



### Article Info

Received: 2022-1-17  
Accepted: 2022-2-20

### Keywords

Monopropellant,  
Hydrazine, Thruster,  
Catalyst

### How to cite this article

Mohamad Ali Amirifar,  
Alireza Rajabi,  
“Experimental  
Investigation of the  
Performance of a  
Monopropellant  
Hydrazine Thruster in  
Atmospheric Conditions”,  
*Journal of Space Science,  
Technology and  
Applications*, vol 1 (2), p.:  
126-137, 2022.

## Experimental Investigation of the Performance of a Monopropellant Hydrazine Thruster in Atmospheric Conditions

Mohamad Ali Amirifar<sup>\*,1</sup>, Alireza Rajabi<sup>2</sup>, Nooredin Ghadiri Masoom<sup>3</sup>, Zahra  
Amirsardari<sup>4</sup>, Majid Kamranifar<sup>5</sup>

- 1,\*. Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran, ,  
Corresponding author, ma.amirifar@isrc.ac.ir
2. Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran,  
alirezaarajabi@gmail.com
3. Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran,  
n.ghadiri@isrc.ac.ir
4. Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran,  
amirsardari@ut.ac.ir
5. Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran,  
majidkamranifar@gmail.com

### Abstract

In this research, the performance of a monopropellant hydrazine thruster in atmospheric conditions has been investigated experimentally. For this purpose, after designing and constructing the thruster according to the functional requirements of the thruster, a test was designed and after that, the desired thruster was tested in atmospheric conditions. The test results show that the tested thruster can generate 2000 pulses with a width of 0.5 seconds and a periodicity of one second with reproducibility. It was shown that the life of this thruster is more than 2000 pulses and the thruster was able to produce very small beats of 3 mNS in reproducibility. Also, comparing the results of the current thruster sample with the experimental results of other thrusters showed how by selecting the appropriate dimensions for the injector, catalyst chamber and nozzle, the characteristics of pressure rise time, minimum impulse, pulse centroid and pressure drop time in the Thruster can be well controlled. Reducing the injector diameter (by keeping the flow rate constant by increasing the injection pressure) reduces the impulse (within a constant pulse width) and increases the pressure rise time. Reducing the dimensions of the catalyst chamber also reduces the increase and decrease time of the pressure, resulting in a smaller pulse centroid.



## بررسی تجربی عملکرد یک تراستر تک‌پیشراشه هیدرازینی در شرایط اتمسفریک

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

۱. \*پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، ma.amirifar@isrc.ac.ir  
(نویسنده مسئول)

۲. پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، alirezaarajabi@gmail.com

۳. پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، n.ghadiri@isrc.ac.ir

۴. پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، amirsardari@ut.ac.ir

۵. پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران، پژوهشگاه فضایی ایران، majidkamranifar@gmail.com

دو فصلنامه

علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۱۳۷-۱۲۶  
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

دسترسی پذیر در نشانی:  
[Journal.isrc.ac.ir/article\\_146829.html](http://Journal.isrc.ac.ir/article_146829.html)

DOI:

10.22034/jssta.2022.325135.1047

### چکیده

در این پژوهش عملکرد یک تراستر تک‌پیشراشه هیدرازینی در شرایط اتمسفریک به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، پس از طراحی و ساخت تراستر با توجه به الزامات عملکردی تراستر، آزمونی طراحی شد و پس از آن، تراستر مورد نظر در شرایط اتمسفریک مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمون نشان می‌دهد که تراستر آزمایش شده می‌تواند ۲۰۰۰ پالس با عرض ۰/۵ ثانیه و دوره تناوب یک ثانیه را به صورت تکرارپذیری تولید کند. همچنین نتایج نشان داد که عمر این تراستر بیش از ۲۰۰۰ پالس است و تراستر توانسته است ضربه‌هایی بسیار کوچک به اندازه ۳ میلی‌نیوتن ثانیه را به صورت تکرارپذیری تولید کند. مقایسه نتایج نمونه تراستر فعلی با نتایج تجربی تراسترهای دیگر نیز نشان داد که چگونه با انتخاب ابعاد مناسب برای انژکتور، محفظه کاتالیست و نازل می‌توان مشخصات زمان افزایش فشار، کمترین ضربه، مرکز پالس و زمان افت فشار در تراستر را به خوبی کنترل کرد. کاهش قطر انژکتور (با ثابت نگاه‌داشتن دبی پایا با افزایش فشار تزریق)، سبب کاهش ضربه تولیدی (در عرض پالس ثابت) و افزایش زمان رشد فشار می‌شود. کوچک کردن ابعاد محفظه کاتالیست نیز سبب کاهش زمان افزایش و افت فشار و در نتیجه کوچک شدن مرکز پالس می‌شود.

### تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

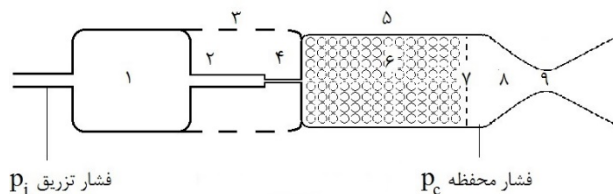
### واژه‌های کلیدی

تراستر، تک پیشراشه، هیدرازین،  
کاتالیست، رانشگر

### نحوه استناد به این مقاله

محمدعلی امیری فر، علیرضا رجبی،  
"بررسی تجربی عملکرد یک تراستر  
تک‌پیشراشه هیدرازینی در شرایط  
اتمسفریک، دو فصلنامه علوم، فناوری  
و کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره  
دوم، صفحات ۱۲۶-۱۳۷، ۱۴۰۰.

## ۱- مقدمه



شکل ۱. طرح تراستر تک‌پیشران هیدرازینی. ۱- شیر تراستر، ۲- لوله مویین، ۳- جداساز حرارتی، ۴- انژکتور، ۵- محفظه کاتالیست، ۶- کاتالیست‌ها، ۷- صفحه نگاه‌دارنده، ۸- محفظه رانش، ۹- نازل

ارن<sup>۱</sup> و همکارش در سال ۲۰۰۰ میلادی، عملکرد یک تراستر تک‌پیشران هیدرازینی تقویت شده با محدوده نیروی رانش ۰/۴ تا ۱ نیوتن را ارزیابی نمودند [۴]. هو<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی با ارائه یک مدل نظری، فرایند تجزیه حالت پایای پیشران‌های مایع در تراسترهای تک‌پیشران را تحلیل و نتایج آن را با مطالعه تجربی تجزیه هیدرازین در بستر کاتالیست اعتبارسنجی نمودند [۵]. کیم<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی، با استفاده از نتایج تست گرم یک تراستر تک‌پیشران هیدرازینی ۷۰ نیوتنی، پارامترهای عملکردی نظیر فشار، دما و دبی جرمی را برحسب مقادیر مختلف طول مشخصه محفظه تراستر ارزیابی نمودند [۶]. اشمیت<sup>۴</sup> و ویلسون<sup>۵</sup> تغییرات فشار بیشینه یک تراستر تک‌پیشران هیدرازینی را بر حسب طراحی انژکتور، شرایط کاری (دما و فشار تغذیه)، سیکل کاری و عرض پالس گزارش کرده‌اند [۷]. همچنین مرکز پالس برای پالس‌هایی با دوره تناوب و سیکل کاری‌های مختلف را نیز گزارش کرده‌اند. موینیهان<sup>۶</sup> سه تراستر تک‌پیشران هیدرازینی ۰/۴۵ نیوتنی را مورد آزمایش قرار داده و نتایجی از قبیل ضربه نرمال‌شده با تراستر نامی را گزارش کرده است [۸].

