



Research Article

Experimental Investigation of the Effect of Pre-evacuation on the Starting Performance of a Vacuum Simulator Diffuser with Conical Nozzles of Different Expansion Ratios

Nematollah Fouladi¹, Mohammad Farahani*² and Amirali Nojoumi²

¹Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.

² Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author: (mfarahani@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 18 February 2024

Revised: 6 May 2024

Accepted: 26 May 2024

Keywords:

High-altitude test facility,
second throat exhaust diffuser,
pre-evacuation,
pressure oscillation.

Abstract

The starting time of a high-altitude exhaust diffuser is a key factor in evaluating an engine's unsteady performance. One common approach to reduce this time is to pre-evacuate the vacuum chamber and part or all of the diffuser. This study examines how pre-evacuation influences diffuser performance using four diffuser inlet to nozzle outlet area ratios 1.27, 1.91, 4.1, and 7.81, tested using compressed air and rapid nozzle pressurization. These ratios correspond to four conical nozzles with expansion ratios of 45, 30, 15, and 7.5. Wall pressures were measured at 13 points along the diffuser and vacuum chamber, both with and without pre-evacuation. The pre-evacuation process used a vacuum pump. Results showed that at area ratios of 1.91 and higher, harmonic pressure oscillations develop in the diffuser and vacuum chamber. Pre-evacuation did not eliminate these oscillations but shortened their onset and the diffuser starting time, especially at an area ratio of 1.27, where the narrow annular gap delays starting. Mass flow rate analysis revealed alternating filling and emptying of the vacuum chamber during oscillations. Fourier analysis indicated that oscillation frequency increases with area ratio, while amplitude decreases.

Introduction

Simulating a space nozzle on Earth requires a low-pressure (vacuum) environment to avoid flow separation inside the nozzle. This is achieved using high-altitude exhaust diffuser, which includes a supersonic diffuser and a vacuum chamber. The exhaust jet from the nozzle generates a relative vacuum around it. In some setups, ejectors or vacuum pumps are added to enhance performance.

A key performance parameter is the diffuser starting time, which is the duration needed to create a relative vacuum around the nozzle. A shorter starting time allows more accurate thrust measurements and prevents backflow, which can increase chamber pressure and damage the nozzle, especially in hot gas tests. Starting time depends on nozzle pressure, initial test conditions, chamber volume, and diffuser geometry. A common method to reduce it is pre-evacuation

of part or all of the diffuser and vacuum chamber using a vacuum pump before testing.

Previous studies [2-4] have shown that increasing the pre-evacuated volume of the diffuser, significantly reduces starting time. Fouladi et al. [9,10] found that pre-evacuation prevents destructive flow separation transitions. However, high diffuser inlet-to-nozzle outlet area ratios may cause pressure oscillations that can create noise and structural damage. Despite being mentioned in earlier research, the mechanism and influencing factors of this phenomenon remain unclear.

This study investigates how pre-evacuation affects pressure oscillations during diffuser starting using four nozzles with different expansion ratios of 7.5, 15, 30, and 45. The goal is to clarify whether pre-evacuation influences oscillation onset,

To Cite this article:

Fouladi, N., Farahani, M. and Najoumi, A. 2025. Experimental investigation of the pre-evacuation effect on starting performance of a vacuum simulator diffuser with different expansion ratio conical nozzle, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(2), 3-16. <https://doi.org/10.24200/j40.2024.64065.1703>

intensity, and diffuser starting behavior under rapid pressurization conditions.

Methodology

The experimental setup consisted of a compressed air supply system, a vacuum pump, a vacuum chamber, a nozzle, a scaled second-throat diffuser and a data acquisition system. **Figure 2** illustrates the schematic configuration of the second throat diffuser, vacuum chamber, nozzle, and the locations of pressure transducers. The tests were conducted using compressed air. Air tanks provided up to 50 bar pressure to feed the nozzle chamber, with pressure regulated by an upstream solenoid valve. The nozzle and pressure chamber were positioned inside the vacuum chamber such that the nozzle exit and diffuser inlet were aligned on the same plane without contact with chamber walls. An annular gap between the nozzle exit and diffuser inlet allowed flow exchange between the diffuser and vacuum chamber. The diffuser's geometric parameters are provided in **Table 1**.

Thirteen pressure transducers, including Kulite and Motorola types, were used to measure pressure distribution along the diffuser, while Kulite and TML transducers measured vacuum and nozzle chamber pressures. A data sampling frequency of 550 Hz was selected to accurately capture the pressure oscillations.

The diffuser geometry was kept constant, and the diffuser inlet-to-nozzle outlet area ratio was varied using four conical nozzles with expansion ratios of 7.5, 15, 30, and 45. Rapid pressurization of the nozzle chamber was applied to achieve the desired motor pressure.

To study pre-evacuation effects, the entire internal volume of the nozzle, diffuser, and vacuum chamber was evacuated to below 0.02 bar. A sealed cover at the diffuser exit separates the pre-vacuum interior space from the exterior and detached automatically under pressure rising. Experiments were performed for area ratios 1.27, 1.91, 4.1, and 7.81, both with and without pre-evacuation, at ambient pressures of 0.87-0.89 bar and approximately 300 K.

Results and Discussion

At high diffuser inlet to nozzle exit area ratios and near the starting condition, harmonic pressure oscillations appear throughout the diffuser and vacuum chamber. As shown in **Figure 4**, pressure variations over time are compared under two conditions: (a) the oscillation condition and (b) the

started condition, both under pre-evacuated conditions at an area ratio of 1.91. In both conditions, there are local fluctuations near the end of the diffuser which is due to turbulent separation.

To analyze pre-evacuation effects, pressure-time responses of the vacuum chamber for four geometries were compared. Pre-evacuation notably reduced diffuser startup time, but it did not alter oscillation frequency or amplitude. At $A_d/A_e=1.27$, no oscillations occurred, but starting time shortened significantly. For higher area ratios, oscillations began earlier under pre-evacuated conditions.

Mass flow calculations, using Equation 3, showed that flow enters and exits from chamber alternately during harmonic pressure oscillations. Flow choking in the annular gap was observed only at $A_d/A_e=1.27$.

As depicted in **Figure 15**, Spectral analysis revealed that oscillation frequency increased with area ratio and decreased with nozzle chamber pressure, while amplitude showed the opposite trend. Pre-evacuation had minimal influence on these. Results demonstrate that pre-evacuation primarily accelerates diffuser startup but does not affect the oscillation behavior.

Conclusion

This study investigates the effect of pre-evacuation on pressure oscillations in a second throat diffuser. Experiments were conducted at diffuser inlet to nozzle outlet area ratios of 1.27, 1.91, 4.1, and 7.81 using four conical nozzles with different expansion ratios, both with and without pre-evacuation. Results show that for area ratios above 1.27, periodic pressure oscillations occur over a specific range of nozzle chamber pressures, extending throughout the diffuser and vacuum chamber. Increasing the diffuser inlet area ratio at a constant nozzle pressure decreases oscillation frequency but increases amplitude. Similarly, higher nozzle pressure at a fixed area ratio produces lower frequency and larger amplitude oscillations. Pre-evacuation was found not to affect the formation or characteristics of these oscillations but to accelerate their onset and reduce diffuser starting time, which varies with the area ratio. During oscillations, the vacuum chamber alternately fills and empties.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



بررسی تجربی اثر پیش خلأسازی در عملکرد راهاندازی دیفیوزر شبیه‌ساز خلأ در آزمون نازل مخروطی با نسبت انبساط مختلف

نعمت‌اله فولادی^۱، محمد فراهانی^{۲*} و امیرعلی نجومی^۲

^۱ پژوهشکده سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران.

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mfarahani@sharif.edu)

چکیده

در پژوهش حاضر به روش تجربی، اثر پیش خلأسازی در فرآیند راهاندازی یک دیفیوزر گلوله‌شکل ثابته در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا با استفاده از ۴ نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح‌های خروجی نازل: ۱/۲۷، ۱/۹۱، ۴/۱ و ۷/۸۱ تحت هوای فشرده بررسی شده است. نسبت سطح‌ها از طریق ۴ نازل مخروطی با نسبت انبساط‌های مختلف تغییر داده شده‌اند. آزمایش‌ها با استفاده از اندازه‌گیری فشار روی دیواره‌های دیفیوزر و محفظه خلأ در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی انجام شده‌اند. بررسی عملکرد دیفیوزر در فرآیند راهاندازی نشان داده است که افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل در محدوده‌ای از فشار محفظه خلأ نازل سبب شکل‌گیری نوسان فشار متناوب در تمام طول دیفیوزر و محفظه خلأ شده است. همچنین مشاهده شده است که پیش خلأسازی فضای داخلی دیفیوزر و محفظه خلأ، تغییری در عملکرد دیفیوزر در حضور نوسان فشار ایجاد نکرده و پیش خلأسازی، فقط در زمان راهاندازی و شروع نوسان‌های مذکور مؤثر بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

واژگان کلیدی:

بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا،

دیفیوزر گلوله‌شکل ثابته،

پیش خلأسازی،

نوسان فشار.

۱. مقدمه

شبیه‌سازی عملکرد یک نازل فضایی در روی زمین نیازمند محیطی با فشار کم (خلأ) جهت جلوگیری از جدایش جریان در نازل است. بدین منظور از بسترهای شبیه‌ساز ارتفاع بالا استفاده می‌شود؛ که شامل یک دیفیوزر مافوق صوت و یک محفظه برای قرارگیری نازل و محفظه فشار و شبیه‌سازی شرایط خلأ است، که از طریق مونتوم جریان مافوق صوت خروجی از نازل، شرایط خلأ نسبی در اطراف نازل یا محفظه آن فراهم می‌شود. در برخی شرایط برای بهبود عملکرد، در کنار بسترهای شبیه‌ساز ارتفاع بالا از اجکتورهای سیال ثانویه یا پمپ‌های خلأ استفاده می‌شود. همچنین از میان دیفیوزرهای موجود، دیفیوزر گلوله‌شکل ثابته با توجه به عملکرد بهتر متداول‌تر است.^[۱]

یکی از پارامترهای مهم در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا، زمان موردنیاز برای ایجاد خلأ نسبی در اطراف نازل از لحظه فشارگذاری است؛ که به آن، زمان راهاندازی دیفیوزر گفته می‌شود.^[۲] هر چه زمان راهاندازی دیفیوزر کوتاه‌تر باشد، امکان ارزیابی جزئیات بیشتری از عملکرد نازل در هنگام فشارگذاری فراهم خواهد بود. درواقع، از لحظه راهاندازی شدن دیفیوزر، اندازه‌گیری نیروی پیش‌رانش دقیق‌تر خواهد بود و قبل از آن، اندازه‌گیری‌ها با خطای زیادی همراه است. زیرا قبل از راهاندازی دیفیوزر، نازل غالباً در شرایط فرامنسپط کار می‌کند و جدایش

جریان پیچیده و تداخل امواج ضربه‌ای قوی به همراه دارد. علاوه بر آن، در این لحظات جریان برگشتی به محفظه خلأ شکل می‌گیرد و فشار محفظه افزایش می‌یابد، که این پدیده در عملکرد دیفیوزر مطلوب نیست. در آزمایش‌های گاز گرم با ادامه‌دار شدن این روند ممکن است سازه‌ی نازل به‌ویژه نازل‌های کامپوزیتی آسیب ببینند. بنابراین، کاهش زمان راهاندازی دیفیوزر در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا اهمیت زیادی دارد.

