار) انجام شده، از نازل کوتاه با نسبت مساحت ۳ در این تست‌ها استفاده شده است.

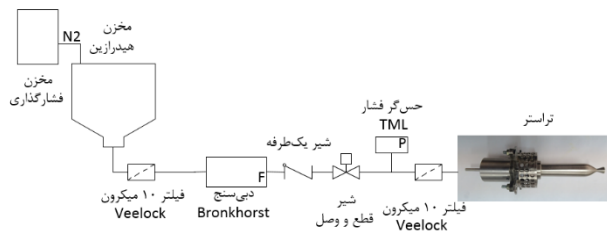
از دو آزمونی که برای هر کاتالیست انجام شده گزارش می‌شود. همچنین، بازه اطمینان مقدار میانگین جامعه محاسبه شده است. بازه اطمینان، یک ابزار آماری است که محدوده تغییر مقدار میانگین جامعه را با سطح اطمینان دلخواهی مشخص می‌کند. در واقع، به دلیل آن‌که تعداد تست‌های انجام شده محدود است، از این ابزار برای مشخص کردن محدوده احتمالی تغییر مقدار میانگین استفاده می‌شود. هدف اصلی، استفاده از بازه اطمینان آن است که مشخص شود آیا تغییرات مقدار میانگین پارامترها معنی‌دار هستند یا نه. در انتهای مقاله، مقدار میانگین پارامترهای عملکردی رانشگر، با فرض عدم تاثیر درصد وزنی فلز فعال، محاسبه و ارائه خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای ارزیابی اثر درصد وزنی ایریدیوم شش تست انجام شد:

- تست اول کاتالیست ۱۰٪، تاریخ ۹۷/۰۷/۰۳
- تست اول کاتالیست ۲۰٪، تاریخ ۹۷/۰۷/۰۸
- تست اول کاتالیست ۳۰٪، تاریخ ۹۷/۰۷/۱۱
- تست تکرار کاتالیست ۱۰٪، تاریخ ۹۷/۰۷/۲۵
- تست تکرار کاتالیست ۲۰٪، تاریخ ۹۷/۰۷/۲۲
- تست تکرار کاتالیست ۳۰٪، تاریخ ۹۷/۰۸/۰۷

در تمام شش تست بالا از یک رانشگر و یک پیشراشه استفاده شد. مشخصات رانشگر، پیشراشه و کاتالیست در جدول ۱ آمده است. در هر آزمون، نمونه آزمایشگاهی رانشگر تک‌پیشراشه هیدرازینی با مقدار ۵۰۰ میلی‌لیتر هیدرازین با خلوص بالا یک روند آزمون ثابت را پشت سر گذاشته است. همه اجزای رانشگر، شامل شیر رانشگر، در پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ساخته شده است. پیشراشه و پایه کاتالیست‌ها از شرکت‌های داخلی تهیه و پس از کنترل کیفیت استفاده شده‌اند. بارگذاری فلز فعال بر روی پایه کاتالیست‌ها و ارزیابی آزمایشگاهی کاتالیست نیز در پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی انجام شده است.



شکل ۳. شماتیک سامانه آزمون رانشگر

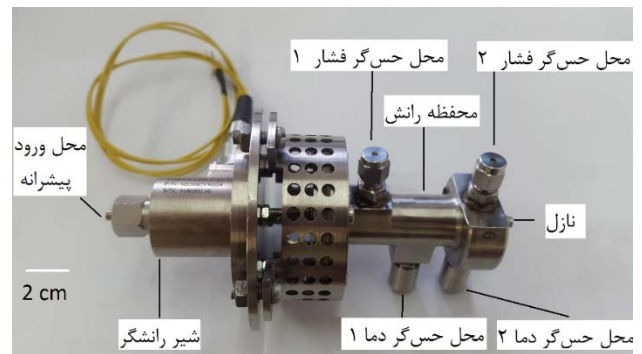
حسگرهای این آزمایش در جدول ۳ فهرست شده‌اند.

جدول ۳. حسگرهای استفاده شده در این تست

ردیف	نوع	مدل	محل نصب
۱	فشارسنج ۱	TML	ابتدای محفظه کاتالیست
۲	فشارسنج ۲	SB-P-3-G-1-0400	بعد از محفظه کاتالیست (قبل از نازل)
۳	فشارسنج	TML	پشت فیلتر
۴	ترموکوپل	Jumo- type k	روی بدنه شیر
۵	ترموکوپل	Jumo- type k	قسمت خارجی بدنه انژکتور
۶	ترموکوپل ۱	Jumo- type k	میانه محفظه کاتالیست
۷	ترموکوپل ۲	Jumo- type k	بعد از محفظه کاتالیست (قبل از نازل)
۸	لودسل	TML	پشت تراستر
۹	دبی‌سنج	Bronkhorst	بالادست در مسیر
۱۰	سیگنال شیر	-	شیر رانشگر