طراحی، توسعه و ساخت تراسترهای فضایی یکی از ماموریت‌های پژوهشگاه فضایی ایران است. یکی از پروژه‌هایی که در این راستا تعریف شده است، ساخت یک تراستر تک‌پیشران هیدرازینی با سطح نیروی رانش نامی یک نیوتن (در شرایط خلا) است. در این راستا، یک تراستر تک‌پیشران هیدرازینی برای آزمون در محیط اتمسفریک طراحی و ساخته شد. تمامی اجزای این تراستر، در پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی ایران و

تراسترها یکی از ابزارهای مورد نیاز در کنترل وضعیت، اصلاح و انتقال مداری ماهواره‌ها هستند و نقش اساسی در به نتیجه رسیدن اهداف عملیاتی یک ماهواره دارند، زیرا اولین قدم در راستای انجام ماموریت ماهواره رسیدن به موقعیت و وضعیت پیش‌بینی شده است. تراسترها دارای انواع مختلفی همچون شیمیایی و الکتریکی هستند. تراسترهای شیمیایی به انواع سوخت جامد، گاز سرد، تک‌پیشران و دوپیشران تقسیم می‌شوند. انتخاب تراستر برای یک ماموریت فضایی به سطح آمادگی فناوری، الزامات ماموریتی و سیستمی و ملاحظات دیگر وابسته است. تراسترهای تک‌پیشران، ضربه ویژه بالاتری نسبت به تراسترهای گاز سرد دارند و از طرفی نسبت به تراسترهای دوپیشران ساده‌تر و دارای قابلیت اطمینان بالاتر هستند [۱]. تراسترهای تک‌پیشران در بسیاری از ماموریت‌های فضایی استفاده شده و همچنان نیز کاربرد دارند.

در تراسترهای تک‌پیشران، با خروج گاز داغ حاصل از تجزیه کاتالیستی پیشران مایع از نازل نیروی پیشران تولید می‌شود. اجزای یک تراستر تک‌پیشران عبارتند از شیر تراستر، لوله مویین و جداساز حرارتی، انژکتور، محفظه کاتالیست، کاتالیست‌ها، صفحه جداکننده، محفظه رانش و نازل (شکل ۱). پیشران در تراسترهای تک‌پیشران می‌تواند از مشتقات هیدرازین، هیدروژن پراکسید یا پیشران‌های سبز جدید باشد. هیدرازین به دلیل محتوای انرژی بالای خود از ابتدا مورد توجه توسعه‌دهندگان تراسترها بوده است [۲]. از طرفی، خطرهای زیست‌محیطی هیدرازین [۳] سبب می‌شود که به کارگیری و توسعه تراسترهای هیدرازینی هزینه بالایی داشته باشد. با این حال، ویژگی‌های عملکردی که توسط هیدرازین قابل دستیابی است و نیز قابلیت اعتماد بالای آن، سبب شده این پیشران همچنان گزینه اصلی برای ماموریت‌های فضایی باشد.

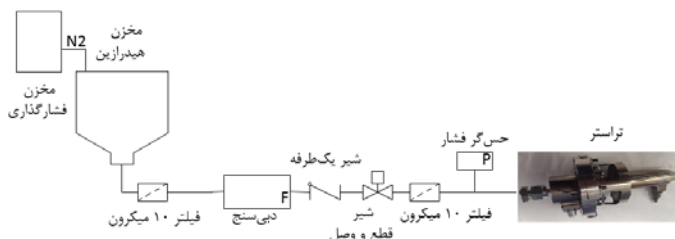
4 Schmitz  
5 Wilson  
6 Moynihan

1 Oren  
2 Hou  
3 Kim

جدول ۲. مشخصات تراستر ساخته شده

مشخصه	مقدار	واحد
قطر انژکتور تراستر	۰/۱۸	میلی متر
قطر گلوگاه نازل	۰/۶۸	میلی متر
نسبت مساحت نازل	۳	-
دبی جرمی جریان	۰/۴۶	گرم بر ثانیه
جنس بدنه تراستر	هاینس	-
قطر محفظه کاتالیست	۱۲	میلی متر
طول محفظه کاتالیست	۳۶	میلی متر
جنس کاتالیست	ایریدیوم بر پایه گاما - آلومینا	-
پیشراانه	هیدرازین با خلوص ۹۸ درصد	-

شماتیک مسیر آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. فشارگذاری بر روی مخزن هیدرازین توسط مخزن پرفشار گاز نیتروژن و به کمک رگولاتور فشار انجام می‌گیرد. بعد از مخزن هیدرازین، به ترتیب یک فیلتر ۱۰ میکرون وی لاک<sup>۲</sup>، دبی سنج برونکهرست<sup>۳</sup>، شیر یک طرفه، شیر قطع و وصل، فیلتر ۱۰ میکرون وی لاک، حسگر فشار TML، و تراستر قرار دارد.

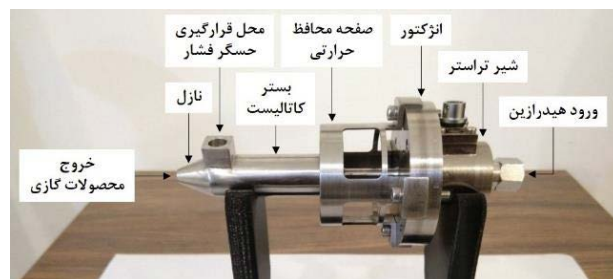


شکل ۳. شماتیک مسیر آزمون تراستر تک پیشراانه هیدرازینی

با همکاری شرکت‌های داخلی طراحی و ساخته شد. هدف از مقاله حاضر، ارائه نتایج آزمون عملکردی تراستر ساخته شده و بررسی تجربی پارامترهای عملکردی آن است. در این راستا ابتدا اجزای تراستر، مسیر آزمون، حسگرهای استفاده شده و روند آزمون معرفی می‌شود. سپس نتایج آزمون تراستر و پارامترهای عملکردی آن بررسی و تحلیل می‌شود.