زمان راهاندازی به: منحنی فشار محفظه خلأ، شرایط اولیه‌ی آزمایش، حجم محفظه خلأ، و هندسه‌ی دیفیوزر بستگی دارد.^[۳] یکی از روش‌های متداول برای کاهش زمان راهاندازی دیفیوزر، پیش خلأسازی بخشی یا تمام فضای داخلی دیفیوزر و محفظه خلأ است.^[۴-۷] فرآیند پیش خلأسازی با استفاده از یک پمپ خلأ یا یک اجکتور سیال ثانویه پیش از فشارگذاری محفظه خلأ نازل انجام می‌شود و در آن، پیش از شروع آزمایش، جهت حفظ نواحی پیش خلأسازی شده از نواحی پرفشار (نواحی متصل به محلی)، از یک دیافراگم (مطابق شکل ۱-الف) استفاده می‌شود، که با فشارگذاری و افزایش فشار پشت دیافراگم، دیافراگم مذکور از بین می‌رود (شکل ۱-ب).

پارک و همکاران (۲۰۰۸)^[۴] با بررسی یک نازل مخروطی در دیفیوزر استوانه‌ای

استناد به این مقاله:

فولادی، نعمت‌اله، فراهانی، محمد و نجومی، امیرعلی، ۱۴۰۴. بررسی تجربی اثر پیش خلأسازی در عملکرد راهاندازی دیفیوزر شبیه‌ساز خلأ در آزمون نازل مخروطی با نسبت انبساط مختلف. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۲)، صص ۳-۱۶. <https://doi.org/10.24200/j40.2024.64065.1703>



نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل (A_d / A_e) از پارامترهای مهم در عملکرد دیفیوزر در هنگام راهاندازی به‌شمار می‌آید. معمولاً سطح ورودی دیفیوزر اندکی بزرگ‌تر از سطح خروجی نازل است. هر چه مقدار پارامتر (A_d / A_e) بزرگ‌تر شود، جریان مافوق صوت خروجی از نازل باید فاصله‌ی بیشتری را تا دیواره‌ی دیفیوزر منبسط شود، که در شرایطی بسته به هندسه و فشار محفظه‌ی نازل، افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل می‌تواند موجب شکل‌گیری پدیده‌ی نوسان فشار در فرآیند راهاندازی دیفیوزر شود. پدیده‌ی اخیر هنگامی که جریان در نازل مافوق صوت می‌شود، اما دیفیوزر در شرایط راهاندازی قرار ندارد، رخ می‌دهد و با نوسان‌های فشار هارمونیکی در محفظه‌ی خلأ و در تمام طول دیفیوزر همراه است.^[۴، ۷، ۱۲] پدیده‌ی نوسان فشار علاوه‌بر تولید نویز زیاد، ممکن است در صورت تشدید باعث ایجاد آثار مخرب سازه‌ای در بستر آزمون و به‌ویژه نازل کامپوزیتی شود.

مطالعه‌ی پیشینه‌ی پژوهش نشان می‌دهد با وجود اشاره به پدیده‌ی نوسان فشار در محفظه‌ی خلأ در برخی از پژوهش‌های تجربی، تحقیق جامعی در مورد ماهیت پدیده‌ی مذکور و عوامل مؤثر در آن انجام نشده است. همچنین اثر پیش خلأسازی نیز بر روی نوسان‌های فشار ناشناخته است. هدف پژوهش حاضر، مطالعه‌ی اثر پیش خلأسازی در نوسان‌های فشار در حین راهاندازی دیفیوزر از طریق پیش خلأسازی فضای داخلی نازل، دیفیوزر، و محفظه‌ی خلأ با رویکرد فشارگذاری آنی محفظه‌ی نازل است. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است با پیش خلأسازی فضای داخلی نازل، دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ، اثر پیش خلأسازی در نوسان‌های فشار در حین راه اندازی دیفیوزر با رویکرد فشارگذاری آنی محفظه‌ی نازل بررسی شود. بدین منظور با فرض ثابت‌بودن سطح ورودی دیفیوزر به سطح گلوگاه نازل، از ۴ نازل با نسبت انبساط‌های ۷/۵، ۱۵، ۳۰، و ۴۵ برای تغییر نسبت سطح (A_d / A_e) استفاده شده است. پژوهش حاضر به‌منظور پاسخ‌دادن به چند سؤال مهم در زمینه‌ی اثر پیش خلأسازی در عملکرد شبیه‌ساز ارتفاع بالا انجام شده است، مثلاً: پیش خلأسازی در ایجاد نوسان فشار چه نقشی دارد؟ فیزیک جریان در هنگام نوسان فشار با انجام پیش خلأسازی چه تفاوتی با حالت بدون پیش خلأسازی دارد؟ آیا با پیش خلأسازی می‌توان از شدت نوسان‌های فشار کاست؟ پاسخ به سؤال‌های اخیر می‌تواند در تعریف مناسب سناریو و تخمین دقیق‌تر عملکرد شبیه‌ساز ارتفاع بالا در آزمایش فضایی مختلف (نازل با نسبت انبساط‌های متفاوت) مؤثر باشد.

در ادامه، در بخش ۲ به معرفی تجهیزات استفاده‌شده و روش انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است. پس از آن در بخش ۳، نتایج مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده ارائه شده است. در زیربخش ۱.۳، ابتدا پدیده‌ی نوسان فشار و سپس در زیربخش ۲.۳ اثر پیش خلأسازی با تغییر A_d / A_e بررسی و مطالعه شده است. در زیربخش ۳.۳ نیز به زمان راهاندازی در اثر پیش خلأسازی و در زیربخش ۴.۳، به تحلیل‌های بسامدی پرداخته شده است.

۲. تجهیزات و روند آزمایش

تجهیزات آزمایش، شامل: سیستم تأمین هوای فشرده، پمپ خلأ، محفظه‌ی خلأ، نازل، نمونه‌ی آزمایشگاهی دیفیوزر گلوگاه ثانویه، و تجهیزات داده‌برداری بوده است. در شکل ۲، شماتیکی از دیفیوزر گلوگاه ثانویه، محفظه‌ی خلأ، نازل،

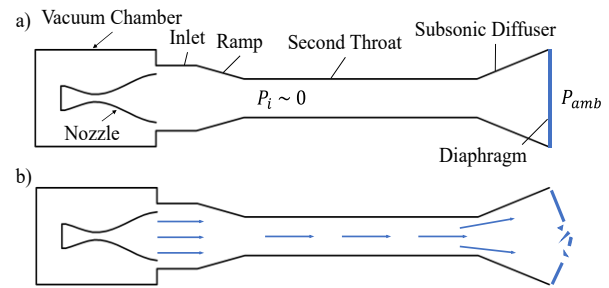


Figure 1. Schematic of pre-evacuation process in high-altitude test facility.

شکل ۱. شماتیکی از فرآیند پیش خلأسازی در یک بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا.

لوله‌ی مستقیم نشان داده‌اند که در اثر پیش خلأسازی، زمان راهاندازی دیفیوزر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، آشوکومار^۱ و همکاران (۲۰۱۲)^[۲] نیز با استفاده از پیش خلأسازی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه برای یک نازل مخروطی، زمان راهاندازی دیفیوزر را به‌طور چشمگیری کاهش داده‌اند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که انتخاب فضای پیش خلأسازی در زمان راهاندازی دیفیوزر، تأثیر قابل توجهی داشته است. سانکاران^۲ (۲۰۰۲)^[۸] تا فضای ابتدای رمپ دیفیوزر را پیش خلأسازی کرده است. آشوکومار و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵)^[۳، ۶] نیز در پژوهشی مشابه تا ابتدای گلوگاه ثانویه را پیش خلأسازی کرده‌اند. آناملای^۳ و همکاران (۱۹۹۸)^[۷] و پارک و همکاران (۲۰۰۸)^[۴] در آزمایش‌های مربوط به یک دیفیوزر لوله‌ی مستقیم، پیش خلأسازی را تا انتهای دیفیوزر انجام داده‌اند. همچنین فولادی و همکاران (۲۰۱۷)^[۲] با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی اثر فضای پیش خلأسازی در عملکرد راهاندازی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه پرداخته و نشان داده‌اند که افزایش فضای پیش خلأسازی در طول دیفیوزر، زمان راهاندازی را کاهش می‌دهد. افخمی و همکاران (۲۰۲۳)^[۹] نیز در پژوهشی به‌صورت تجربی نشان داده‌اند که پیش خلأسازی تمام طول دیفیوزر گلوگاه ثانویه، زمان راهاندازی را حدود ۵۵٪ کاهش می‌دهد. فولادی و همکاران (۲۰۲۳ و ۲۰۱۹)^[۹، ۱۰] همچنین نشان داده‌اند که در شرایط خاصی، پیش خلأسازی مانع از شکل‌گیری پدیده‌ی مخرب گذار از الگوی جدایش مستقل از موج ضربه‌ای^۴ به الگوی جدایش مقید به موج ضربه‌ای^۵ در نازل‌های سهموی، که بهینه تر است، می‌شود. آشوکومار و همکاران (۲۰۱۵)^[۶] به‌منظور کاهش زمان راهاندازی و جلوگیری از ورود جریان برگشتی به محفظه‌ی خلأ، ایده‌ی استفاده از یک مانع محدودکننده‌ی جریان برگشتی را استفاده کرده و طی یک آزمایش تجربی نشان داده‌اند که در حضور محدودکننده‌ی جریان برگشتی، پیشینه‌ی فشار محفظه‌ی خلأ در اثر کاهش جریان برگشتی، کاهش می‌یابد.