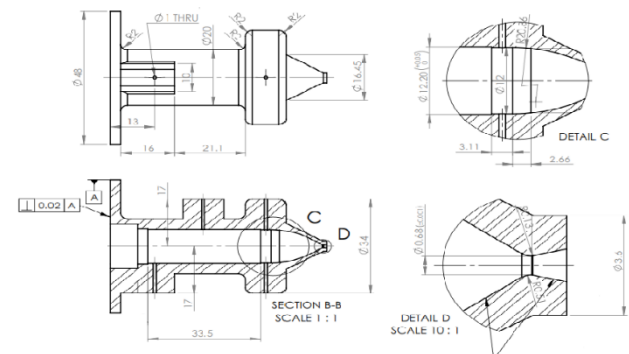
رانشگر بر روی یک میز عمودی به نام میز اندازه‌گیری تراستر درون یک محفظه بزرگ قرار داشت. وظیفه میز اندازه‌گیری تراستر، نگاه داشتن رانشگر بر روی لودسل برای اندازه‌گیری تراستر بود. به منظور اطمینان از صحت اندازه‌گیری لودسل، پیش از هر آزمون با استفاده از وزنه‌های استاندارد و بر اساس دستورالعمل موجود، کالیبراسیون لودسل بر روی سیستم انجام شد.

آنالیز تعیین عدم قطعیت پارامترهای عملکردی به دلیل خطا در ابزار اندازه‌گیری، برای این آزمون‌ها انجام شده است.



شکل ۱. رانشگر آزمایش شده

همچنین، نقشه رانشگر در شکل ۲ مشاهده می‌شود. قطر گلوگاه نازل ساخته شده برابر  $0.69$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. باقی ابعاد رانشگر ساخته شده در محدوده تolerانس نقشه ساخت قرار داشتند.



شکل ۲. نقشه رانشگر آزمایش شده

شماتیک مسیر تامین پیش‌رانه در شکل ۳ مشاهده می‌شود. فشارگذاری توسط مخزن پرفشار گاز نیتروژن و به کمک رگولاتور فشار انجام شد. فشار بالادست در آزمون‌ها روی حدود  $16/5$  بار تنظیم می‌شد. با توجه به تنظیم فشار بالادست و عدم تغییر فشار محفظه رانش در آزمون‌های مختلف، دبی پیش‌رانه در آزمون‌ها تقریباً ثابت بوده است. این موضوع را می‌توان در تغییر اندک نیروی تراست حالت پایا نیز مشاهده نمود که در ادامه ارائه شده است. همچنین، داده‌های دبی‌سنج ثبت شده نیز این موضوع را تایید می‌کنند. داده‌ها توسط دستگاه داده‌برداری با فرکانس  $1000$  هرتز ثبت شده است.

## ۱-۲ - روند آزمون‌ها

منظور از روند آزمون، برنامه زمانی است که در آن زمان باز و بسته شدن شیر رانشگر مشخص شده است. روند آزمون‌ها از پیش بر روی یک برد الکترونیکی برنامه‌ریزی شده بود. برای پنج آزمون نخست (تست کاتالیست ۱۰٪ و تکرار آن، تست کاتالیست ۲۰٪ و تکرار آن، و تست اول کاتالیست ۳۰٪) روند آزمون ثابت بود. روند این آزمون‌ها به صورت زیر بود:

- (۱) ۵ ثانیه روشن
- (۲) ۵۰ ثانیه خاموش
- (۳) ۲۰۰ ثانیه روشن
- (۴) ۱۰ ثانیه خاموش
- (۵) ۳۰ ثانیه روشن
- (۶) ۱۰ ثانیه خاموش
- (۷) ۳۰ ثانیه روشن
- (۸) ۱۰ ثانیه خاموش
- (۹) ۳۰ ثانیه روشن
- (۱۰) ۱۰ ثانیه خاموش
- (۱۱) ۳۰۰ ثانیه روشن
- (۱۲) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۲ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪
- (۱۳) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪
- (۱۴) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۲۰٪
- (۱۵) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۰/۴ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪
- (۱۶) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۰/۲ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪
- (۱۷) ۳۰ ثانیه خاموش
- (۱۸) ۲۰۰ ثانیه روشن

تنها در تست تکرار کاتالیست ۳۰٪ وزنی (تست ششم)، ۵۰۰ پالس با عرض یک ثانیه و سیکل‌های کاری کمتر از ۱۰٪ به روند تست، بین گام‌های ۱۶ و ۱۷ فهرست بالا، اضافه شد تا کمترین ضربه جزئی مطالعه شود. این اختلاف تغییری در نتایج حالت پایا -مربوط به گام‌های ۱ تا ۱۱- ایجاد نمی‌کند. در این مقاله تنها عملکرد حالت پایا پرداخته می‌شود. وجود پالس‌های کوتاه تنها ممکن است بر خردشدگی و اتلاف کاتالیست -در بخش عمر مقاله حاضر- تاثیر بگذارد.

دقت ابزار استفاده شده در جدول ۴ فهرست شده است. زمان پاسخ حسگرها نیز در جدول ۴ آمده است. در مورد زمان‌ها باید توجه داشت که فرکانس داده‌برداری ۱۰۰۰ هرتز بود.