## ۲- اجزای تراستر و مسیر آزمون

تصویر تراستر ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. این تراستر به همراه کاتالیست آن قبلا طی اختراعی ثبت و گزارش شده است [۹]. جنس بدنه و انژکتور این تراستر از آلیاژ هاینس<sup>۱</sup> است و اتصال این دو قسمت با جوشکاری پلاسما انجام شده است. روش جلوگیری از مسمومیت کاتالیست در حین فرایند جوشکاری پلاسما، قبلا در مرجع [۱۰] گزارش شده است. در اطراف لوله موئین از یک صفحه محافظ حرارتی استفاده شده است تا حرارت انتقالی از بدنه به شیر تراستر را کاهش داده و از افزایش دمای شیر جلوگیری نماید. در انتهای بستر کاتالیست و قبل از نازل، یک محل قرارگیری حسگر فشار تعبیه شده است.



شکل ۲. تصویری از تراستر تک پیشراانه هیدرازینی

مشخصات تراستر ساخته شده شامل مشخصات انژکتور، محفظه کاتالیست، نازل، کاتالیست و پیشراانه در جدول ۱ نمایش داده شده است. روش توسعه و ساخت کاتالیست این تراستر در مراجع [۱۱] و [۱۲] و شیر تراستر نیز طی اختراعی ثبت و گزارش شده است [۱۳].

3 Bronkhorst

1 Haynes  
2 Veelock

### ۳- طرح آزمون

طراحی آزمون به گونه‌ای انجام شده است تا عملکرد مورد نیاز تراستر در قالب الزامات عملکردی مورد بررسی قرار گیرد. الزامات عملکردی تراستر تک پیش‌رانه هیدرازینی در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲. الزامات عملکردی تراستر تک پیش‌رانه هیدرازینی

پارامتر	مقدار نامی	معیار پذیرش
تعداد سیکل	۲۰۰۰	بیشتر از ۲۰۰۰
نیروی رانش پایا	۰/۶۵ نیوتن	± ۱۰٪
سرعت مشخصه پایا	۱۳۰۰ متر بر ثانیه	± ۱۰٪
کمترین ضربه جزئی	۵۰ میلی نیوتن ثانیه	با انحراف معیار استاندارد ۱۰٪

روند انجام آزمون (سناریوی تست)، در ۴۸ مرحله طراحی شده است. گام‌های انجام آزمون از مرحله ابتدایی تا انتهای آزمون در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. روند انجام آزمون تراستر تک پیش‌رانه هیدرازینی

گام‌های انجام آزمون تراستر تک پیش‌رانه هیدرازینی
۱) ۰/۵ ثانیه روشن (۲) ۶۰ ثانیه خاموش (۳) ۰/۵ ثانیه روشن (۴) ۶۰ ثانیه خاموش (۵) ۰/۵ ثانیه روشن (۶) ۱۲۰ ثانیه خاموش (۷) ۲ ثانیه روشن (۸) ۶۰ ثانیه خاموش (۹) ۵ ثانیه روشن (۱۰) ۵۰ ثانیه خاموش (۱۱) ۱۰۰ ثانیه روشن (۱۲) ۳۰ ثانیه خاموش (۱۳) ۱۰۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ (۱۴) ۳۰ ثانیه خاموش (۱۵) ۱۰ ثانیه روشن (۱۶) ۲۰ ثانیه خاموش (۱۷) ۱۰ ثانیه روشن (۱۸) ۲۰ ثانیه خاموش (۱۹) ۱۰ ثانیه روشن (۲۰) ۳۰ ثانیه خاموش (۲۱) ۱۰۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ (۲۲) ۳۰ ثانیه خاموش (۲۳) ۱۰ ثانیه روشن (۲۴) ۲۰ ثانیه خاموش (۲۵) ۱۰ ثانیه روشن (۲۶) ۲۰ ثانیه خاموش (۲۷) ۱۰ ثانیه روشن (۲۸) ۳۰ ثانیه خاموش (۲۹) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۳۰٪ (۳۰) ۳۰ ثانیه خاموش (۳۱) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۱۰٪ (۳۲) ۳۰ ثانیه خاموش (۳۳) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵٪ (۳۴) ۳۰ ثانیه خاموش (۳۵) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۳٪ (۳۶) ۳۰ ثانیه خاموش (۳۷) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۲٪ (۳۸) ۳۰ ثانیه خاموش (۳۹) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۱٪ (۴۰) ۳۰ ثانیه خاموش (۴۱) ۱۰۰ پالس با عرض پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۰/۸٪ (۴۲) ۳۰ ثانیه خاموش (۴۳) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۰/۶٪ (۴۴) ۳۰ ثانیه خاموش (۴۵) ۱۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۰/۵٪ (۴۶) ۲۰ ثانیه خاموش (۴۷) ۵۰۰ پالس با طول پالس ۱ ثانیه و سیکل کاری ۰/۵٪ (۴۸) خاموش و انتهای آزمون.

### ۴- نتایج و بحث

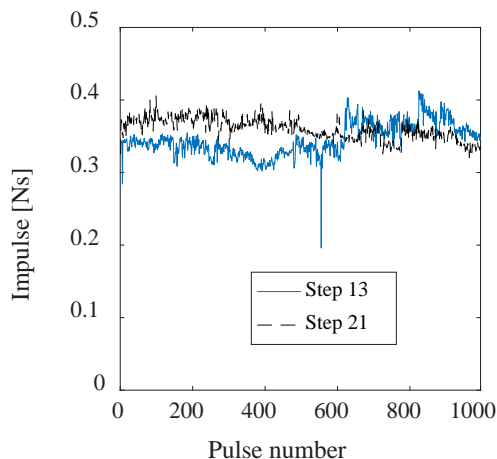
در این بخش نتایج آزمون در سه قسمت ارائه می‌شود: عمر، عملکرد پایا، عملکرد پالسی. در قسمت عمر، نتایج مربوط به ۲۰۰۰ پالس اعمالی به تراستر با عرض ۰/۵ ثانیه و دوره تناوب ۱ ثانیه ارائه می‌شود. در قسمت عملکرد پایا، پارامترهای عملکردی پایای تراستر، شامل تراست و سرعت مشخصه، گزارش و ارزیابی می‌شود. در بخش عملکرد پالسی، نتایج مربوط به کمترین ضربه جزئی و سایر پارامترهای عملکردی در پالس‌های کوتاه گزارش و بررسی می‌شود.

#### ۴-۱- عمر

توانایی عملکرد تراستر در تولید دو هزار پالس را از دو دیدگاه می‌توان سنجید: (۱) عملکرد پالسی تراستر، (۲) افت احتمالی عملکرد پلیای تراستر پس از تولید پالس‌ها. در این قسمت عملکرد پالسی تراستر بر اساس این پارامترها ارزیابی می‌شود: تراست، ضربه، سرعت مشخصه پالسی و مرکز پالس.