فولادی (۲۰۱۷)^[۱۱] نیز با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان داده است که استفاده از محدودکننده‌ی جریان برگشتی علی‌رغم تأثیر قابل توجه در کاهش جریان برگشتی، کاهش چشمگیری در زمان راهاندازی دیفیوزر ایجاد نمی‌کند. زیرا روند تخلیه‌ی جریان از محفظه‌ی خلأ با حضور مانع کاهش می‌یابد. در حالی که با به‌کارگیری مانع جریان برگشتی یک‌طرفه، علاوه‌بر کاهش پیشینه‌ی فشار محفظه، زمان راهاندازی دیفیوزر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

⁴ Free Shock Separation

⁵ Restricted Shock Separation

¹ Ashokkumar

² Sankaran

³ Annamalai

جدول ۱. مشخصات هندسی دیفیوزر گلوگاه ثانویه و نازل‌های استفاده‌شده.

Table 1. Geometrical specification of second throat exhaust diffuser and nozzles.

Geometric Parameter	Value	Geometric Parameter	Value
$(L/D)_{st}$	8	A_e / A^*	7.5, 15, 30 & 45
$(L/D)_d$	0.8	A_d / A^*	57.87
θ_m	6°	A_d / A_{st}	1.73
θ_{out}	6°	A_o / A_{st}	3.5

جدول ۲. مشخصات مبدل‌های فشار.

Table 2. Pressure transducer specifications.

Pressure transducer	Measured quantity	Measurement range	Total uncertainty (%)
Kulite-XCQ-062	d_{vc}, d_1, d_2	0-1 bar	0.35
TML PWF-10MPB	P_m	0-100 bar	0.29
Motorola MPX5500DP	$d_3 - d_{13}$	0-5 bar	1.45

داده‌برداری مختلف انجام و نتیجه گرفته شد که برای ثبت پدیده‌ی نوسان فشار، آزمایش‌ها با بسامد حدود ۵۵۰ هرتز داده‌برداری شوند.

معمولاً اختلاف مقدار اندازه‌گیری‌شده با مقدار واقعی به‌عنوان مقدار خطا در نظر گرفته می‌شود. اما در پژوهش حاضر تعریف ذکرشده‌ی خطا، کافی نیست. زیرا نیازمند مقدار واقعی کمیت است. لذا، از عدم قطعیت استفاده می‌شود. عدم قطعیت، مقدار ممکن برای یک خطاست. عدم قطعیت به‌صورت یک بازه حول مقدار اندازه‌گیری‌شده مشخص می‌شود. عدم قطعیت کل (U) شامل خطای بایاس^۶ و دقت است، که مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$U = \sqrt{\text{Bias}^2 + \text{Precision}^2} \quad (1)$$

در آزمایش حاضر، خطای بایاس غالب است. بنابراین می‌توان از خطای دقت صرف‌نظر کرد. بایاس خطایی ثابت و هدفمند است، که ناشی از خطای ابزارهای اندازه‌گیری است. عدم قطعیت مبدل‌های فشار با استفاده از عدم قطعیت کالیبراسیون مبدل‌ها، عدم قطعیت سیستم داده‌برداری، و عدم قطعیت مبدل فشار مطابق با رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شوند:^[۱۳]

$$\frac{U_p}{P} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{Calibration}}}{C.C.}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{DAQ}}}{\Delta V_{\text{DAQ}}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{Transducer}}}{\Delta V_{\text{Transducer}}}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن، C.C. ضریب کالیبراسیون مبدل‌های فشار و عدم قطعیت مبدل‌های فشار خود شامل ترکیب خطاهای تکرارپذیری، هیستریزیس، و خطای صفر هستند. جزئیات بیشتر محاسبه‌ی عدم قطعیت مبدل‌ها در نوشتار نجومی (۲۰۲۴)^[۱۴] ارائه شده است.

مشخصات و کمیت‌های اندازه‌گیری‌شده توسط مبدل‌های فشار به همراه عدم قطعیت کل آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. لازم است اشاره شود فشارهای اندازه‌گیری‌شده توسط مبدل‌های مذکور، فشار نسبی است.

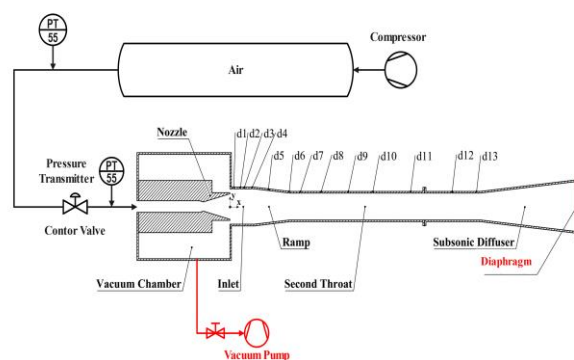


Figure 2. Schematic of high-altitude test facility equipped with vacuum pump for pre-evacuation.

شکل ۲. شماتیکی از بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا مجهز به پمپ خلأ برای پیش خلأسازی.

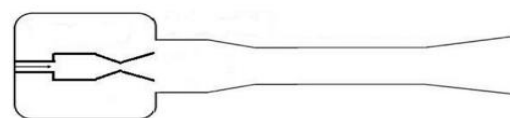


Figure 3. High-altitude test facility and data acquisition system.

شکل ۳. بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا و تجهیزات داده‌برداری.

و محل قرارگیری مبدل‌های فشار مشاهده می‌شود. آزمایش‌ها با استفاده از هوای فشرده در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالای پژوهشکده‌ی سامانه‌های حمل‌ونقل فضایی انجام شده‌اند. مخازن هوای فشرده، توانایی تأمین فشار ۵۰ بار را داشته‌اند، که محفظه‌ی نازل را تغذیه می‌کند. فشار محفظه‌ی نازل توسط یک شیر برقی در بالادست تنظیم می‌شده است. نازل و محفظه‌ی فشار درون یک محفظه با عنوان محفظه‌ی خلأ، به گونه‌ای جای‌گذاری شده است که سطح خروجی آن با سطح ورودی دیفیوزر در یک صفحه قرار بگیرد و همچنین تماسی با دیواره‌ی محفظه خلأ نداشته باشد. میان خروجی نازل و ورودی دیفیوزر یک گپ حلقوی وجود دارد، که محل عبور جریان از محفظه‌ی خلأ به دیفیوزر و بالعکس است. تصویری از بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا به همراه تجهیزات داده‌برداری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. دیفیوزر گلوگاه ثانویه از پایین‌دست به محفظه‌ی خلأ متصل بوده است، که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری فشارهای محفظه‌ی خلأ و نازل به ترتیب از مبدل‌های کولایت و تی‌ام‌ال و برای توزیع فشار در طول دیفیوزر نیز از ۱۳ مبدل با ترکیب کولایت و موتورولا با توجه به بازه‌ی اندازه‌گیری آن‌ها استفاده شده است. مبدل‌های کولایت با پاسخ بسامد طبیعی ۲۰۰ کیلوهرتز و مبدل موتورولا با پاسخ زمانی ۱ میلی‌ثانیه است. بسامد و زمان داده‌برداری باید متناسب با پدیده‌ی موردنظر انتخاب شوند. در غیر این‌صورت امکان ثبت پدیده‌های موردنظر وجود نخواهد داشت. جهت بررسی بسامد داده‌برداری مناسب، چند آزمایش با بسامد

⁶ Bias

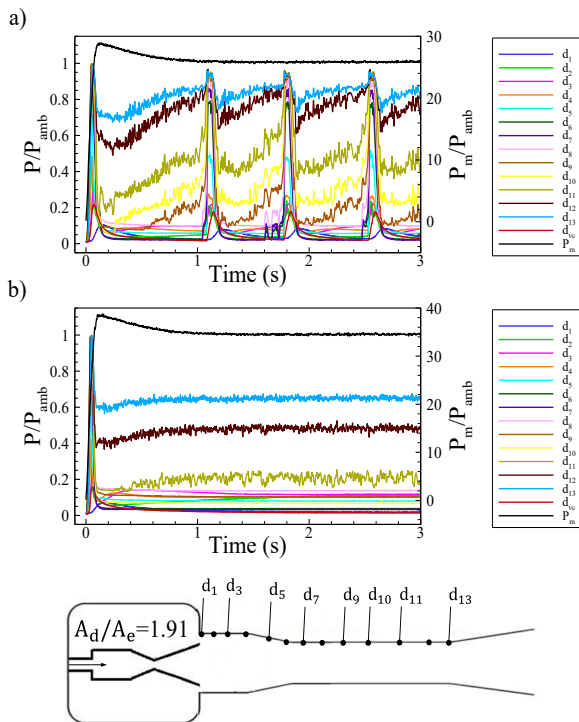


Figure 4. Pressure-time along the diffuser for $A_d / A_e = 1.91$: (a) pressure oscillation mode at motor pressure of 22.1 bar, (b) starting condition at motor pressure of 30 bar.

شکل ۴. نمودار فشار- زمان در طول دیفیوزر برای $A_d / A_e = 1.91$: (الف) حالت نوسان فشار در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲/۱ بار، (ب) حالت راه‌اندازی در فشار ۳۰ بار.

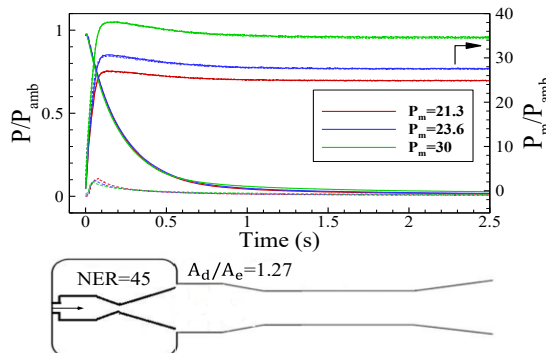


Figure 5. Pressure-time variation of vacuum chamber for $A_d / A_e = 1.27$ at the same motor pressure for without pre-evacuation (solid lines) and with pre-evacuation (dash lines).

شکل ۵. تغییرات فشار محفظه‌ی خلأ با زمان برای $A_d / A_e = 1.27$ در فشار محفظه‌ی نازل تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین).

زمانی فشار در مبدل‌های d_{11} تا d_{13} در انتهای دیفیوزر در حالت نوسانی (شکل ۴- الف) و حالت راه‌اندازی (شکل ۴- ب)، بیانگر مادون صوت شدن جریان در نواحی انتهایی دیفیوزر گلوگاه ثانویه است.

۲.۳. بررسی اثر پیش خلأسازی

جهت بررسی اثر پیش خلأسازی در نوسان‌ها، تغییرات فشار محفظه‌ی خلأ با زمان برای هر ۴ هندسه‌ی موردنظر در فشار محفظه‌ی نازل تقریباً یکسان و برای هر دو حالت بدون پیش خلأسازی و با پیش خلأسازی در شکل‌های ۵

در آزمایش کنونی، هندسه‌ی دیفیوزر ثابت در نظر گرفته شده و نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل، از طریق ۴ نازل با نسبت انبساط‌های ۷/۵، ۱۵، ۳۰، و ۴۵ تغییر کرده است. فشارگذاری محفظه‌ی نازل به‌صورت آنی تا فشار موردنظر انجام شده است.

