

بررسی تجربی اثر پیش خلأسازی بر عملکرد راه‌اندازی دیفیوزر شبیه ساز خلأ در تست نازل مخروطی با نسبت انبساط مختلف

نعمت‌اله فولادی^۱، محمد فراهانی^{۲*}، امیرعلی نجومی^۳

- ۱- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران
- ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

پست الکترونیکی نویسندگان:

- ۱- n.fouladi@isrc.ac.ir
- ۲- mfarahani@sharif.edu
- ۳- amirali.nojumi@sharif.edu

چکیده:

در این تحقیق به روش تجربی، اثر پیش خلأسازی در فرآیند راه‌اندازی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا با استفاده از چهار نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل ۱/۲۷، ۱/۹۱، ۴/۱ و ۷/۸۱ تحت هوای فشرده مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت سطح‌ها از طریق چهار نازل مخروطی با نسبت انبساط‌های مختلف تغییر داده می‌شوند. آزمایش‌ها با استفاده از اندازه‌گیری فشار روی دیواره‌های دیفیوزر و محفظه خلأ در حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی انجام شده است. بررسی عملکرد دیفیوزر در فرآیند راه‌اندازی نشان داد که افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل در محدوده‌ای از فشار موتورها سبب شکل‌گیری نوسان فشار متناوب در تمام طول دیفیوزر و محفظه خلأ می‌شود. همچنین مشاهده شد، پیش خلأسازی فضای داخلی دیفیوزر و محفظه خلأ، تغییری در عملکرد دیفیوزر در حضور نوسان فشار ایجاد نمی‌کند و پیش خلأسازی تنها در زمان راه‌اندازی و شروع این نوسانات موثر است.

واژگان کلیدی:

بستر شبیه ساز ارتفاع بالا، دیفیوزر گلوگاه ثانویه، پیش خلأسازی، نوسان فشار.

Experimental Investigation of the Pre-evacuation Effect on Starting Performance of a Vacuum Simulator Diffuser with different Expansion Ratio Conical Nozzle

N. Fouladi ^۱, M. Farahani ^۲, A.A. Nojoumi ^۳

۱- Assistant Professor, Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.

۲- Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

۳- MSc Student, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

Starting time of a high-altitude exhaust diffuser is one of the most important parameters in engine unsteady performance evaluations. Pre-evacuating vacuum chamber and a part or all of the inside of the diffuser is one of the frequent methods of reducing the starting time. In this study, the effect of pre-evacuation on the unsteady performance of a diffuser has been investigated using four different diffuser inlet to nozzle outlet area ratios of ۱,۲۷, ۱,۹۱, ۱,۴, and ۷,۸) with compressed air and rapid nozzle pressure rises. These area ratios have been constructed considering four conical nozzles with different expansion ratios of ۴.۵, ۳.۰, ۱.۵, and ۷.۵. Experiments have been conducted by measuring wall pressures along the diffuser and vacuum chamber with ۱۳ pressure transducers, both with and without pre-evacuation. Pre-evacuation tests have been conducted using a vacuum pump and placing a removable obstruct at the end of the subsonic diffuser before the pressure loading stage. The investigation of the diffuser's starting performance under rapid pressure loading showed that at area ratio of ۱,۹۱ and above, harmonic pressure oscillations appear along the diffuser and the vacuum chamber. It was also observed that pre-evacuation of whole space of the diffuser, vacuum chamber, and nozzle does not eliminate the pressure oscillations, but reduces the beginning time of oscillations and diffuser starting time specially for ratio of ۱,۲۷. Because in the ratio of ۱,۲۷, due to small annular gap, the diffuser starting time is relatively long without pre-evacuation process. Calculating the mass flow rate of the vacuum chamber also showed that during pressure oscillations, it alternately fills and empties. According to the frequency analysis of oscillations using fast Fourier transform, the pressure oscillation frequency remains constant along the diffuser and elevates with an increase in the area ratio, while the amplitude of the oscillations decreases.