تراست پایا در دو هزار پالسی که در گام‌های ۱۳ و ۲۱ از روند آزمون (جدول ۳) تولید شد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. تولید تراست در این ۲۰۰۰ پالس با تکرارپذیری مناسبی انجام شده است. تراست متوسط در این ۲۰۰۰ پالس ۰/۶۰ نیوتن و انحراف معیار تراست ۰/۰۲ نیوتن است.

تنها در یک پالس از این ۲۰۰۰ پالس، تراستر به درستی عمل نکرده است. فشار محفظه در پالس ۵۷۲ پس از لحظه‌ای افت، دوباره رشد کرد (شکل ۵). دبی تراستر نیز در این میانه پالس مورد نظر کاهش غیر منتظره‌ای داشت. بنابراین احتمالاً این عملکرد غیرمنتظره، ناشی از یک گرفتگی لحظه‌ای بوده است.

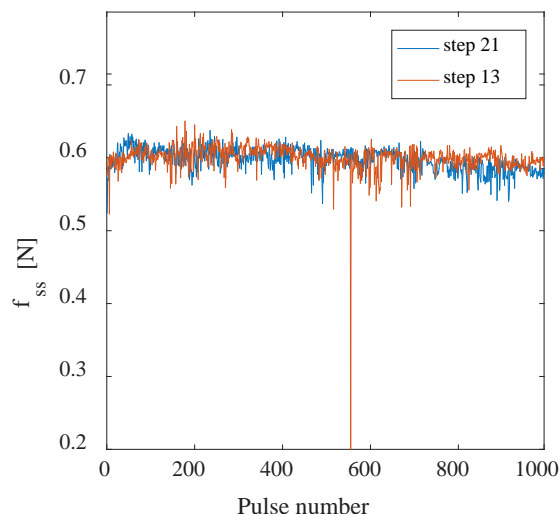


شکل ۶. ضربه برای دو گام از آزمون که در هر کدام ۱۰۰۰ پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ تولید شد

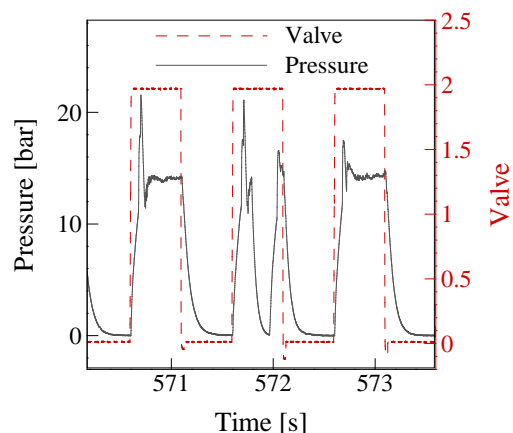
دلیل اختلاف اندک (۳٪) ضربه در گام‌های ۱۳ و ۲۱ را می‌توان این‌گونه توضیح داد، به دلیل آن‌که پس از نیمه گام ۱۳، شیر تراستر دچار نشستی شد، نیروی رانش تراستر در زمان قطع ولتاژ شیر صفر نمی‌شد. بنابراین، انتگرال تراست برای هر پالس از نیمه ۱۰۰۰ پالس اول به بعد کمی افزایش یافت. این افزایش در نمودار مربوط به گام ۱۳ در شکل ۶ به خوبی مشخص است. همین افزایش ضربه در تمام پالس‌های گام ۲۱ نیز ادامه داشت. بنابراین، ضربه متوسط در گام ۲۱، از ضربه متوسط در گام ۱۳ بیشتر بود.

محاسبه سرعت مشخصه در عملکرد پالسی با عملکرد پایا متفاوت است. از آنجاکه تراستر در عملکرد پالسی به حالت پایا نمی‌رسد، اندازه‌گیری مقدار لحظه‌ای فشار و دبی در پالس‌های کوتاه با عدم قطعیت زیاد همراه است. بنابراین، از تعریف سرعت مشخصه پالسی برای ارزیابی عملکرد پالسی استفاده می‌شود.

سرعت مشخصه عبارت است از، حاصل ضرب فشار محفظه در مساحت گلوگاه بخش بر دبی جرمی پیشراانه. سرعت مشخصه نشان‌دهنده تاثیر فرایند تجزیه در تولید گازهای داغ از پیشراانه مایع است. در مورد سرعت مشخصه نیز، مانند ضربه ویژه، اندازه‌گیری مقدار لحظه‌ای در پالس‌های کوتاه دشوار و با خطای زیاد همراه است. بنابراین، برای سرعت مشخصه نیز از تعریف سرعت مشخصه پالسی استفاده می‌شود. سرعت مشخصه پالسی عبارت است از، حاصل ضرب انتگرال فشار محفظه در یک پالس

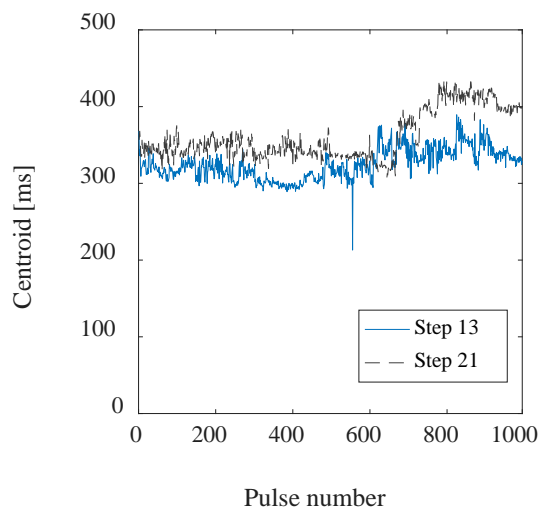


شکل ۴. تراست پایا برای دو گام از آزمون که در هر کدام ۱۰۰۰ پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ تولید شد



شکل ۵. تغییرات فشار (بار) و جریان شیر تراستر (بی بعد) از لحظه عملکرد غیرعادی تراستر

تعریف ضربه جزئی عبارت است از انتگرال زیر نمودار تراست- زمان طی یک بازه زمانی مشخص. ضربه در ۲۰۰۰ پالس با تکرارپذیری مناسبی تولید شده است. ضربه تولیدی در این ۲۰۰۰ پالس، در شکل ۶ رسم شده است. ضربه تولیدی متوسط در ۱۰۰۰ پالس اول ۰/۳۵ نیوتن ثانیه با انحراف معیار ۰/۰۲ نیوتن ثانیه بود. ضربه تولیدی متوسط در ۱۰۰۰ پالس دوم، ۰/۳۶ نیوتن ثانیه با انحراف معیار ۰/۰۲ نیوتن ثانیه بود.