به‌منظور بررسی اثر پیش خلأسازی، تمام فضای داخل دیفیوزر، محفظه‌های خلأ و نازل با استفاده از یک پمپ خلأ، تا فشار کمتر از ۰/۰۲ بار پیش خلأسازی شده‌اند. بدین منظور در خروجی دیفیوزر لبه‌ای همراه با واشر حلقوی جهت آب‌بندی قرار داده شده است، که پیش از فرآیند پیش خلأسازی یک درپوش فلزی به‌منظور جداسازی فضای داخلی دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ از محیط بیرون روی آن قرار می‌گیرد. با شروع فرآیند پیش خلأسازی، به‌علت تفاوت فشار میان اتمسفر و فضای داخل دیفیوزر، درپوش در جای خود باقی می‌ماند. سپس با تنظیم فشار محفظه‌ی نازل و فشارگذاری آن، درپوش به‌علت افزایش فشار در پشت آن از انتهای دیفیوزر جدا شده است. آزمایش‌ها از نسبت سطح ۱/۲۷ آغاز و به ترتیب نسبت سطح‌های ۱/۹۱، ۴/۱، و ۷/۸۱ در هر دو حالت با و بدون پیش خلأسازی انجام شده‌اند. آزمایش‌های نسبت سطح‌های ۱/۹۱، ۴/۱، و ۷/۸۱ در فشار محیط ۰/۸۹ بار و آزمایش نسبت سطح ۱/۲۷ در فشار محیط ۰/۸۷ بار در دمای حدود ۳۰۰ کلون انجام شده‌اند.

۳. نتایج

۳.۱. پدیده‌ی نوسان فشار

در نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل (A_d / A_e) بالا و فشار محفظه‌ی نازل نزدیک راه‌اندازی، ناپایداری‌هایی به‌صورت نوسان فشار هارمونیک در نقاط مختلف دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ مشاهده می‌شود. نوسان‌های اخیر با نویز زیاد، مطابق با دوره‌ی تناوب نوسان‌های فشار همراه است. برای نمونه، تغییرات فشار در نقاط مختلف با زمان برای دو حالت نوسان فشار و حالت راه‌اندازی در شرایط پیش خلأسازی‌شده در شکل ۴ (الف و ب) مشاهده می‌شود. شکل ۴- الف، نوسان فشار در محفظه‌ی خلأ و در طول دیفیوزر را برای نسبت سطح ۱/۹۱ و فشار محفظه‌ی نازل ۲۲/۱ بار و شکل ۴- ب، شرایط راه‌اندازی را برای همان هندسه در فشار محفظه‌ی نازل ۳۰ بار نشان می‌دهند. مطابق شکل ۴، در حالت نوسانی با شروع فشارگذاری محفظه‌ی نازل، مقدار فشار تقریباً در طول دیفیوزر روندی کاهشی، مشابه حالت راه‌اندازی داشته است. اما در مبدل‌های انتهایی دیفیوزر، نوسان فشار غیرهارمونیک نیز مشاهده می‌شود، که در حالت نوسانی و برخلاف حالت راه‌اندازی، فشار نقاط مذکور، روندی افزایشی داشته است. سپس با گذشت زمان، فشار در تمام طول دیفیوزر با دامنه‌های متفاوت ولی با بسامد یکسان نوسان کرده و تا انتهای فشارگذاری محفظه‌ی نازل، نوسان‌های هارمونیک ادامه داشته‌اند. در حالت راه‌اندازی (شکل ۴- ب) همانند حالت نوسانی، نوسان فشار غیرهارمونیک در مبدل‌های انتهایی دیفیوزر مشاهده می‌شود. با این تفاوت که در طول زمان، میانگین آن‌ها ثابت بوده است. همچنین میان نوسان‌ها در نقاط مختلف در طول دیفیوزر، اختلاف زمانی دیده می‌شود؛ که البته در سایر نسبت سطح‌ها نیز مشاهده می‌شود.

نوسان‌های فشار غیرهارمونیک در انتهای دیفیوزر، که در هر دو حالت نوسان فشار و راه‌اندازی دیده می‌شوند، به‌دلیل جدایش جریان آشفته در نواحی مذکور بوده است.^[۱۱] البته به‌دلیل برهمکنش شدید امواج ضربه‌ای و لایه‌ی مرزی در دیفیوزر، جریان در تمام طول دیفیوزر آشفته بوده است. همچنین میانگین

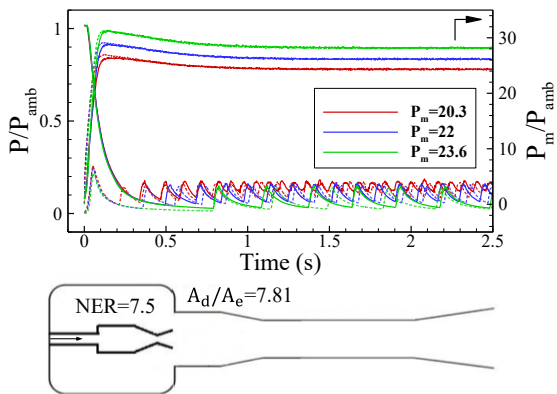


Figure 8. Pressure-time variation of vacuum chamber for $A_d/A_e = 7.81$ at the same motor pressure for without pre-evacuation (solid lines) and with pre-evacuation (dash lines).

شکل ۸. تغییرات فشار محفظه خلأ با زمان برای $A_d/A_e = 7.81$ در فشار محفظه نازل تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین).

جریان در ورودی دیفیوزر برابر شود. این برابری فشار، در لحظه‌ی قله‌ی فشار دیده می‌شود. سپس با افزایش فشار محفظه‌ی نازل و توسعه‌ی بیشتر جریان در نازل، فشار در خروجی نازل کاهش می‌یابد و سبب تخلیه‌ی جریان از محفظه و به دنبال آن کاهش فشار می‌شود. سرانجام با راه‌اندازی شدن نازل و دیفیوزر، خلأ نسبی در اطراف نازل ایجاد می‌شود. اما در آزمایش اخیر، فشارگذاری محفظه‌ی نازل در کسری از ثانیه انجام شده و تقریباً فرآیند راه‌اندازی شدن نازل آنی بوده است. اما در حین این افزایش فشار ناگهانی، نازل در شرایط فرامنبسط عمل می‌کند، که به دلیل امواج ضربه‌ای مایل تشکیل شده در خروجی نازل، امکان ورود جریان با فشار بیشتر به محفظه‌ی خلأ وجود دارد. این فرآیند پُر و خالی شدن محفظه در شروع فشارگذاری محفظه‌ی نازل، در کمتر از ۰/۲ ثانیه رخ می‌دهد.

برای نسبت سطح ۱/۹۱ در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در فشار ۲۱/۵ بار و در حالت پیش خلأسازی، زمان شروع نوسان‌ها، کمتر از حالت بدون پیش خلأسازی بوده است. در فشار مذکور با وجود آنکه نوسان‌ها کاملاً شکل نگرفته و میرا شده‌اند، اما تعداد نوسان‌ها در حالت پیش خلأسازی شده بیشتر از حالت بدون پیش خلأسازی بوده است. البته این تفاوت در تعداد نوسان‌های میراشونده می‌تواند به اختلاف جزئی مقدار فشارها نیز مرتبط باشد. زیرا فشار محفظه‌ی نازل در هر دو حالت دقیقاً یکسان نیست. در این صورت، نوسان‌ها به تغییرات کوچک فشار محفظه‌ی نازل حساس خواهند بود.

همچنین برای نسبت سطح ۴/۱ (شکل ۷) مشاهده می‌شود که به‌طور کلی نوسان فشار در حالت با پیش خلأسازی در زمان کمتر شروع شده است. از طرفی بسامد و دامنه‌ی نوسان‌ها در حالت پیش خلأسازی تقریباً ثابت مانده است. حتی نوسان‌های فشار شبه‌هارمونیک با دامنه‌ی متغیر با زمان، که در فشار ۲۱/۳ بار که در حالت بدون پیش خلأسازی وجود دارد، در حالت پیش خلأسازی شده نیز دیده می‌شود.

در شکل ۸، برای نسبت سطح ۷/۸۱، کاهش زمان راه‌اندازی در حالت با پیش خلأسازی مشهود است. به‌صورت کلی پیش خلأسازی فقط در زمان شروع نوسان‌ها تأثیرگذار است و کاهش زمان مذکور را به همراه دارد. به‌عبارتی دیگر،

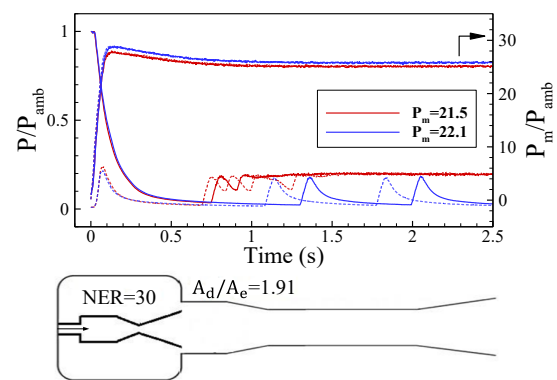


Figure 6. Pressure-time variation of vacuum chamber for $A_d/A_e = 1.91$ at the same motor pressure for without pre-evacuation (solid lines) and with pre-evacuation (dash lines).

شکل ۶. تغییرات فشار محفظه‌ی خلأ با زمان برای $A_d/A_e = 1.91$ در فشار محفظه‌ی نازل تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین).

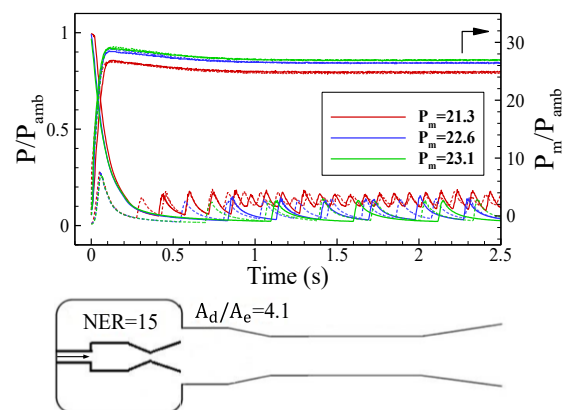


Figure 7. Pressure-time variation of vacuum chamber for $A_d/A_e = 4.1$ at the same motor pressure for without pre-evacuation (solid lines) and with pre-evacuation (dash lines).