جدول ۴. دقت ابزار استفاده شده در آزمایش جاری

پارامتر	حسگر	دقت (RO%)	زمان پاسخ (میلی ثانیه)
فشار محفظه تراست	Smart Bien	۰/۳	۳۰
فشار محفظه‌ی کاتالیست	TML	۰/۴	۱
دبی	Bronkhorst	۰/۲	۵۰
تراست	TML	۰/۵	۵
قطر گلوگاه نازل	VMM	۰/۰۰۱ میلی‌متر	-

عدم قطعیت هر پارامتر عملکردی تابعی از عدم قطعیت متغیرهایی است که با آن محاسبه می‌شود. برای مثال، سرعت مشخصه با رابطه ۱ از فشار محفظه، دبی و مساحت گلوگاه محاسبه می‌شود. عدم قطعیت سرعت مشخصه از رابطه زیر به دست می‌آید:

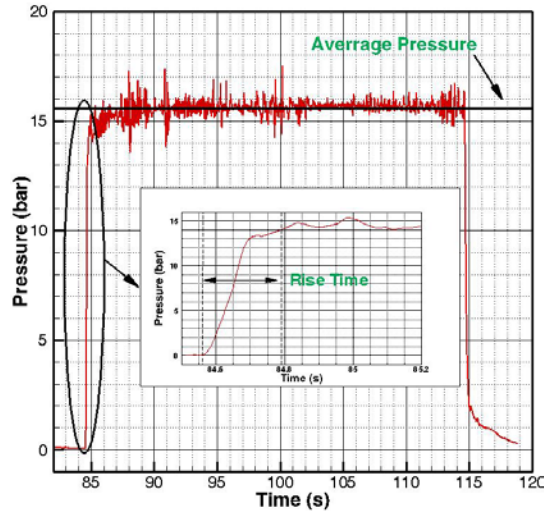
$$u_{c^*} = \sqrt{u_{p_c}^2 + u_A^2 + u_m^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

عدم قطعیت پارامترهای عملکردی اصلی در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵. عدم قطعیت پارامترهای محاسبه شده بر حسب درصد

پارامتر	عدم قطعیت (درصد)
مساحت گلوگاه	۰/۳
سرعت مشخصه	۰/۵
ضریب تراست	۰/۷
ضربه ویژه	۰/۵

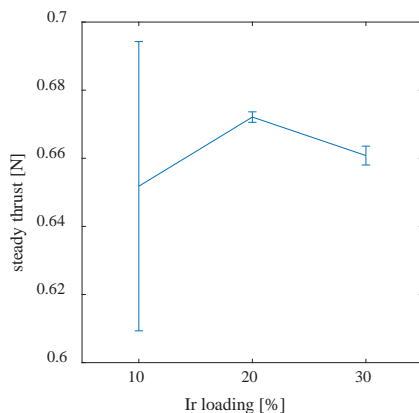
### ۳- نتایج و بحث



شکل ۴. منحنی فشار آزمون شماره ۳

#### ۳-۱ - تراست

تراست اندازه‌گیری شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود. میانگین تراست حالت پایا برای کاتالیست‌هایی با درصد وزنی‌های مختلف تنها ۰/۰۲ نیوتن تغییر کرده است. تراست در دو تستی که با کاتالیست ۱۰٪ انجام شد تغییر بزرگی کرده و به همین دلیل بازه اطمینان برای تراست میانگین کاتالیست ۱۰٪ نسبتاً بزرگ است. با این حال، میانگین تراست در تست‌های تکرار کاتالیست‌های ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی ایریدیوم بسیار نزدیک به میانگین تراست در تست اول‌شان بود. بازه اطمینان ۸۰٪ برای تراست متوسط در ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی کوچک‌تر از عدم قطعیت لودسل است؛ دقت لودسل ۰/۱۵٪ بود.

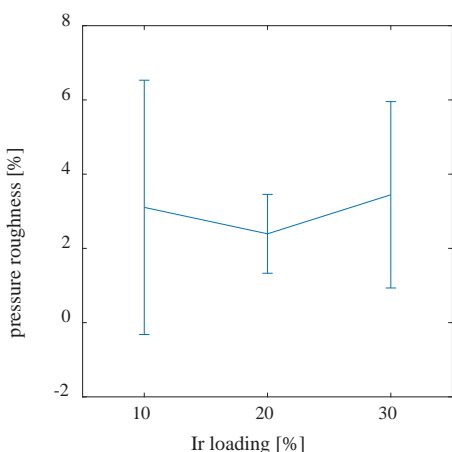


شکل ۵. تراست حالت پایا برای درصد وزنی‌های مختلف فلز فعال

در این بخش پارامترهای عملکردی کاتالیست‌هایی با درصد وزنی‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. برای به دست آوردن پارامترهای عملکردی به صورت زیر عمل شده است. ابتدا در هر تست، نتایج حالت پایا توسط یک کد در محیط متلب<sup>۱</sup> استخراج شد. متوسط زمانی فشار، دبی و تراست در هر پالس محاسبه شده است. پارامترهای عملکردی شامل ضربه ویژه و سرعت مشخصه با استفاده مقادیر متوسط تراست، دبی و فشار محاسبه شدند. همچنین نوسان فشار از داده‌های فشار محاسبه شد. سپس میانگین هر متغیر به عنوان مقدار میانگین آن آزمون ثبت شد. این فرایند استخراج داده‌ها برای همه تست‌ها انجام شد. هر درصد وزنی ایریدیوم دو بار در رانشگر تست شده است. بنابراین، مقدار میانگین هر پارامتر برای هر کاتالیست از میانگین‌گیری دو تست به دست آمده است. برای نمونه ضربه ویژه گزارش شده برای کاتالیست ۱۰٪، میانگین ضربه ویژه متوسط دو آزمون (آزمون‌های شماره ۱ و ۴) است. همچنین، بازه اطمینان<sup>۲</sup> مقدار میانگین گزارش می‌شود.