شکل ۸. مرکز پالس برای دو گام از آزمون که در هر کدام ۱۰۰۰ پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ تولید شد

#### ۴-۲- عملکرد پایا

برای آن که عملکرد پایای تراستر ارزیابی شود، یک فرمان با طول ۱۰۰ ثانیه در ابتدای روند آزمایش به تراستر اعمال شد. در مدت ۱۰۰ ثانیه تراستر کاملاً گرم شده و مشخصه‌های عملکردی آن ثابت می‌شوند. از طرف دیگر، برای آن که مشخص شود که عملکرد تراستر پس از تعداد زیادی پالس افت نکرده است، تراست پایا و سرعت مشخصه قبل و بعد از انجام ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ پالس با هم مقایسه می‌شوند.

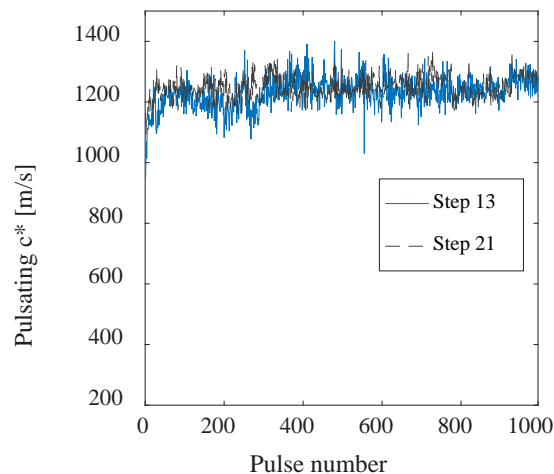
تراست پایا در شروع آزمون، پس از ۱۰۰۰ پالس و پس از ۲۰۰۰ پالس در شکل ۹ رسم شده است. تراست در محدوده قابل قبول تست ( $\pm 10\% \Delta N / 60$ ) بود. تغییرات تراست بعد از ۲۰۰۰ پالس نسبت به تراست بعد از ۱۰۰۰ پالس به دلیل تغییر فشار بالادست بود؛ در میانه تست (بعد از ۱۰۰۰ پالس اول)، فشار بالادست افزایش داده شد. بعد از ۱۰۰۰ پالس، گام ۱۳ فشار بالادست ۱۶/۸ بار بود که به ۱۷/۹ بار افزایش یافت.

لازم به توضیح است که در تست انجام شده حجم مخزن آزمایش نسبتاً کوچک بود (۵ لیتر). بخشی از این حجم مخزن توسط پیش‌رانه (۱ لیتر) و بخش بزرگتری از آن توسط گاز فشارگذار (نیتروژن) پر می‌شود. هنگامی که بخشی از پیش‌رانه

در مساحت گلوگاه بخش بر جرم پیش‌رانه مصرف شده در آن پالس.

سرعت مشخصه پالسی در ۲۰۰۰ پالس در شکل ۷ مشاهده می‌شود. سرعت مشخصه پالسی متوسط در این ۲۰۰۰ پالس ۱۲۳۹ متر بر ثانیه و انحراف معیار آن ۵۰ متر بر ثانیه (بازه اطمینان ۹۹٪ مقدار متوسط برابر با  $\pm 4$  متر بر ثانیه) بود. سرعت مشخصه پالسی، ۶٪ کمتر از سرعت مشخصه پایا در همین آزمایش بود. افت سرعت مشخصه در عملکرد پالسی نسبت به عملکرد پایا، طبیعی است. بنابراین، تراستر در این پالس‌ها با کارایی بالا و تکرارپذیر عمل کرده است.

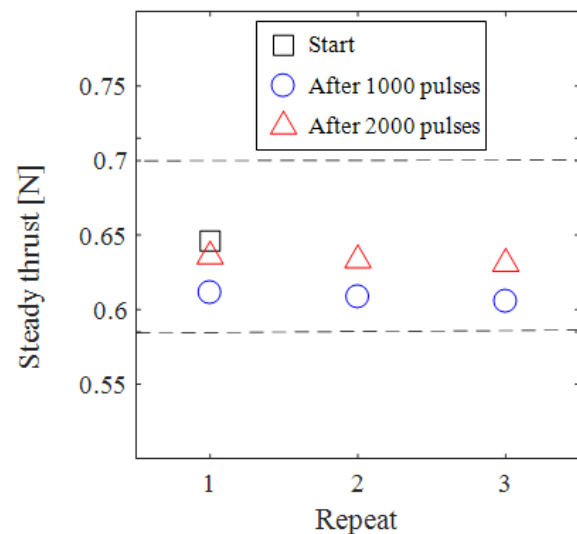
مرکز پالس، فاصله زمانی بین لحظه اعمال ولتاژ شیر تا تولید ۵۰٪ ضربه توسط تراستر است. مرکز پالس برای ۲۰۰۰ پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ در شکل ۸ رسم شده است. مرکز پالس متوسط در این ۲۰۰۰ پالس، ۳۴۴ میلی‌ثانیه با انحراف معیار ۴۱ میلی‌ثانیه بود. اگر ضربه بدون تاخیر و با شکل پالس مربعی تولید می‌شد، مرکز پالس در یک پالس با عرض ۵۰۰ میلی‌ثانیه، باید ۲۵۰ میلی‌ثانیه می‌بود.



شکل ۷. سرعت مشخصه پالسی برای دو گام از آزمون که در هر کدام ۱۰۰۰ پالس با دوره تناوب ۱ ثانیه و سیکل کاری ۵۰٪ تولید شد

مصرف شود گاز فشارگذار بخش بیشتری از فضای مخزن را اشغال می‌کند (منبسط می‌شود). در نتیجه اگر میزان زیادی از پیشران مصرف شود (در زمان‌های طولانی تست)، فشار گاز فشارگذار کاهش می‌یابد. اگر نیاز باشد که عملکرد پایا ثابت بماند لازم است در میانه‌ی تست گاز بیشتری به مخزن آزمایش اضافه شود تا فشار آن به مقدار اولیه افزایش یابد. در میانه‌ی تست، بعد از ۱۰۰۰ پالس اول، این افزایش فشار گاز درون مخزن آزمایش توسط اپراتور انجام شد. ولی تنظیم دقیق فشار به دلیل دقت رگولاتور و آزمایشگر امکان‌پذیر نشد. در نتیجه فشار در ابتدای ۱۰۰۰ پالس دوم بیشتر از فشار مخزن در ابتدای ۱۰۰۰ پالس اول بود.

تراست متوسط تکرارهای شکل ۹، در شکل ۱۰ رسم شده است. تغییرات مقدار متوسط تراست به علت تغییر فشار بالادست بود و تغییر رفتار تراستر را نشان نمی‌دهد. بنابراین، تراست پایا به دلیل تولید ۲۰۰۰ پالس تغییری نکرده است.