شکل ۷. تغییرات فشار محفظه‌ی خلأ با زمان برای $A_d/A_e = 4.1$ در فشار محفظه‌ی نازل تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین).

الی ۸ مشاهده می‌شوند؛ که در آن‌ها، خطوط توپر حالت بدون پیش خلأسازی و خطوط خط‌چین، حالت با پیش خلأسازی را نشان می‌دهند.

با دقت در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در نسبت سطح ۱/۲۷ در حالت پیش خلأسازی، نوسانی وجود ندارد. اما با توجه به شکل مذکور، پیش خلأسازی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در زمان راه‌اندازی دیفیوزر اثرگذار بوده و باعث کاهش زمان مذکور در هنگام راه‌اندازی شده است. با بررسی بیشتر شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که در ثانیه‌های ابتدایی، فشارگذاری محفظه‌ی نازل یک افزایش فشار ناگهانی در محفظه در حالت پیش خلأسازی شده داشته است. مطابق با شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده برای نازل از نوع بل توسط افخمی و همکاران (۲۰۲۳)^[۹] در ابتدای فرآیند راه‌اندازی نازل، یک موج ضربه‌ای قائم شکل می‌گیرد. این موج ضربه‌ای سبب بیشتر شدن فشار ورودی دیفیوزر نسبت به محفظه‌ی خلأ و در ادامه، ورود جریان به محفظه که پیش از آن پیش خلأسازی شده بود، می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که فشار محفظه با فشار

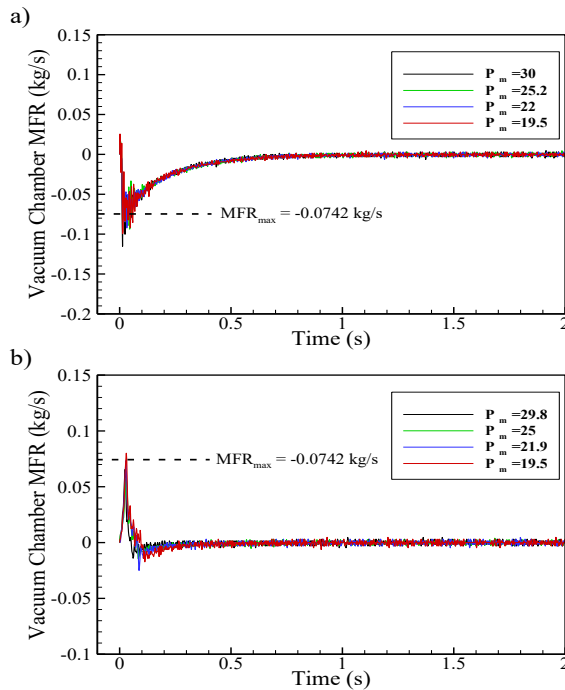


Figure 10. Variation of vacuum chamber mass flow rate with time for $A_d / A_e = 1.27$: (a) without pre-evacuation, (b) with pre-evacuation.

شکل ۱۰. تغییرات دبی جرمی محفظه خلأ با زمان برای $A_d / A_e = 1.27$: (الف) بدون پیش خلأسازی، (ب) با پیش خلأسازی.

محفظة خلأ به تدریج انجام شده و دبی جرمی نیز به صفر میل کرده است. صفر شدن دبی جرمی به معنای راهاندازی دیفیوزر و برقراری شرایط خلأ نسبی است. این روند برای فشارهای نشان داده شده در شکل ۱۰ یکسان است.

در حالت پیش خلأسازی شده (شکل ۱۰-ب)، مشاهده می‌شود که دبی جرمی ابتدا از صفر به بیش از 0.05 کیلوگرم بر ثانیه افزایش یافته است، که نشان‌دهنده ورود جرم به محفظه خلأ به محض فشارگذاری محفظه نازل است. پس از آن دبی با نرخ کمتری نسبت به حالت بدون پیش خلأسازی کاهش یافته و به حدود منفی 0.01 کیلوگرم بر ثانیه رسیده است.

یکی از علت‌هایی که می‌توان برای زمانی طولانی راهاندازی دیفیوزر در نسبت سطح $1/27$ متصور شد، خفگی جریان در گپ حلقوی است. یعنی جریان در محل گپ حلقوی صوتی شود. صوتی شدن جریان برگشتی به محفظه خلأ نیز در شبیه‌سازی‌های عددی مشاهده شده است.^[۱۱] برای بررسی صوتی شدن جریان در محل گپ حلقوی می‌توان از روابط دینامیک گاز برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی دبی جرمی استفاده کرد. برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی دبی جرمی از رابطه ۴ استفاده می‌شود:^[۱۵]

$$\dot{m}_{\max} = 0.04018 \times \frac{P_0 A_{\text{gap}}}{\sqrt{T_0}} \quad (4)$$

که در آن، P_0 و T_0 به ترتیب فشار و دمای سکون در مقطع موردنظر هستند. برای استفاده از رابطه‌ی اخیر، مقادیر فشار و دمای سکون با استفاده از نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۱۶ و ۱۱] به ترتیب 0.5 بار و 300 کلوین تخمین زده می‌شوند، که در این صورت بیشینه‌ی دبی عبوری از گپ حلقوی برابر با 0.0742 کیلوگرم بر ثانیه است. این مقدار در نمودارهای شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در حالت بدون پیش خلأسازی، در شرایطی که دبی محفظه منفی

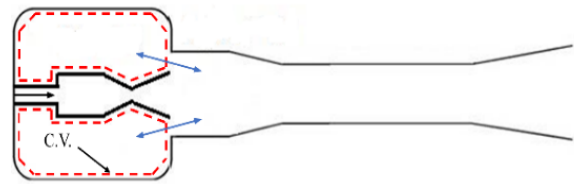


Figure 9. Assumed control volume in vacuum chamber.

شکل ۹. حجم کنترل فرض شده در محفظه خلأ.

فشار محفظه نازل شروع و خاتمه‌ی نوسان‌ها (راهاندازی) تفاوتی با حالت بدون پیش خلأسازی ندارد. علاوه بر نسبت سطح $1/27$ ، در سایر نسبت سطح‌ها نیز افزایش فشار ناگهانی اما با شدت بیشتر در لحظات اولیه‌ی فشارگذاری محفظه نازل در حالت پیش خلأسازی شده دیده می‌شود. روند تغییرات فشار طی فرآیند اخیر با نوسان‌های فشار شباهت دارد. بنابراین، نوسان محفظه خلأ می‌تواند به دلیل فرآیند پُر و خالی شدن آن باشد. از طرفی، درون نازل‌ها موج ضربه‌ای تشکیل نمی‌شود، که عامل فرآیند اخیر باشد. در نتیجه، عامل آن در پایین دست محفظه خلأ است. لازم است اشاره شود به طور مشابه، تفاوتی در تغییرات فشار در طول دیفیوزر در هر دو حالت با و بدون پیش خلأسازی وجود ندارد. از این رو در شکل‌های ۵ الی ۸، فقط به نمایش تغییرات فشار محفظه خلأ به منظور نشان دادن اثر پیش خلأسازی در پدیده‌ی نوسان فشار اکتفا شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۵ الی ۸ مشاهده می‌شود، در حالت پیش خلأسازی شده، با شروع فشارگذاری محفظه نازل به علت تفاوت فشار در ورودی دیفیوزر و محفظه خلأ، یک افزایش فشار ناگهانی در تمام هندسه‌ها رخ داده است، که مستقل از حالت نوسانی یا راهاندازی دیفیوزر بوده است. علت پدیده‌ی رخ داده نیز براساس مراجع پُر شدن محفظه خلأ در هنگام فشارگذاری محفظه نازل عنوان شده است. همچنین اشاره شده است که افزایش فشار ناگهانی اخیر در لحظات ابتدایی فشارگذاری به پدیده‌ی نوسان فشار در محفظه خلأ شباهت دارد. از این رو بررسی پُر و خالی شدن محفظه می‌تواند به شناخت پدیده‌ی نوسان فشار در محفظه خلأ کمک کند.

در ادامه، با فرض یک حجم کنترل در محفظه خلأ مطابق با شکل ۹ و استفاده از روابط بقای جرم و ترمودینامیک، دبی جرمی محفظه از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\gamma RT}{V} (\dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}}) = \frac{\gamma RT}{V} \dot{m}_{\text{net}} \quad (3)$$

رابطه‌ی ۳، دبی جرمی خالص عبوری از مرزهای حجم کنترل را با نرخ تغییر فشار آن مرتبط می‌سازد، که در آن علامت مثبت به معنای ورود جرم و علامت منفی به معنای خروج جرم از محفظه است. با استفاده از رابطه‌ی اخیر، تغییرات دبی جرمی محفظه مطابق با حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل ۹ قابل محاسبه خواهد بود. بدین منظور، تغییرات دبی جرمی محفظه خلأ برای نسبت سطح $1/27$ در فشارهای مختلف برای حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که علامت مثبت در آن به معنای ورود جریان به محفظه خلأ از سطح گپ حلقوی و علامت منفی به معنای خروج جرم است. مطابق شکل اخیر، در حالت بدون پیش خلأسازی (شکل ۱۰-الف)، برای لحظاتی دبی جرمی مثبت بوده و جریان وارد محفظه خلأ شده است؛ اما به طور ناگهانی دبی مذکور کاهش یافته و منفی شده است، که نشان می‌دهد فشار ورودی دیفیوزر از محفظه خلأ کمتر بوده است. پس از آن، روند تخلیه‌ی

جدول ۳. زمان راهاندازی دیفیوزر در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی.
Table 3. Diffuser starting time with and without pre-evacuation.

A_d / A_e	Motor pressure (bar)	Starting time without pre-evacuation (s)	Starting time with pre-evacuation (s)	Difference (%)
1.27	19.5	2.643	1.713	53.3
1.27	22	4.207	1.845	128
1.27	25	3.186	2	59.3
1.91	23	2.048	1.206	69.8
1.91	25	2.15	1.203	78.8
1.91	30	2.44	1.229	98.5
4.1	25	2.07	0.778	166
7.81	25	1.88	0.96	95.8

نوسان فشار دیده می‌شود. در حالت بدون پیش خلأسازی (شکل ۱۱-الف) با فشارگذاری محفظه‌ی نازل، دبی به‌طور ناگهانی وارد محفظه شده (دبی جرمی مثبت) و با افزایش فشار تا قله‌ی آن دبی کاهش یافته است. تا اینکه در قله‌ی فشار، دبی تقریباً صفر شده است. این پدیده همان‌طور که اشاره شد، در نتایج عددی نیز مشاهده شده است. پس از آن نیز محفظه به تدریج خالی شده است. در حالت پیش خلأسازی شده نیز مشابه حالت اخیر (شکل ۱۱-ب)، رخ داده، با این تفاوت که ابتدا دبی مثبت بوده و جریان وارد محفظه شده و به تدریج با برقراری جریان مافوق صوت در ورودی دیفیوزر، جرم از محفظه خارج شده است.