Keywords: High-altitude Test Facility, Second Throat Exhaust Diffuser, Pre-evacuation, Pressure Oscillation.

خلأسازی شده از نواحی پرفشار (نواحی متصل به محلی)، از یک دیافراگم مانند شکل (۱-الف) استفاده می‌شود که با روشن شدن موتور و افزایش فشار پشت دیافراگم، این دیافراگم از بین می‌رود (شکل (۱-ب)).

پارک و همکاران [۴] با بررسی یک نازل مخروطی در دیفیوزر استوانه‌ای لوله مستقیم نشان دادند که در اثر پیش خلأسازی، زمان راه‌اندازی دیفیوزر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به طور مشابه، آشوکومار و همکاران [۳] نیز با استفاده از پیش خلأسازی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه برای یک نازل مخروطی، زمان راه‌اندازی دیفیوزر را به طور چشمگیری کاهش دادند. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که انتخاب فضای پیش خلأسازی بر زمان راه‌اندازی دیفیوزر تاثیر قابل توجهی داشته است. سانکاران و همکاران [۸]، تا فضای ابتدای رمپ دیفیوزر را پیش خلأسازی کردند. آشوکومار و همکاران [۳، ۶] نیز در پژوهشی مشابه تا ابتدای گلوگاه ثانویه را پیش خلأسازی کردند. آناملای و همکاران [۷] و پارک و همکاران [۴] در آزمایش‌های مربوط به یک دیفیوزر لوله مستقیم، پیش خلأسازی را تا انتهای دیفیوزر انجام دادند. همچنین فولادی و همکاران [۲] با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی اثر فضای پیش خلأسازی در عملکرد راه‌اندازی یک دیفیوزر گلوگاه ثانویه پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش فضای پیش خلأسازی در طول دیفیوزر، زمان راه‌اندازی را کاهش می‌دهد. افخمی و همکاران [۹] نیز در پژوهشی به صورت تجربی نشان دادند که پیش خلأسازی تمام طول دیفیوزر گلوگاه ثانویه، زمان راه‌اندازی را حدود ۵۵ درصد کاهش می‌دهد. فولادی و همکاران [۹، ۱۰] همچنین نشان دادند که در شرایط خاصی، پیش خلأسازی مانع از شکل‌گیری پدیده مخرب گذار از الگوی جدایش مستقل از موج ضربه‌ای^۱ به الگوی جدایش مقید به موج ضربه‌ای^۲ در نازل‌های سهموی بهینه تراست می‌شود. آشوکومار و همکاران [۶] به منظور کاهش زمان راه‌اندازی و جلوگیری از ورود جریان برگشتی به محفظه خلأ، ایده استفاده از یک مانع محدودکننده جریان برگشتی را به کار گرفتند. آنها طی آزمایشی تجربی نشان دادند در حضور

شبیه‌سازی عملکرد موتورهای فضایی در روی زمین نیازمند محیطی با فشار کم (خلأ) جهت جلوگیری از جدایش جریان در نازل این موتورهاست. بدین منظور از بسترهای شبیه‌ساز ارتفاع بالا استفاده می‌شود. این بسترها شامل یک دیفیوزر مافوق صوت و یک محفظه برای قرارگیری موتور و شبیه‌سازی شرایط خلأ می‌باشد که از طریق مونتوم جریان مافوق صوت خروجی از نازل، شرایط خلأ نسبی در اطراف نازل یا موتور 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 گلوگاه ثانویه با توجه به عملکرد بهتر متداول‌تر است [۱].