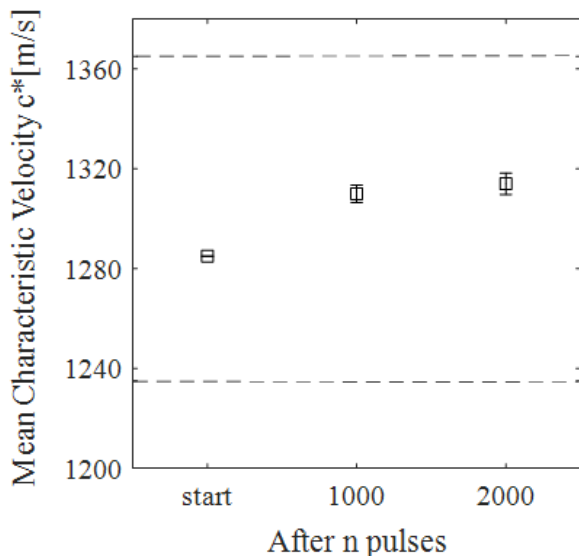


شکل ۹. تراست پایا در شروع آزمون، پس از ۱۰۰۰ و پس از ۲۰۰۰ پالس. محدوده قابل قبول تراست با خط چین نشان داده شده است

شکل ۱۰. تراست متوسط با پیشرفت روند تست. خطوط خطا بازه دو انحراف معیار را نشان می‌دهد. خط چین‌ها نشان‌دهنده بازه قابل قبول نتایج تست است

سرعت مشخصه در شروع آزمون، پس از اعمال هزار پالس و پس از دو هزار پالس، در شکل ۱۱ رسم شده است. سرعت مشخصه پس از این تعداد پالس، تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. تغییرات سرعت مشخصه پس از ۱۰۰۰ پالس اول و پس از ۱۰۰۰ پالس دوم بسیار ناچیز است (کمتر از ۰/۵ درصد). افزایش جزئی سرعت مشخصه از شروع آزمون به دلیل افزایش دمای تراستر بوده است. دمای کاتالیست به دلیل انتقال حرارت و به دلیل شکل روند آزمون (سناریوی اعمال پالس‌ها) در طول تست تغییر می‌کند و این تغییر دما به تغییر سرعت مشخصه (کارایی کاتالیست) می‌انجامد. در شروع آزمون، یک پالس بلند اعمال شد که سرعت مشخصه آن محاسبه شده است. اما پس از ۱۰۰۰ پالس و همچنین پس از ۲۰۰۰ پالس، سه پالس طولانی ۱۰ ثانیه‌ای وجود داشت که سرعت مشخصه برای آن شش پالس محاسبه شده و در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که کریشناماچاری<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] سرعت مشخصه ۱۱۶۶ متر بر ثانیه را در تست زمینی یک تراستر یک نیوتنی تک‌پیشران هیدرازینی اندازه‌گیری کرده‌اند. اشمیت<sup>۲</sup> و همکاران [۱۵] سرعت مشخصه ۱۲۷۴ متر بر ثانیه را گزارش کرده‌اند.



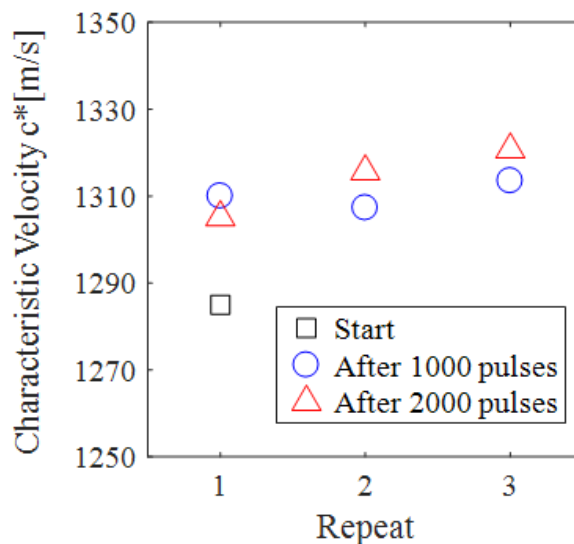


شکل ۱۲. سرعت مشخصه میانگین با پیشرفت روند تست. خطوط خطا بازه دو انحراف معیار را نشان می‌دهد. خط چین‌ها نشان‌دهنده بازه قابل قبول نتایج تست است

### ۳-۴- عملکرد پالسی

در این قسمت، پارامترهای عملکرد پالسی تراستر شامل ضربه جزیی و مرکز پالس گزارش و ارزیابی می‌شوند. نتایج این بخش مربوط به پالس‌هایی با دوره تناوب ۱ ثانیه و عرض پالس بین ۵ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه است. برای هر عرض پالس، ۱۰۰ پالس به تراستر اعمال شد. این پالس‌ها در گام‌های ۲۹ تا ۴۵ آزمون تعریف شده بود. ضربه جزیی در این مطالعه، با استفاده از فشار محفظه محاسبه می‌شود. ضربه جزیی سطح زیر نمودار تراستر-زمان در یک بازه زمانی مشخص است. ضربه در این آزمایش، تقریباً به صورت خطی با عرض پالس افزایش یافته است. کمترین ضربه تولید شده، برابر ۳ میلی‌نیوتن‌ثانیه در عرض پالس ۵ میلی‌ثانیه به دست آمده است. در شکل ۱۳، ضربه نرمال شده با تراستر پلپا در نمونه محیط آزمایشگاهی حاضر (Lab environment) با ضربه نرمال گزارش شده در مراجع [۷] و [۸] و همچنین ضربه نرمال نمونه آزمایشگاهی (Lab model) که قبلاً تست شده بود [۱۷] و [۱۸]، مقایسه شده است. ضربه نرمال و رفتار آن در نمونه حاضر بسیار به ضربه گزارش شده در مراجع معتبر یاد شده نزدیک است. ضربه نرمال در نمونه آزمایشگاهی تراستر بسیار بزرگ‌تر بود. اختلاف ضربه در این مدل نسبت به

سرعت مشخصه ایده‌آل یک تراستر تک‌پیش‌رانه هیدرازینی با توجه به میزان تجزیه آمونیاک بین ۱۲۲۰ تا ۱۳۵۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند [۱۶].