۳.۳. زمان راهاندازی

زمان لازم برای ایجاد خلأ نسبی در اطراف نازل را زمان راهاندازی دیفیوزر گویند. بنابراین فشار محفظه‌ی خلأ باید کمتر از فشار خروجی از نازل در شرایط راهاندازی باشد. برای به دست آوردن فشار خلأ نسبی می‌توان از روابط آیزنتروپیک استفاده کرد. بدین منظور فرض می‌شود جریان تا دیواره‌ی دیفیوزر منبسط می‌شود؛ که در این صورت نیاز به پارامتر A_d / A^* است، که این مقدار در آزمایش حاضر، ثابت و برابر با 57.87 بوده است. از روابط آیزنتروپیک برای نازل (P_d / P_m) برابر با 0.0056 بوده است. حال با داشتن پارامتر اخیر می‌توان فشار خلأ نسبی را در هر فشار محفظه‌ی نازل محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه کرد.

با مقایسه‌ی نتایج حالت پیش خلأسازی شده با حالت بدون پیش خلأسازی شده در جدول ۳، کاهش چشمگیر زمان راهاندازی در حالت بدون پیش خلأسازی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، در حالت پیش خلأسازی شده، کاهش زمان راهاندازی با افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل از نسبت سطح $1/27$ تا $4/1$ بیشتر شده است. افخمی و همکاران (۲۰۲۳)،^[۹] برای نسبت سطح $1/31$ ، کاهش ۵۵ درصدی زمان راهاندازی دیفیوزر را گزارش کرده‌اند.

۴.۳. تحلیل بسامدی

در بخش حاضر، تبدیل فوریه‌ی سریع نوسان‌ها برای موقعیت‌های مختلف در طول دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ برای سه نسبت سطح $1/91$ ، $4/1$ و $7/81$ نشان داده شده است؛ که در آن‌ها، خطوط پُررنگ برای

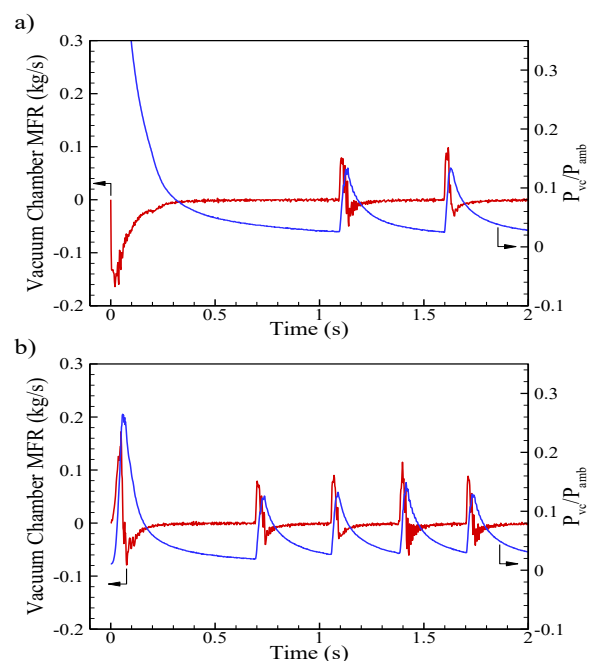


Figure 11. Variation of vacuum chamber mass flow rate with time for $A_d / A_e = 4.1$ at motor pressure of 23 bar: (a) without pre-evacuation, (b) with pre-evacuation.

شکل ۱۱. تغییرات دبی جرمی محفظه‌ی خلأ با زمان برای $A_d / A_e = 4.1$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۳ بار: (الف) بدون پیش خلأسازی، (ب) با پیش خلأسازی.

شده و در حال تخلیه بوده است، امکان صوتی شدن گپ حلقوی برای لحظاتی، در حدود 0.07 ثانیه وجود دارد. اما این زمان به اندازه‌ای نیست که در زمان راهاندازی دیفیوزر تأثیر چشمگیری گذارد. همچنین در حالت پیش خلأسازی شده، می‌توان گفت که جریان در محل گپ حلقوی صوتی نشده است.

به‌منظور بررسی دبی جرمی در حالت نوسان فشار، به‌عنوان نمونه، نمودار تغییرات دبی جرمی محفظه‌ی خلأ برای نسبت سطح $4/1$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۳ بار برای حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی در شکل ۱۱ ترسیم شده است. علامت مثبت در شکل مذکور به معنای ورود جریان به محفظه‌ی خلأ از سطح گپ حلقوی و علامت منفی به معنای خروج جرم است. مطابق با شکل ۱۱، در هر دو حالت با و بدون پیش خلأسازی، نوسان دبی جرمی همزمان با

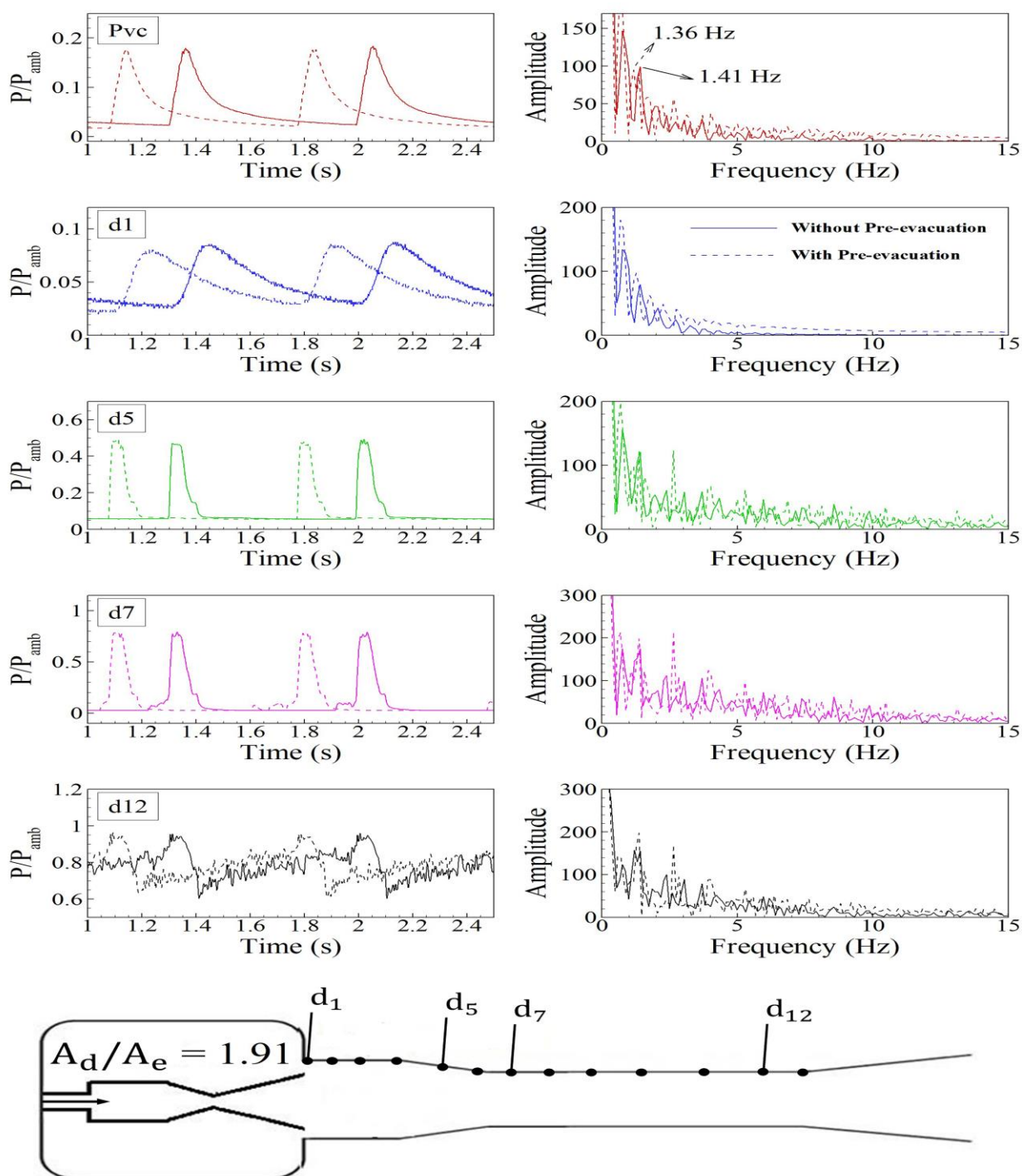


Figure 12. Pressure oscillation over time and fast Fourier transform of oscillation along the diffuser for $A_d / A_e = 1.91$ at motor pressure of 22.1 bar.

شکل ۱۲. نوسان‌های فشار در طول زمان و تبدیل فوری سریعی نوسان‌ها در طول دیفیوزر برای $A_d / A_e = 1.91$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲/۱ بار.

قله‌ها و دره‌های نوسان فشار در ورودی دیفیوزر با سایر نقاط در طول دیفیوزر است. در واقع، محفظه‌ی خلأ و ورودی دیفیوزر نسبت به پایین‌دست، تأخیر دارند؛ که به معنای ورود جرم به محفظه‌ی خلأ پس از رخ دادن نوسان فشار در پایین‌دست است. این تأخیر زمانی در حالت پیش خلأسازی شده نیز وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که دامنه‌ی نوسان‌ها در نقاط مختلف در هر دو حالت با و بدون پیش خلأسازی یکسان بوده است. برای نسبت سطح ۴/۱ در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با پیش خلأسازی، بسامد نوسان‌ها کمی افزایش یافته است. البته این افزایش به علت اختلاف در فشار محفظه‌ی نازل اعمالی است.

حالت بدون پیش خلأسازی و خطوط خطچین برای حالت پیش خلأسازی شده است.