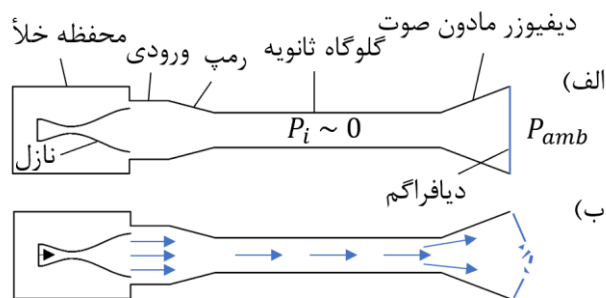
یکی از پارامترهای مهم در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالا، زمان مورد نیاز برای ایجاد خلأ نسبی در اطراف نازل از لحظه روشن شدن موتور است. به این زمان، زمان راه‌اندازی دیفیوزر گفته می‌شود [۲]. هرچه این زمان کوتاه‌تر باشد، امکان ارزیابی جزئیات بیشتری از عملکرد موتور در هنگام روشن شدن فراهم خواهد بود. در واقع از لحظه راه‌اندازی شدن دیفیوزر، اندازه‌گیری نیروی تراست موتور دقیق‌تر خواهد بود و قبل از آن اندازه‌گیری‌ها با خطای زیادی همراه است. زیرا قبل از راه‌اندازی دیفیوزر، نازل موتور غالباً در شرایط فرامنسبسط 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 در عملکرد دیفیوزر مطلوب نیست. در آزمایش‌های گاز گرم (موتور واقعی) با ادامه دار شدن این روند ممکن است نازل موتور به ویژه نازل‌های کامپوزیتی آسیب ببیند. بنابراین کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالای موتورهای فضایی اهمیت زیادی دارد.

زمان راه‌اندازی به منحنی فشار موتور، شرایط اولیه آزمایش، حجم محفظه خلأ و هندسه 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 [۷-۳]. فرآیند پیش خلأسازی با استفاده از یک پمپ خلأ یا یک اجکتور سیال ثانویه پیش از روشن شدن موتور انجام می‌شود. در این روش پیش از شروع آزمایش، جهت حفظ نواحی پیش

^۱ Free Shock Separation

^۲ Restricted Shock Separation

محدود کننده جریان برگشتی، حداکثر فشار محفظه خلأ در اثر کاهش جریان برگشتی، کاهش می‌یابد.



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

فولادی [۱۱] نیز با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان داد که استفاده از محدودکننده جریان برگشتی علی‌رغم تاثیر قابل توجه در کاهش جریان برگشتی، کاهش چشمگیری در زمان راه‌اندازی دیفیوزر ایجاد نمی‌کند. زیرا روند تخلیه جریان از محفظه خلأ با حضور مانع کاهش می‌یابد. درحالی‌که با بکارگیری مانع جریان برگشتی یک طرفه علاوه بر کاهش حداکثر فشار محفظه، زمان راه‌اندازی دیفیوزر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل (A_d / A_e) از پارامترهای مهم در عملکرد دیفیوزر در هنگام راه‌اندازی به شمار می‌آید. معمولاً سطح ورودی دیفیوزر اندکی بزرگ‌تر از سطح خروجی نازل است. هرچه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر شود، جریان مافوق صوت خروجی از نازل باید فاصله بیشتری را تا دیواره دیفیوزر منبسط شود که در شرایطی بسته به هندسه و فشار موتور، افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل می‌تواند موجب شکل‌گیری پدیده نوسان فشار در فرآیند راه‌اندازی دیفیوزر شود. این پدیده هنگامی که جریان در نازل مافوق صوت شده اما دیفیوزر در شرایط راه‌اندازی قرار ندارد، رخ می‌دهد و با نوسانات فشار هارمونیک در محفظه خلأ و در تمام طول دیفیوزر همراه است [۴، ۷، ۱۲]. این پدیده علاوه بر تولید نویز زیاد، ممکن است در صورت تشدید باعث ایجاد اثرات مخرب سازه‌ای در بستر آزمون و به ویژه نازل کامپوزیتی شود.