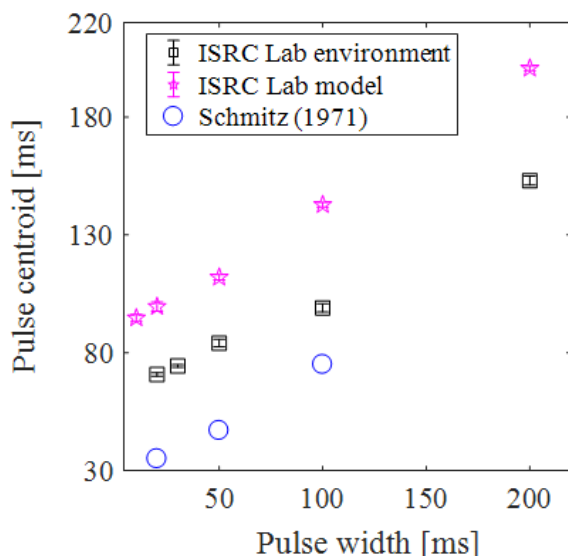


شکل ۱۱. سرعت مشخصه در شروع آزمایش (Start)، پس از ۱۰۰۰ پالس، و پس از ۲۰۰۰ پالس

مقدار میانگین سرعت مشخصه در شروع آزمایش، پس از ۱۰۰۰ پالس و پس از ۲۰۰۰ پالس در شکل ۱۲ رسم شده است. سرعت مشخصه میانگین ۱۳۱۲ متر بر ثانیه بود. سرعت مشخصه متوسط مورد انتظار  $1300 \pm 65$  متر بر ثانیه بود. سرعت مشخصه میانگین بعد از ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ پالس تفاوت معنی‌داری نداشته است. افزایش سرعت مشخصه پس از ۱۰۰۰ پالس نسبت به شروع تست به دلیل افزایش دمای تراستر بوده است. بنابراین، عملکرد پلپای تراستر در این آزمون پس از تولید ۲۰۰۰ پالس تغییر معنی‌داری نداشته است. سرعت مشخصه و تراستر پلپا در ابتدای آزمون و پس از تولید ۲۰۰۰ پالس در محدوده قابل قبول بود. پس می‌توان گفت، عمر این تراستر بیشتر از ۲۰۰۰ پالس است.

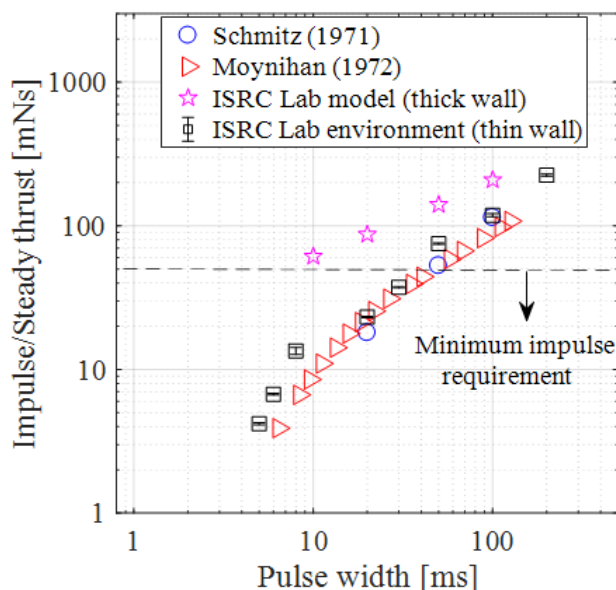
کوچک تر و کوتاه تر تولید می شود. این یعنی تراستر حاضر ضربه کمتر و مرکز پالس کوچکتری تولید می کند.

برای ایجاد شهود بهتر از تفاوت مرکز پالس در تراسترهای شکل ۱۴، شکل پالس تراستر فعلی، مدل آزمایشگاهی و تراستر مرجع [۷] در شکل ۱۵ مقایسه شده است. تراستر نمونه آزمایشگاهی و محیط آزمایشگاهی تقریباً در یک زمان به فشار بیشینه رسیده اند. اما فشار در نمونه مرجع سریع تر شروع به افت می کند و زودتر تخلیه می شود. بنابراین، در مجموع پالس نمونه فعلی کوچک تر است و مرکز پالس کوچکتری دارد. هم سرعت رشد فشار و هم سرعت تخلیه فشار در تراستر مرجع [۷] بیشتر است. دلیل این سرعت بیشتر کوچک بودن نسبت حجم تراستر به دبی در تراستر مرجع است.



شکل ۱۴. مرکز پالس در تراستر فعلی (Lab environment)، مدل آزمایشگاهی (Lab model) و تراستر نیروی هوایی آمریکا (Schmitz [7]). خطوط نشان دهنده بازه اطمینان ۹۹٪ است

مدل آزمایشگاهی با اختلاف ابعاد انژکتور در این دو تراستر توجه می شود. کوچک بودن انژکتور در این تراستر نسبت به تراستر قبلی سبب شده که دبی عبوری از آن در پالس های کوتاه بسیار کمتر باشد. قطر انژکتور در نمونه محیط آزمایشگاهی (نمونه حاضر) ۰/۱۸ میلی متر و در نمونه آزمایشگاهی (نمونه جدار ضخیم) ۰/۲۱۸ میلی متر بود. این تفاوت دبی ورودی به تراستر تفاوت ضربه تولیدی توسط این دو تراستر را توجه می کند.



شکل ۱۳. ضربه جزئی نرمال شده با تراست پایا در مقایسه با تراستر نیروی هوایی آمریکا (اشمیت [۷])، تراستر ناسا (موینیان [۸]) و تراستر نمونه آزمایشگاهی [۱۷] و [۱۸]. خطوط خطا نشان دهنده بازه اطمینان ۹۹٪ است

در شکل ۱۴، مرکز پالس در این تراستر با تراستر نمونه آزمایشگاهی و تراستر مرجع [۷] مقایسه شده است. مرکز پالس در تراستر حاضر از تراستر مدل آزمایشگاهی کوچک تر بود. دلیل آن کوچک تر بودن قطر انژکتور در تراستر فعلی نسبت به تراستر مدل آزمایشگاهی است. کوچک تر بودن انژکتور سبب می شود در پالسی با عرض یکسان جرم کمتری از پیشرانه وارد تراستر شود، در نتیجه گاز کمتری تولید شود. از آنجاکه حجم دو تراستر یکسان بود، گاز کمتر فشار محفظه را کمتر بالا برده و سریع تر تخلیه می شود. بنابراین، در مجموع در تراستر حاضر پالسی

کاهش قطر انژکتور (با ثابت نگاه داشتن دبی پایا با افزایش فشار تزریق)، سبب کاهش ضربه تولیدی (در عرض پالس ثابت) و افزایش زمان رشد فشار می شود. کوچک کردن ابعاد محفظه کاتالیست، سبب کاهش زمان افزایش و افت فشار و در نتیجه کوچک شدن مرکز پالس می شود. همچنین، بر میزان کاتالیست قابل حمل و احتمال عمر تراستر نیز موثر است. انتخاب ابعاد یاد شده، با مصالحه در الزامات تراستر قابل بهینه سازی است.