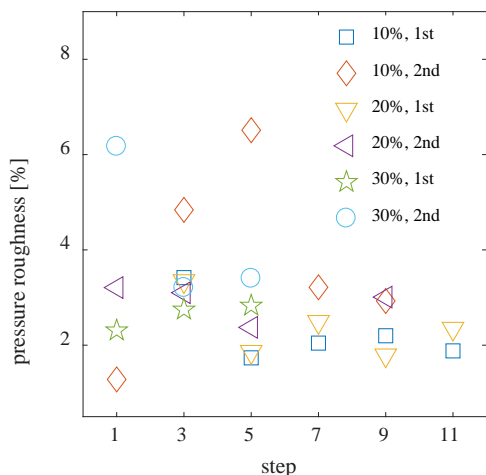
در ادامه، مقادیر به دست آمده برای پارامترهای هدف در مرحله حاضر پروژه ارائه می‌شود. پارامترهای هدف عبارتند از تراست، نوسان فشار و ضربه ویژه و عمر کاتالیست. همچنین، نتایج سرعت مشخصه ارائه می‌شود.

در شکل ۴، منحنی فشار آزمون شماره ۳ برای نمونه آورده شده است.



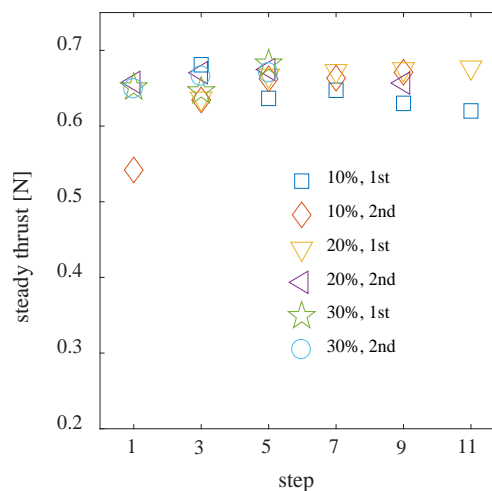
شکل ۷. زبری فشار محفظه برای درصد‌های مختلف فلز فعال

برای ارائه شهودی بهتر از داده‌های واقعی، زبری فشار در گام‌های ۱ تا ۱۱ همه آزمون‌ها در شکل ۸ رسم شده است. هر نقطه در شکل ۸، زبری فشار در یک گام از یک آزمایش را نشان می‌دهد. داده‌های آزمون‌های مختلف توسط نمادهای رنگی از هم جدا شده‌اند. زبری فشار برای همه کاتالیست‌ها به طور عمده کمتر از  $\pm 4$  درصد فشار میانگین بود.



شکل ۸. زبری فشار در گام‌های ۱ تا ۱۱ همه تست‌های کاتالیست‌ها

تراست متوسط همه تست‌ها در شکل ۶ مشاهده می‌شود. هر نقطه در شکل ۶، تراست متوسط در یک گام از یک آزمایش را نشان می‌دهد. داده‌های آزمون‌های مختلف توسط نمادهای رنگی از هم جدا شده‌اند. برای رسم شکل ۵، تنها از داده‌های مربوط به گام‌های ۵ تا ۹ استفاده شده است؛ در این بخش از آزمون، رانشگر کاملاً گرم شده بود و عرض پالس‌ها نیز یکسان (۳۰ ثانیه) بود.



شکل ۶. تراست متوسط در گام‌های ۱ تا ۱۱ همه آزمون‌ها

## ۲-۳ - نوسان فشار

زبری فشار<sup>۱</sup> به صورت نسبت تفاضل میانگین فشار بیشینه از میانگین فشار کمینه بخش بر فشار متوسط تعریف شده است [۹]. تغییرات میانگین زبری فشار برای درصد وزنی‌های مختلف فلز فعال به همراه بازه اطمینان ۸۰٪ در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با اطمینان ۸۰٪ می‌توان گفت که نوسان فشار برای همه این کاتالیست‌ها کمتر از  $\pm 7$  درصد فشار میانگین خواهد بود. با این وجود با استفاده از داده‌های این تست‌ها نمی‌توان با اطمینان از تفاوت زبری فشار برای این سه کاتالیست صحبت کرد زیرا بازه اطمینان ۸۰٪ برای هر کاتالیست بزرگ‌تر از محدوده تغییرات مقادیر میانگین زبری فشار است.