در شکل ۱۲، نوسان‌ها و تحلیل بسامدی $A_d / A_e = 1.91$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲/۱ بار مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بسامد نوسان‌ها در محفظه‌ی خلأ و در تمام طول دیفیوزر یکسان اما با دامنه‌ی نوسان متفاوت بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که بسامد پیش خلأسازی تقریباً با بسامد حالت بدون پیش خلأسازی یکسان است. نکته‌ی دیگری که دیده می‌شود، عدم تطابق زمانی

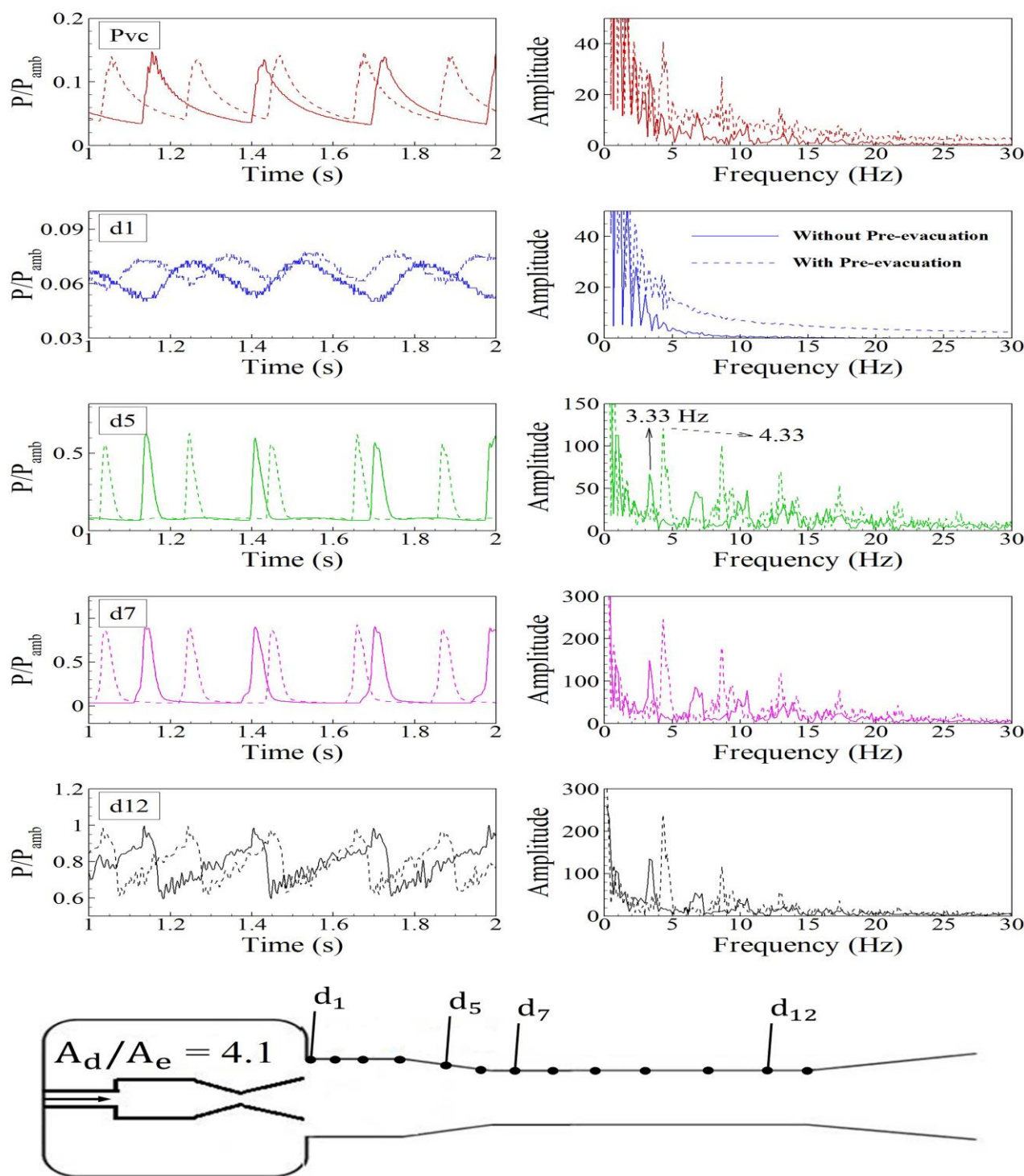


Figure 13. Pressure oscillation over time and fast Fourier transform of oscillation along the diffuser for $A_d / A_e = 4.1$ at motor pressure of 22.6 bar.

شکل ۱۳. نوسان‌های فشار در طول زمان و تبدیل فوریه‌ی سریع نوسان‌ها در طول دیفیوزر برای $A_d / A_e = 4.1$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲/۶ بار.

نوسان‌ها از ابتدای دیفیوزر تا اواسط گلوگاه ثانویه به دلیل وجود امواج ضربه‌ای قوی به‌ویژه در ورودی دیفیوزر و ابتدای دیفیوزر گلوگاه ثانویه بوده است، که جریان مافوق صوت خروجی از نازل به دیواره‌ی دیفیوزر برخورد کرده و امواج قوی‌ای حاصل شده است. کاهش دامنه‌ی نوسان‌ها نیز به دلیل متراکم و مادون صوت شدن جریان پس از عبور از قطاری از امواج ضربه‌ای بوده است، که موجب شده است تا جریان در نواحی انتهایی گلوگاه ثانویه با دامنه‌ی کمتری نوسان کند.

که به علت دستی بودن تنظیم آن، اعمال دقیق فشار محفظه‌ی نازل امکان‌پذیر نیست. تأخیر زمانی نوسان در ورودی دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ در این هندسه نیز وجود دارد.

از طرفی همانند شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که دامنه‌ی نوسان‌ها در ابتدای ورودی دیفیوزر کم بوده است، اما تا ورودی گلوگاه ثانویه افزایش یافته است. پس از آن، دامنه تا انتهای دیفیوزر، روند کاهشی داشته است. افزایش دامنه‌ی

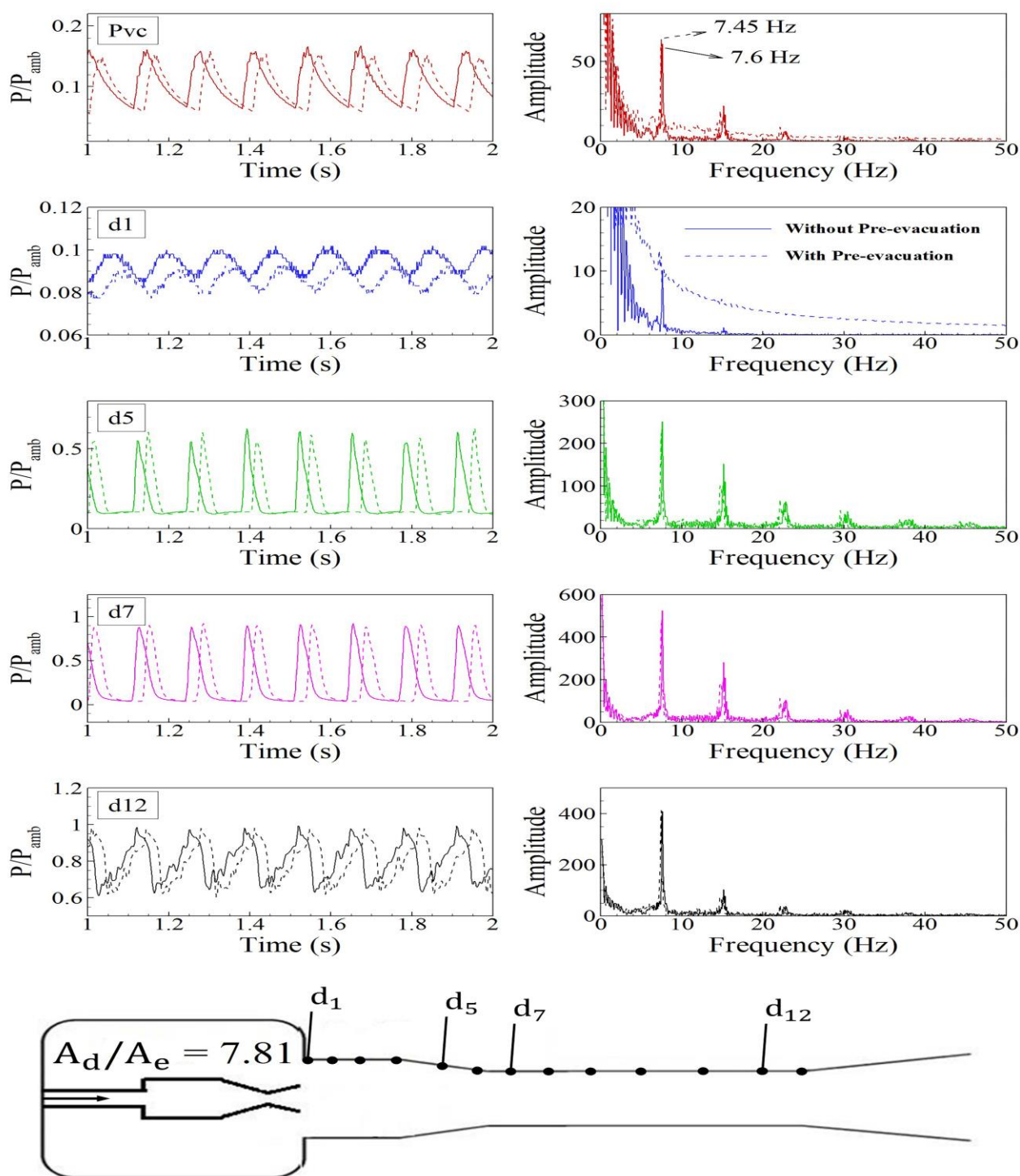


Figure 14. Pressure oscillation over time and fast Fourier transform of oscillation along the diffuser for $A_d / A_e = 7.81$ at motor pressure of 22 bar.

شکل ۱۴. نوسان‌های فشار در طول زمان و تبدیل فوریه سریع نوسان‌ها در طول دیفیوزر برای $A_d / A_e = 7.81$ در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲ بار.

دامنه در تمام طول دیفیوزر و محفظه را به دنبال داشته است. این رفتار در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی یکسان بوده است. چنین رفتاری در بسامد و دامنه با تغییر نسبت سطح در فشارگذاری با رویکرد تدریجی در نوشتار فولادی و همکاران (۲۰۲۳)^[۱۷] نیز مشاهده شده است.

جهت بررسی بهتر تغییرات بسامد، در شکل ۱۵، بسامد نوسان‌ها بر حسب فشار محفظه‌ی نازل برای هندسه‌های مختلف و در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در یک فشار محفظه‌ی نازل تقریباً

مطابق شکل ۱۴، نیز در فشار محفظه‌ی نازل ۲۲ بار بسامد، نوسان‌ها در هر دو حالت به هم نزدیک و تقریباً یکسان بوده‌اند؛ که نشان می‌دهد پیش خلأسازی در بسامد نوسان‌ها نقش به سزایی ندارد. دامنه‌ی نوسان‌ها نیز تقریباً با یکدیگر برابر بوده است. در شکل اخیر، ۵ مود مختلف نوسان مشاهده می‌شود.