### تعارض منافع

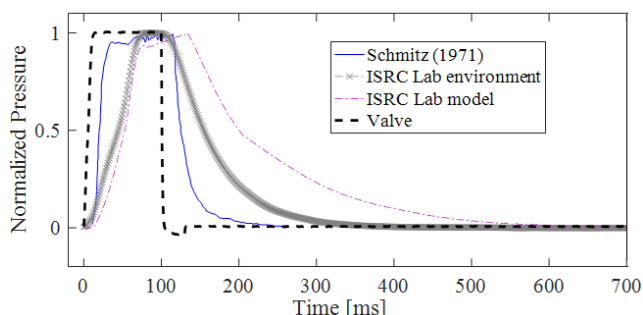
هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

اد

### مراجع

- [1] H. Jung, J. H. Kim, "Test and Evaluation of a 70 N-class Hydrazine Thruster for Application to the Precise Attitude Control of Space Vehicles," in 49<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Jose, CA, 2013.
- [2] T. W. Price, D. D. Evans, "The Status of Monopropellant Hydrazine Technology," 1968.
- [3] S. Baek, W. Jung, H. Kwon, S. Kang, "Development of High-Performance Green-Monopropellant Thruster with Hydrogen Peroxide and Ethanol," Journal of Propulsion and Power, vol. 34, no. 5, pp. 1256-, 2018.
- [4] A. Oren, and C. Gutfinger. "Performance evaluation of an augmented hydrazine thruster." In 36<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, p. 3761. (2000).
- [5] B. Hou, X. Wang, T. Li, and T. Zhang. "Steady-state behavior of liquid fuel hydrazine decomposition in packed bed." AICHE Journal 61, no. 3 (2015): 1064-1080.
- [6] J. S. Kim, H. Jung, S. H. Bae, D. S. Bae, and J. H. Kim. "Performance Evaluation of a 70 N Hydrazine Thruster According to the Variation of Characteristic Length." In 51<sup>st</sup> AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, p. 4162. (2015).
- [7] B. W. Schmitz و W. W. Wilson, "Long Life Monopropellant Hydrazine Engine Development



شکل ۱۵. شکل پالس فشار نمونه برای فرمانی با عرض ۱۰۰ میلی ثانیه و دوره تناوب ۱ ثانیه

افزایش فشار در تراستر ناشی از تجمع گاز در آن و کاهش فشار ناشی از تخلیه گازهای موجود در محفظه است. بنابراین، زمان افزایش فشار و کاهش فشار در تراستر متناسب با نسبت حجم تراستر به دبی خالص ورودی به آن است. از این رو، هرچه نسبت حجم به دبی در یک تراستر کوچک تر باشد تراستر سریع تری خواهیم داشت.

### ۵- نتیجه

این پژوهش، با هدف بررسی تجربی عملکرد یک تراستر تک پیشرانه هیدرازینی در محیط اتمسفریک انجام شد. نتایج نشان داد، که تراستر آزمایش شده می تواند ۲۰۰۰ پالس با عرض ۰/۵ ثانیه و دوره تناوب ۱ ثانیه را به صورت تکرارپذیری تولید کند. همچنین، بر اساس نتایج، نیروی رانش و سرعت مشخصه پایای تراستر در محدوده مجاز قرار داشت. مقایسه نیروی رانش و سرعت مشخصه پایای تراستر در ابتدای آزمون، پس از ۱۰۰۰ پالس و پس از ۲۰۰۰ پالس هیچ گونه افتی را در عملکرد تراستر نشان نداد. بنابراین، عمر این تراستر بیش از ۲۰۰۰ پالس بوده است. در عملکرد پالسی، نشان داده شد که تراستر توانسته ضربه هایی بسیار کوچک به اندازه ۳ میلی نیوتن ثانیه را به صورت تکرارپذیری تولید کند. همچنین مقایسه نتایج نمونه تراستر فعلی با نتایج مدل آزمایشگاهی و تراستر اشمیت [۷] نشان داد که چگونه با انتخاب ابعاد مناسب برای انژکتور، محفظه کاتالیست و نازل می توان مشخصات زمان افزایش فشار، کمترین ضربه، مرکز پالس و زمان افت فشار در تراستر را به خوبی کنترل کرد.

[۱۷] م. ع. امیری فر و همکاران، "آزمون گر کاتالیستی تک پیشرانه هیدرازین با کنترل دقیق جریان ورودی به بستر،" ۱۳۹۸ مهر ۱۵، ۱۳۹۸۵۰۱۴۰۰۰۳۰۰۶۱۱۵.

[۱۸] ع. رجبی، م. ع. امیری فر، ز. امیرسرداری و همکاران، "آزمون گرم نمونه آزمایشگاهی رانشگر تک پیشرانه هیدرازینی،" چهارمین نشست تخصصی دستاوردهای علمی و فنی پژوهشگاه فضایی ایران، ۱۳۹۷.

Program," Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards, California, 1971.

[8] P. I. Moynihan, "Minimum Impulse Tests of 0.45-N Liquid Hydrazine Catalytic Thrusters," JPL Quarterly Technical Review, 1972.

[۹] م. ع. امیری فر و همکاران، "ساخت کاتالیست ایریدیوم/آلومینا برای استفاده در یک رانشگر تک پیشرانه هیدرازینی،" ۱۳۹۹ اردیبهشت ۱۷، ۱۳۹۹۵۰۱۴۰۰۰۳۰۰۱۲۹۲.

[10] Z. Amirsardari, Y. Vahidshad, M. A. Amirifar, et al, "Method for Preventing the Contamination of Iridium Nanocatalyst during Plasma Arc Welding Procedure," Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021.

[11] Z. Amirsardari, A. Dourani, M. A. Amirifar, et al, "Dentate number and functionality of O, N-donor ligands for the growth and catalytic reaction of iridium nanoparticles," Chemical Papers, Vol 74, P 3233-3241, 2020.

[12] Z. Amirsardari, A. Dourani, M. A. Amirifar, et al, "Comparative characterization of iridium loading on catalyst assessment under different conditions," International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol 28, P 1233-1239, 2021.

[۱۳] م. ع. امیری فر و همکاران، "شیر تراستر سلونوئیدی با ساختار فشرده و سازگار با هیدرازین،" ۱۳۹۸ آذر ۴، ۱۳۹۸۵۰۱۴۰۰۰۳۰۰۷۶۶۱.

[14] S. Krishnamachary, S. K. Mohan, S. G. Kulkarni, D. Jayaraman, M. R. Rao, L. D. Singh and S. K. Prasad, "Propellant Grade Hydrazine in Mono/Bi-propellant Thrusters: Preparation and Performance Evaluation," Defence Science Journal, vol. 65, no. 1, pp. 31-38, 2015.

[15] B. Schmitz, D. Williams, W. Smith and D. Maybee, "Design and Scaling Criteria for Monopropellant Hydrazine Rocket Engines and Gas Generators Employing Shell 405 Catalyst," in 2nd Propulsion Joint Specialist Conference, 2012.

[16] G. P. Sutton and O. Biblarze, Rocket Propulsion Elements, 7th ed., Wiley, 2001.



## 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/>)