### ۳-۳ - سرعت مشخصه

سرعت مشخصه نشان دهنده موفقیت کاتالیست در تولید گاز گرم از پیشرانه مایع ورودی است. بنابراین، سرعت مشخصه پارامتر مهمی است. در اینجا سرعت مشخصه با استفاده از قطر گلوگاه در حالت گرم  $A_{tH}$ ، فشار مطلق محفظه  $p_c$  و دبی پیشرانه  $\dot{m}$  محاسبه شده است [1]:

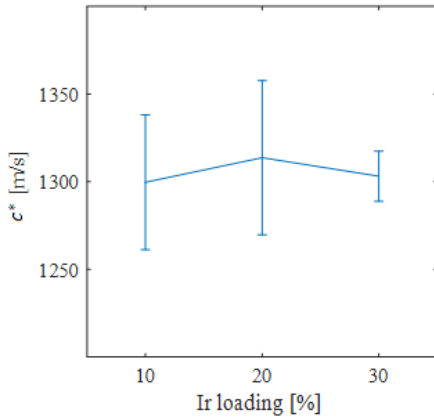
$$c^* = \frac{p_c A_{tH}}{\dot{m}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

مساحت گلوگاه در حالت گرم از رابطه زیر حساب شده است [۹]:

$$A_{tH} = \frac{\pi d^2}{4} 0.9925 \left[ 1 + 2\alpha(T_N - T_{ref}) \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

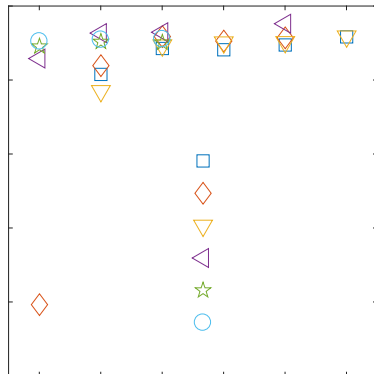
در رابطه بالا،  $d$  قطر گلوگاه سرد (در دمای مرجع)،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی خطی نازل،  $T_N$  دمای نازل و  $T_{ref}$  دمای مرجع - دمای اندازه گیری  $d$  است. دمای نازل از داده های تست خوانده شده و در واقع دمای گاز قبل از قسمت همگرای نازل است. ضریب انبساط خطی مواد خود تابعی از دما است. در اینجا ضریب انبساط حرارتی استیل ۳۱۶ (جنس بدنه و نازل) در دمای حالت پایا  $1/9 \times 10^{-5}$  بر کلون در نظر گرفته شده است [۹].

سرعت مشخصه میانگین به همراه بازه اطمینان ۸۰٪ برای بارگذاری های مختلف فلز فعال در شکل ۹ رسم شده است. باز هم، با استفاده تنها از نتایج این آزمون ها، با اطمینان بالایی نمی توان در مورد تغییر سرعت مشخصه رانشگر برای کاتالیست هایی با درصد های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ نظر داد. با این وجود مشخص است که مقدار میانگین سرعت مشخصه برای همه کاتالیست ها حدود ۱۳۰۰ متر بر ثانیه بوده است. با اطمینان ۸۰٪ می توان گفت که سرعت مشخصه رانشگر بین ۱۲۶۰ متر بر ثانیه و ۱۳۳۵ متر بر ثانیه خواهد بود.



شکل ۹. سرعت مشخصه برای درصدهای مختلف فلز فعال

سرعت مشخصه متوسط برای همه گام های بلند هر ۶ تست در شکل ۱۰ مشاهده می شود. در گام هایی که رانشگر کاملاً گرم شده (گام ۵ به بعد)، سرعت مشخصه متوسط برای همه کاتالیست ها بین ۱۲۸۵ متر بر ثانیه تا ۱۳۳۰ متر بر ثانیه بود.



شکل ۱۰. سرعت مشخصه میانگین در گام های بلند همه تست ها

### ۳-۴ - ضربه ویژه

ضربه ویژه  $I_s$  نسبت نیروی تراست  $F$  به دبی جرمی پیشرانه است:

$$I_s = \frac{F}{\dot{m} g_0} \quad \text{رابطه (۴)}$$

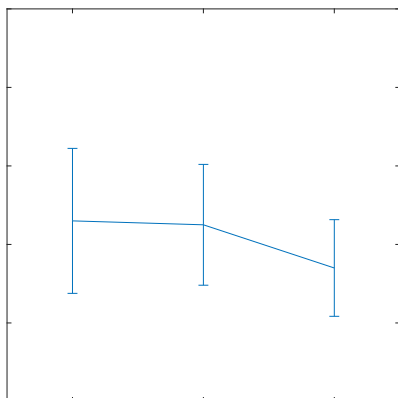
در رابطه بالا،  $g_0$  شتاب گرانش زمین در سطح دریای آزاد است. ضربه ویژه میانگین برای سه کاتالیست تست شده به همراه

### ۵-۳- عمر

در این بخش، تغییر وزن کاتالیست پس از تست و میزان خردشدگی آن به عنوان معیاری برای عمر رانشگر بررسی می‌شود.

#### ۵-۳-۱- خردشدگی

پس از انجام هر تست، مقداری از کاتالیستی که از محفظه رانشگر خارج می‌شود خرد شده است. نسبت وزن این کاتالیست‌های خرد شده به مقدار کاتالیستی که از ابتدا بارگذاری شده بود، میزان خردشدگی را مشخص می‌کند. این پارامتر برای شش تست انجام شده در شکل ۱۳ رسم شده است. مقدار میانگین خردشدگی با افزایش بارگذاری فلز فعال اندکی کاهش یافته است، با این حال با اطمینان بالایی نمی‌توان این رفتار را تعمیم داد و تکرارپذیر دانست.