مطالعه پیشینه پژوهش نشان می‌دهد، با وجود اشاره به پدیده نوسان فشار در محفظه خلأ در برخی از پژوهش‌های تجربی، تحقیق

جامعی در مورد ماهیت این پدیده و عوامل موثر بر آن انجام نگرفته است. همچنین اثر پیش‌خلأسازی نیز بر روی نوسانات فشار ناشناخته است. هدف این پژوهش مطالعه اثر پیش‌خلأسازی بر نوسانات فشار در حین راه‌اندازی دیفیوزر از طریق پیش‌خلأسازی فضای داخلی نازل، دیفیوزر و محفظه خلأ با رویکرد فشارگذاری آنی محفظه نازل است. از این رو در این تحقیق سعی شده است با پیش‌خلأسازی فضای داخلی نازل، دیفیوزر و محفظه خلأ، اثر پیش‌خلأسازی بر نوسانات فشار در حین راه‌اندازی دیفیوزر با رویکرد فشارگذاری آنی محفظه نازل بررسی شود. بدین منظور با فرض ثابت بودن سطح ورودی دیفیوزر به سطح گلوگاه نازل، از چهار نازل با نسبت انبساط‌های $7/5$ ، 15 ، 30 و 45 برای تغییر نسبت سطح (A_d / A_e) استفاده شده است. این پژوهش به منظور پاسخ دادن به چندین سوال مهم در زمینه اثر پیش‌خلأسازی در عملکرد شبیه‌ساز ارتفاع بالا انجام شده است. برای نمونه: پیش‌خلأسازی در ایجاد نوسان فشار چه نقشی دارد؟ فیزیک جریان در هنگام نوسان فشار با انجام پیش‌خلأسازی چه تفاوتی با حالت بدون پیش‌خلأسازی دارد؟ آیا با پیش‌خلأسازی می‌توان از شدت نوسانات فشار کاست؟ پاسخ به این سوالات می‌تواند در تعریف مناسب سناریو و تخمین دقیق‌تر عملکرد شبیه‌ساز ارتفاع بالا در آزمایش موتورهای فضایی مختلف (نازل با نسبت انبساط‌های متفاوت) موثر باشد.

در ادامه، در بخش ۲ به معرفی تجهیزات مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد. پس از آن در بخش ۳ نتایج مربوط به آزمایش انجام شده ارائه می‌شود. در زیر بخش ۳-۱ ابتدا پدیده نوسان فشار بررسی شده و سپس در زیر بخش ۳-۲ اثر پیش‌خلأسازی با تغییر A_d / A_e مطالعه می‌شود. زیربخش ۳-۳ به زمان راه‌اندازی در اثر پیش‌خلأسازی می‌پردازد و در زیر بخش ۳-۴ نیز تحلیل‌های فرکانسی ارائه خواهد شد.

۲- تجهیزات و روند آزمایش

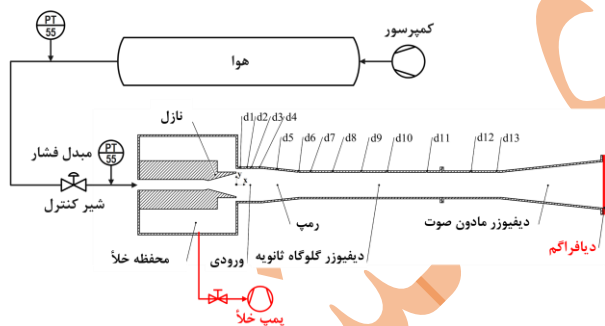
تجهیزات آزمایش شامل سیستم تامین هوای فشرده، پمپ خلأ، محفظه خلأ، نازل، نمونه آزمایشگاهی دیفیوزر گلوگاه ثانویه و تجهیزات داده برداری است. شکل (۲) شماتیکی از دیفیوزر گلوگاه ثانویه، محفظه خلأ، نازل و محل قرارگیری مبدل‌های فشار را نشان

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

در این آزمایش خطای بایاس غالب است. بنابراین می‌توان از خطای دقت صرف نظر کرد. بایاس خطایی ثابت و سیستماتیک بوده 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 رابطه (۲) محاسبه کرد [۱۳].