از مقایسه‌ی نتایج تحلیل بسامد سه نسبت سطح ذکر شده، نتیجه گرفته شده است که بسامد نوسان‌ها با افزایش نسبت سطح افزایش یافته‌اند. از طرفی، تغییرات دامنه‌ی نوسان‌ها نیز نشان داده است که افزایش نسبت سطح، افزایش

۱/۲۷، ۱/۹۱، ۴/۱ و ۷/۸۱ با استفاده از ۴ نازل مخروطی با نسبت انبساط‌های مختلف در دو حالت با و بدون پیش خلأسازی انجام شده و نتایج نشان داده‌اند که ناپایداری جریان در نسبت سطح‌های بیشتر از ۱/۲۷ در بازه‌ی خاصی از فشار محفظه‌ی نازل به صورت نوسان فشار متناوب آغاز و در تمام طول دیفیوزر و محفظه‌ی خلأ مشاهده شده است. افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر در یک فشار محفظه‌ی نازل ثابت، کاهش بسامد نوسان‌ها و افزایش دامنه‌ی آن‌ها را به همراه داشته است. از طرفی دیگر، افزایش فشار محفظه‌ی نازل در یک نسبت سطح ثابت نیز موجب کاهش بسامد نوسان‌ها و افزایش دامنه‌ی آن‌ها شده است. آزمایش‌های مربوط به پیش خلأسازی نشان داده است که پیش خلأسازی در شکل‌گیری نوسان‌های فشار و مشخصات آن‌ها نقشی نداشته و فقط شروع نوسان و راه‌اندازی دیفیوزر را تسریع بخشیده است. کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر نیز بسته به نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل متفاوت بوده است. همچنین مشاهده شده است که در هنگام نوسان فشار، محفظه‌ی خلأ متناوباً پُر و خالی می‌شده است.

"فهرست علائم"

A_d / A_e	Area ratio of diffuser inlet to nozzle exit
A_d / A^*	Area ration of diffuser inlet to nozzle throat
A_e / A^*	Area ratio of nozzle exit to nozzle throat
A_o / A_{st}	Area ratio of subsonic diffuser to second throat
A_d / A_{st}	Area ratio of diffuser inlet to second throat
C.C.	Calibration coefficient
C.V.	Control volume
d	Position of pressure transducer
DAQ	Data acquisition system
f	Frequency (Hz)
L/D	Length to diameter ratio
MFR	Mass flow rate (kg / s)
NER	Nozzle expansion ratio
P	Static pressure (bar)
P_m	Motor pressure (bar)
R	Gas constant
T	Static temperature (K)
U	Uncertainty (%)
t	time (s)
V	Volume of vacuum chamber (m ³)
ΔV	Voltage variation
Greek Symbols	
γ	Specific heat ratio
θ_m	Convergence angle of ramp
θ_{out}	Divergence angle of subsonic diffuser
Subscripts	
d	Diffuser inlet
gap	Annular gap between the nozzle outlet and the diffuser inlet
st	Second throat
VC	Vacuum chamber

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

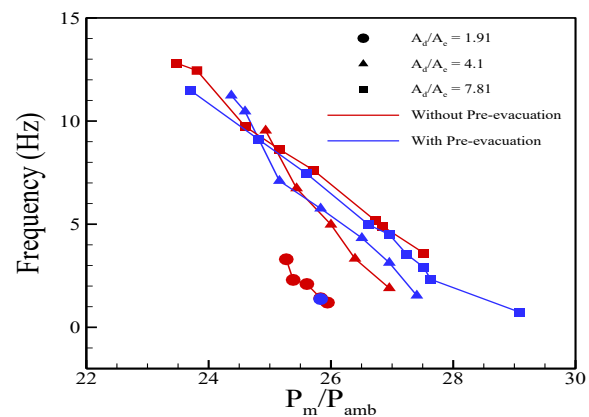


Figure 15. Variation of oscillation frequency with motor pressure for different motor pressure with and without pre-evacuation.

شکل ۱۵. تغییرات بسامد نوسان‌ها با فشار محفظه‌ی نازل برای نسبت سطح‌های مختلف در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی.

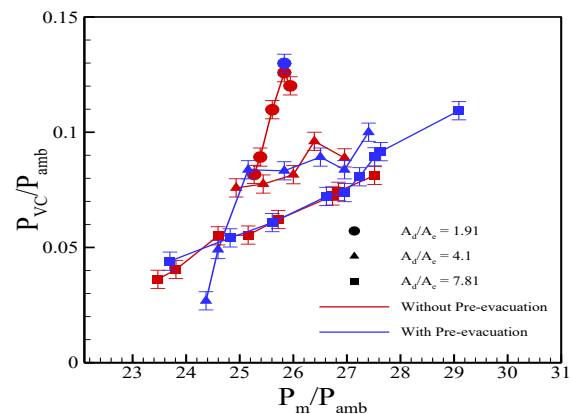


Figure 16. Variation of oscillation amplitude with motor pressure for different motor pressure with and without pre-evacuation.

شکل ۱۶. تغییرات دامنه‌ی نوسان‌ها با فشار محفظه‌ی نازل برای نسبت سطح‌های مختلف در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی.

ثابت با افزایش A_d / A_e ، افزایش بسامد نوسان‌ها ملاحظه می‌شود. همچنین با افزایش فشار محفظه‌ی نازل در یک A_d / A_e ثابت، بسامد کاهش یافته است. در A_d / A_e های کمتر با افزایش فشار محفظه‌ی نازل، افت بسامد نوسان‌ها شدیدتر بوده است. تغییرات بسامد در اثر پیش خلأسازی نیز مطابق شکل اخیر قابل ملاحظه نبوده و اندک تفاوت موجود به دلیل اختلاف در فشار محفظه‌ی نازل حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی بوده است. همچنین در شکل ۱۶، روند تغییرات دامنه‌ی نوسان‌های محفظه‌ی خلأ با فشار محفظه‌ی نازل در نسبت سطح‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، دامنه با افزایش فشار محفظه‌ی نازل در یک هندسه‌ی ثابت، افزایش و با افزایش A_d / A_e در یک فشار محفظه‌ی نازل ثابت، کاهش یافته است. به‌طور مشابه، پیش خلأسازی اثری در رفتار دامنه‌ی نوسان‌ها نداشته است. این روند برای دامنه‌ی نوسان‌ها در طول دیفیوزر نیز صادق بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، با هدف بررسی اثر پیش خلأسازی در پدیده‌ی نوسان فشار در دیفیوزر گلوگاه ثانویه برای یک نمونه‌ی آزمایشگاهی بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا انجام شده است. آزمایش‌ها در نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل‌های

منابع - References

1. Fouladi, N., Afkhami, S., and Pasandideh Fard, M., 2023. Experimental and comprehensive investigation of second throat diffuser area effect on ground test of a thrust optimized parabolic nozzle with different expansion ratios. *Acta Astronautica*, 209, pp. 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.004>
2. Fouladi, N., Mohamadi, A., and Rezaei, H., 2017. Numerical investigation of pre-evacuation influences of second throat exhaust diffuser. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*, 5(2), pp. 55-69. [In Persian].
3. Ashokkumar, R., Sankaran, S., and Sundararajan, T. "Investigation on the performance of second throat supersonic exhaust diffuser for starting higher area ratio nozzles". *28th Aerodynamic Measurement Technology, Ground Testing, and Flight Testing Conference including the Aerospace T&E Days Forum*, (2012). <https://doi.org/10.2514/6.2012-3294>
4. Park, B. H., Lee, J. H., and Yoon, W., 2008. Studies on the starting transient of a straight cylindrical supersonic exhaust diffuser: Effects of diffuser length and pre-evacuation state. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(5), pp. 1369-1379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.006>
5. Park, B. H., Lim, J. H., and Yoon, W., 2008. Fluid dynamics in starting and terminating transients of zero-secondary flow ejector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(1), pp. 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.06.008>
6. Ashokkumar, R., Sankaran, S., Srinivasan, K., and Sundararajan, T., 2015. Effects of vacuum chamber and reverse flow on supersonic exhaust diffuser starting. *Journal of Propulsion and Power*, 31(2), pp. 750-754. <https://doi.org/10.2514/1.B35156>
7. Annamalai, K., Visvanathan, K., Sriramulu, V., and Bhaskaran, K., 1998. Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 17(3), pp. 217-229. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(98\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(98)00002-8)
8. Sankaran, S., 2002. CFD analysis for simulated altitude testing of rocket motors. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 48, pp. 153-162. <http://dx.doi.org/10.5589/q02-018>
9. Afkhami, S., Fouladi, N., and Pasandideh Fard, M., 2023. Experimental and numerical investigation of transient starting of pre-evacuated exhaust diffuser in high altitude ground test. *Aerospace Science and Technology*, pp. 108-111. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108111>
10. Fouladi, N., Farahani, M., and Mirbabaei, A., 2019. Performance evaluation of a second throat exhaust diffuser with a thrust optimized parabolic nozzle. *Aerospace science and technology*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105406>
11. Fouladi, N., 2017. Numerical investigation of back flow arrester effect on altitude test simulator starting performance. *Modares Mechanical Engineering*, 17(7), pp. 185-196. [In Persian]. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1396.17.7.4.5.7>
12. Park, B. H., Lim, J., Park, S., Lee, J. H., and Yoon, W. S., 2012. Design and analysis of a second-throat exhaust diffuser for altitude simulation. *Journal of Propulsion and Power*, 28(5), pp. 1091-1104. <http://dx.doi.org/10.2514/1.B34342>
13. Coleman, H. W., and Steele, W. G. "Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers". John Wiley & Sons (2018). <https://doi.org/10.1002/9780470485682>
14. Nojumi, A. A. "Experimental Investigation of Pressure Oscillations Phenomenon in Test Chamber of High-altitude Simulator". Master's Thesis, Sharif University of Technology (2024). [In Persian].
15. Anderson J. D. "Modern compressible flow: with historical perspective". McGraw-Hill, New York (1990). <https://doi.org/10.1017/S0001924000024027>
16. Fouladi, N., and Farahani, M., 2020. Numerical investigation of second throat exhaust diffuser performance with thrust optimized parabolic nozzles. *Aerospace Science and Technology*, 105, pp. 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106020>
17. Fouladi, N., Farahani, M., and Parsa A.R. "Experimental Study of the Performance of a Second Throat Diffuser in a Conical Nozzle with Different Expansion Ratios". *21st Int. Conf. on Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran (2023). [In Persian].