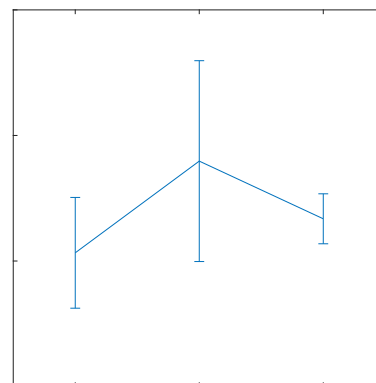


شکل ۱۳. خردشدگی کاتالیست‌ها برای سه درصد وزنی تست شده

#### ۵-۳-۲- اتلاف

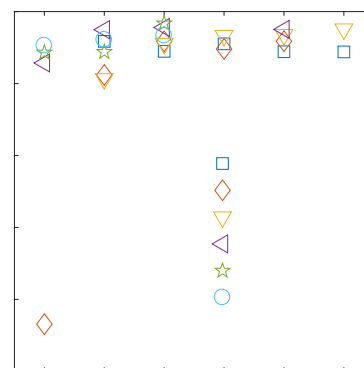
منظور از اتلاف<sup>۱</sup>، اختلاف وزن کاتالیست اولیه و کاتالیست باقی‌مانده در محفظه پس از تست است. به عبارت دیگر، پس از دمونتاز رانشگر، کل کاتالیست باقی‌مانده شامل کاتالیست‌های خرد شده وزن شد، و نسبت وزن اندازه‌گیری شده به وزن کاتالیست بارگذاری شده به عنوان اتلاف جرمی کاتالیست ثبت شده است. اتلاف نشان دهنده میزانی از کاتالیست است که توسط جریان شسته شده یا بعد از خرد شدن از نازل خارج شده است. میزان

بازه اطمینان ۸۰٪ در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مقدار میانگین ضربه ویژه بین ۱۴۰ تا ۱۴۴ ثانیه تغییر کرده است. به دلیل بزرگ بودن بازه‌های اطمینان نسبت به تغییرات مقادیر میانگین، نمی‌توان با اطمینان راجع به رفتار ضربه ویژه با تغییر درصد وزنی فلز فعال کاتالیست اظهار نظر کرد.



شکل ۱۱. ضربه ویژه میانگین برای سه درصد وزنی تست شده

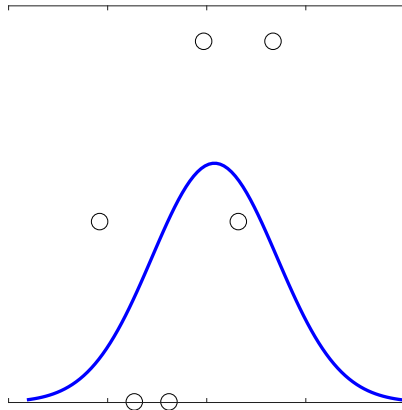
ضربه ویژه متوسط در گام‌های بلند هر ۶ تست انجام شده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. به طور کلی ضربه ویژه بین ۱۳۶ تا ۱۴۷ ثانیه تغییر کرده است. تنها یک نقطه پرت وجود دارد که مربوط به گام اول تست دوم از کاتالیست ۱۰٪ وزنی است. به نظر می‌رسد سرد بودن کاتالیست‌ها و رانشگر علت پایین بودن ضربه ویژه در آن پالس بود.



شکل ۱۲. ضربه ویژه متوسط در گام‌های بلند آزمایش‌های کاتالیست

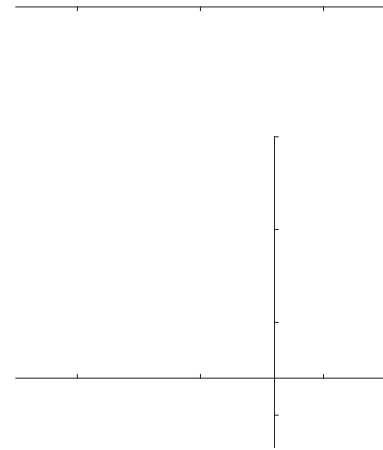
### ۱-۶-۳- تراست

توزیع تراست به دست آمده از شش تست رانشگر به همراه توزیع نرمال برازش شده در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. تراست میانگین رانشگر ۰/۶۶ نیوتن و بازه اطمینان ۰/۹۵٪ آن ۰/۶۵ تا ۰/۶۷ نیوتن و انحراف معیار تراست ۰/۰۱ نیوتن محاسبه شد.



شکل ۱۵. تراست در شش تست

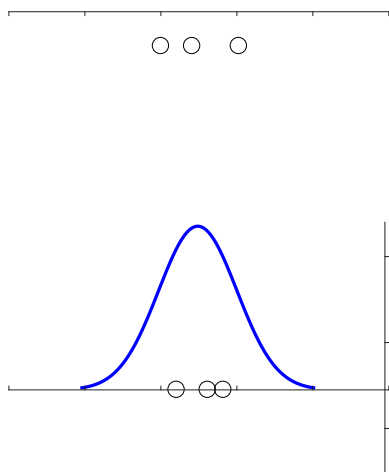
اتلاف جرمی کاتالیست‌هایی با مقدار متفاوت بارگذاری فلز فعال در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. با استفاده از داده‌های این تست‌ها نمی‌توان با اطمینان بالایی تفاوت کاتالیست‌هایی با درصد وزنی مختلف را از نظر اتلاف جرمی تعیین کرد. با این حال، با اطمینان ۸۰٪ می‌توان گفت که اتلاف همه کاتالیست در تست‌های مشابه کمتر از ۰/۶٪ وزن اولیه خواهد بود.