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

در رابطه (۲)، C.C. ضریب کالیبراسیون مبدل‌های فشار بوده و عدم قطعیت مبدل‌های فشار خود شامل ترکیب خطاهای تکرارپذیری، هیستریزیس و خطای صفر است. جزئیات بیشتر محاسبه عدم قطعیت مبدل‌ها در مرجع [۱۴] ارائه شده است.



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

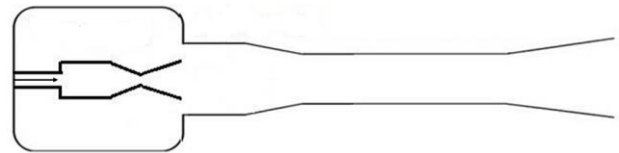
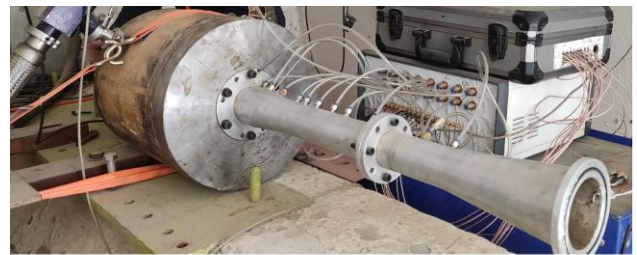
می‌دهد. آزمایش‌ها با استفاده از هوای فشرده در بستر شبیه‌ساز ارتفاع بالای پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی انجام شده است. مخازن هوای فشرده توانایی تامین فشار ۵۰ بار را داشته که موتور یا محفظه نازل را تغذیه می‌کند. فشار موتور توسط یک شیر برقی در بالادست تنظیم می‌شود. نازل درون یک محفظه تحت عنوان محفظه خلأ، به گونه‌ای جایگذاری می‌شود که سطح خروجی آن با سطح ورودی دیفیوزر در یک صفحه قرار بگیرد و همچنین تماسی با دیواره محفظه نداشته باشد. میان خروجی نازل و ورودی دیفیوزر یک گپ حلقوی وجود دارد که محل عبور جریان از محفظه به دیفیوزر و بالعکس است. تصویری از بستر شبیه ساز ارتفاع بالا به همراه تجهیزات داده‌برداری در شکل (۳) به نمایش در آمده است. دیفیوزر گلوگاه ثانویه از پایین دست به محفظه خلأ متصل است که مشخصات هندسی آن در جدول (۱) آورده شده است.

برای اندازه‌گیری فشار محفظه خلأ و فشار موتور 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 بازه اندازه‌گیری آنها استفاده شده است. مبدل‌های کولایت دارای پاسخ فرکانس طبیعی ۲۰۰ کیلوهرتز و مبدل موتورولا دارای پاسخ زمانی ۱ میلی ثانیه است. فرکانس و زمان داده‌برداری باید متناسب با پدیده مورد نظر انتخاب شوند. در غیر اینصورت امکان ثبت پدیده‌های مورد نظر وجود نخواهد داشت. جهت بررسی فرکانس داده‌برداری مناسب، چندین آزمایش با فرکانس داده‌برداری مختلف انجام گردید که نتیجه شد برای ثبت پدیده نوسان فشار، آزمایش‌ها با فرکانس حدود ۵۵۰ هرتز داده‌برداری شوند.

معمولاً اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی به عنوان مقدار خطا در نظر گرفته می‌شود. اما در اینجا این تعریف خطا، کافی نیست. زیرا نیازمند مقدار واقعی کمیت است. از این رو از عدم قطعیت استفاده می‌شود. عدم قطعیت مقدار ممکن برای یک خطا است. عدم قطعیت به صورت یک بازه حول مقدار اندازه‌گیری شده مشخص می‌شود. عدم قطعیت کل (U) شامل خطای بایاس^۸ و دقت است که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

^۸ Bias

روی آن قرار می‌گیرد. با شروع فرآیند پیش خلأسازی، به علت تفاوت فشار میان اتمسفر و فضای داخل دیفیوزر، درپوش در جای خود باقی می‌ماند. سپس با تنظیم فشار موتور و فشارگذاری، درپوش به علت افزایش فشار در پشت آن، از انتهای دیفیوزر جدا می‌شود. 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 می‌شود. 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 کلوین انجام گرفته است.