شکل ۱۴. اتلاف جرمی در تست‌های گرم

### ۲-۶-۳- نوسان فشار

زبری فشار رانشگر در شش تست به همراه توزیع نرمال برازش شده در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. زبری فشار میانگین شش تست ۳٪ و بازه اطمینان ۰/۹۵٪ آن از ۰/۲٪ تا ۰/۴٪ به دست آمده است. انحراف معیار زبری فشار، ۰/۱٪ محاسبه شده است.



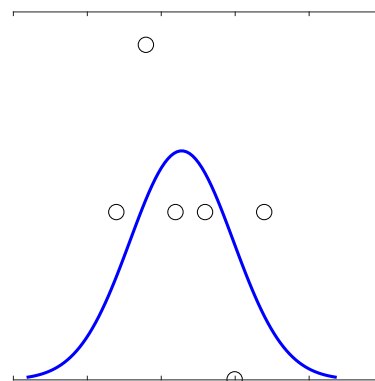
شکل ۱۶. توزیع زبری فشار به دست آمده از شش تست

### ۳-۶-۳- رانشگر

همان‌طور که در بخش‌های پیشین مشاهده شد، تقریباً برای همه پارامترها، بازه اطمینان ۸۰٪ مقدار میانگین هر کاتالیست، مقدار میانگین حاصل از دو آزمایش دو کاتالیست دیگر را پوشش می‌دهد. بنابراین، با استفاده تنها از نتایج این آزمون‌ها، نمی‌توان با اطمینان مناسبی تغییر عملکرد رانشگرها به دلیل استفاده از کاتالیست‌هایی با ۰/۱۰٪، ۰/۲۰٪ و ۰/۳۰٪ وزنی ایریدیوم را پیش‌بینی نمود. فرض دیگر می‌تواند این باشد که این کاتالیست‌ها از نظر عملکرد حالت پایا و در روند تست شده با هم تفاوتی ندارند. با فرض گفته شده می‌توان مقادیر متوسط هر پارامتر عملکردی این رانشگر را با سطح اطمینان بالایی تخمین زد. در ادامه، محدوده به دست آمده برای پارامترهای عملکردی تراستر با فرض گفته شده ارائه می‌شود.

### ۳-۶-۳- سرعت مشخصه

فراوانی مقادیر به دست آمده سرعت مشخصه در شش تست به همراه توزیع نرمال برازش شده در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. سرعت مشخصه میانگین رانشگر در این تست‌ها ۱۳۰۶ متر بر ثانیه بود. بازه اطمینان ۹۵٪ سرعت مشخصه رانشگر ۱۲۹۱ متر بر ثانیه تا ۱۳۲۰ متر بر ثانیه به دست آمده است. انحراف معیار سرعت مشخصه نیز ۱۴ متر بر ثانیه بود.



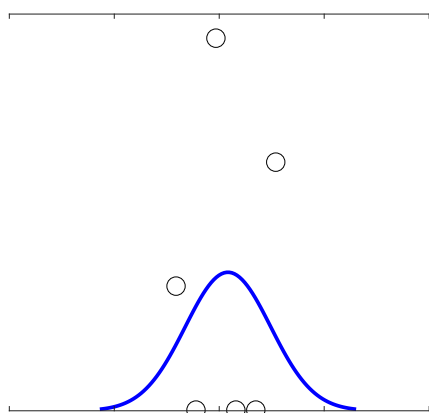
شکل ۱۷. فراوانی سرعت مشخصه در شش تست

### ۳-۷-۳- عمر

در این قسمت داده‌های مربوط به عمر رانشگر، یعنی میزان سالم ماندن کاتالیست پس از تست، ارائه می‌شود.

#### ۳-۷-۱- خردشستگی

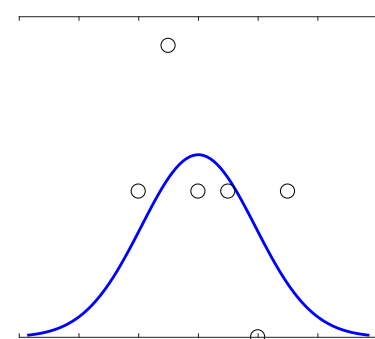
میزان خردشستگی اندازه‌گیری شده در شش تست به همراه توزیع نرمال برازش شده بر داده‌ها در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده ۲/۱٪ و انحراف معیار آن‌ها ۰/۱۴٪ بود. بازه اطمینان ۹۵٪ برای خردشستگی کاتالیست ۱/۷٪ تا ۲/۱۵٪ برآورد می‌شود.



شکل ۱۹. توزیع خردشستگی کاتالیست‌ها در شش تست

### ۳-۶-۴- ضربه ویژه

مقادیر به دست آمده برای ضربه ویژه در شش تست رانشگر به همراه توزیع نرمال برازش شده در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. ضربه ویژه میانگین رانشگر ۱۴۲ ثانیه و بازه اطمینان ۹۵٪ آن ۱۴۰ ثانیه تا ۱۴۴ ثانیه محاسبه شده است. همچنین، انحراف معیار استاندارد ضربه ویژه برابر ۱/۹ ثانیه به دست آمده است.



شکل ۱۸. توزیع تکرار ضربه ویژه در شش تست

#### ۳-۷-۲- اتلاف

توزیع فراوانی اتلاف کاتالیست در تست‌های انجام شده در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود. میانگین اتلاف جرمی در شش تست انجام شده ۳/۶ درصد و انحراف معیار داده‌ها ۰/۹٪ بود. بازه اطمینان ۹۵٪ برای میانگین خردشستگی جامعه ۲/۷٪ تا ۴/۵٪ تخمین زده می‌شود.

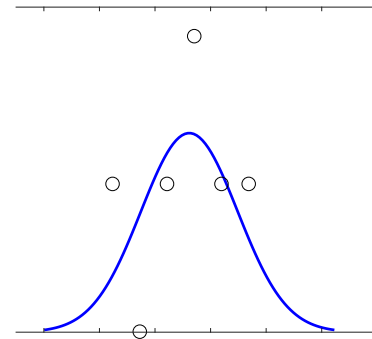
از طرفی عملکردی رانشگر با استفاده از همه این کاتالیست‌ها مناسب ارزیابی می‌شود.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### مراجع

- [1] H. Jung, J. H. Kim and J. S. Kim, "Test and Evaluation of a 70 N-class Hydrazine Thruster for Application to the Precise Attitude Control of Space Vehicles," in *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, San Jose, CA, 2013.
- [2] T. W. Price and D. D. Evans, "The Status of Monopropellant Hydrazine Technology," NASA, JPL, Pasadena (USA), 1968.
- [3] P. McRight, C. Popp, C. Pierce, A. Turpin and W. Urba, "Confidence testing of shell-405 and s-405 catalysts in a monopropellant hydrazine thruster," in *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tucson, 2005.
- [4] D. Goto, H. Kagawa, S. Murayama, K. Kajiwara, H. Ikeda, N. Shinozaki and E. Yabuhara, "Endurance Firing Test Results of the Long Life 1N Hydrazine Thruster," in *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, California, 2011.
- [5] ش. قنبری پاکدهی، م. رسولزاده اسدی و ع. اسدی، «جایگاه آلومینا به عنوان پایه بهینه در ساختار کاتالیست تجزیه هیدرازین»، در همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی، تهران، ۱۳۹۲.
- [6] K.-W. Yao, S. Jaenicke, J.-Y. Lin and K. Tan, "Catalytic decomposition of nitrous oxide on grafted CuO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts," *Applied Catalysis B*, vol. 16, no. 3, p. 291, 1998.
- [7] I. Jang, H. Shin, N. Shin, S. Kim, S. Ki and S. Cho, "Macroporous-mesoporous alumina supported iridium catalyst for hydrazine decomposition," *Catalysis Today*, vol. 185, no. 1, p. 198, 2012.
- [8] Z. Amirsardari, A. Dourani, M. A. Amirifar and N. Ghadiri Massoom, "Comparative characterization of iridium loading on catalyst assessment under different conditions," *International Journal of*



شکل ۲۰. اتلاف جرمی کاتالیست در شش تست

### ۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از مجموع شش تست انجام شده، پارامترهای عملکردی رانشگر تخمین زده شد. مقدار میانگین تراست ۰/۶۶ نیوتن، زبری فشار ۰/۳، سرعت مشخصه ۱۳۰۶ متر بر ثانیه، ضربه ویژه ۱۴۲ ثانیه، خردشدگی ۰/۲۱٪ و اتلاف کاتالیست ۰/۳۱٪ به دست آمد. بازه اطمینان ۹۵٪ برای تراست، سرعت مشخصه و ضربه ویژه در محدوده کمتر از  $\pm 2$  درصد مقادیر متوسط قرار دارد. بنابراین، با اطمینان بالایی می‌توان مقدار متوسط این سه پارامتر کلیدی را گزارش نمود. بازه اطمینان ۹۵٪ برای نوسان فشار، خردشدگی و اتلاف به طور نسبی بزرگ است؛ بین  $\pm 19\%$  تا  $\pm 33\%$  مقدارهای متوسط. با این حال حد بالای این بازه‌ها نیز پیش‌بینی رضایت‌بخشی از مقدارهای میانگین پارامترهای مربوطه به دست می‌دهد.

به طور کلی با توجه به نتایج تست تراستری هر سه درصد وزنی، نکات زیر دریافت شد:

- میزان ثابت خردشدگی در هر سه درصد وزنی
  - عدم تغییر حجم بستر کاتالیستی در هر سه درصد وزنی
  - کمترین میزان اتلاف وزن در ۳۰ درصد وزنی
  - میران تقریباً ثابت نوسانات فشار در هر سه درصد وزنی
- بنابراین، با توجه به کاهش اتلاف وزن در کاتالیست ۳۰ درصد وزنی و ثابت ماندن تقریبی سطح آن مشابه با ۲۰ درصد وزنی، این درصد وزنی به عنوان کاتالیست بهینه انتخاب می‌شود.
- در مجموع با تست‌های انجام شده نمی‌توان بین کاتالیست‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی ایریدیوم تفاوت چشمگیری در نظر گرفت.

*Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, pp. 1-7, 2021.

- [9] B. W. Schmitz and W. W. Wilson, "Long Life Monopropellant Hydrazine Engine Development Program," Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards, California, 1971.



#### COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)