شکل ۳. بستر شبیه ساز ارتفاع بالا و تجهیزات داده برداری

جدول ۲. مشخصات مبدل‌های فشار

مبدل فشار	کمیت اندازه‌گیری شده	بازه اندازه‌گیری	عدم قطعیت کل (%)
Kulite-XCQ-۰۶۲	d_{vc}, d_1, d_2	۱-۰ بار	۰/۳۵
TML PWF-۱۰MPB	P_m	۱۰۰-۰ بار	۰/۲۹
Motorola MPX۵۵۰۰DP	$d_3 - d_{13}$	۵-۰ بار	۱/۴۵

جدول ۱. مشخصات هندسی دیفیوزر گلوگاه ثانویه و نازل‌های مورد استفاده

پارامتر هندسی	مقدار	پارامتر هندسی	مقدار
A_e / A^*	۴۵ و ۳۰، ۱۵، ۷/۵	$(L/D)_{st}$	۸
A_d / A^*	۵۷/۸۷	$(L/D)_d$	۰/۸
A_d / A_{st}	۱/۷۳	θ_{in}	۶۰
A_o / A_{st}	۳/۵	θ_{out}	۶۰

۳- نتایج

۳-۱- پدیده نوسان فشار

در نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل (A_d / A_e) بالا و فشار موتورهای نزدیک راه‌اندازی، ناپایداری‌هایی به صورت نوسان فشار هارمونیک در نقاط مختلف دیفیوزر و محفظه خلأ دیده می‌شود. این نوسانات با نویزی زیاد، مطابق با دوره تناوب نوسانات فشار همراه است. برای نمونه تغییرات فشار در نقاط مختلف با زمان برای دو حالت نوسان فشار و حالت راه‌اندازی در شرایط پیش خلأسازی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل (۴-الف) نوسان فشار در محفظه خلأ و در طول دیفیوزر را برای نسبت سطح ۱/۹۱ و فشار موتور ۲۲/۱ بار و شکل (۴-ب) شرایط راه‌اندازی را برای همان هندسه در فشار موتور ۳۰ بار نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در حالت نوسانی با شروع فشارگذاری موتور، مقدار فشار تقریباً در طول دیفیوزر روندی کاهشی مشابه حالت راه‌اندازی دارد. اما در مبدل‌های انتهایی دیفیوزر، نوسان فشار غیر هارمونیکی نیز دیده می‌شود که در حالت

جدول (۲)، مشخصات و کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط مبدل‌های فشار به همراه عدم قطعیت کل آنها را نشان می‌دهد. لازم است اشاره شود فشارهای اندازه‌گیری شده توسط این مبدل‌ها، فشار نسبی است.

در این آزمایش، هندسه دیفیوزر ثابت در نظر گرفته شده است و نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل، از طریق چهار نازل با نسبت انبساط‌های ۱۵، ۷/۵، ۳۰ و ۴۵ تغییر می‌کند. فشارگذاری محفظه نازل یا موتور به صورت آنی تا فشار مورد نظر انجام می‌گیرد.

به منظور بررسی اثر پیش خلأسازی، تمام فضای داخل دیفیوزر، محفظه خلأ و نازل با استفاده از یک پمپ خلأ، تا فشار کمتر از ۰/۰۲ بار پیش خلأسازی می‌شود. بدین منظور در خروجی دیفیوزر لبه‌ای همراه با واشر حلقوی جهت آب بندی قرار داده شده است که پیش از فرآیند پیش خلأسازی یک درپوش فلزی به منظور جداسازی فضای داخلی دیفیوزر و محفظه خلأ از محیط بیرون،

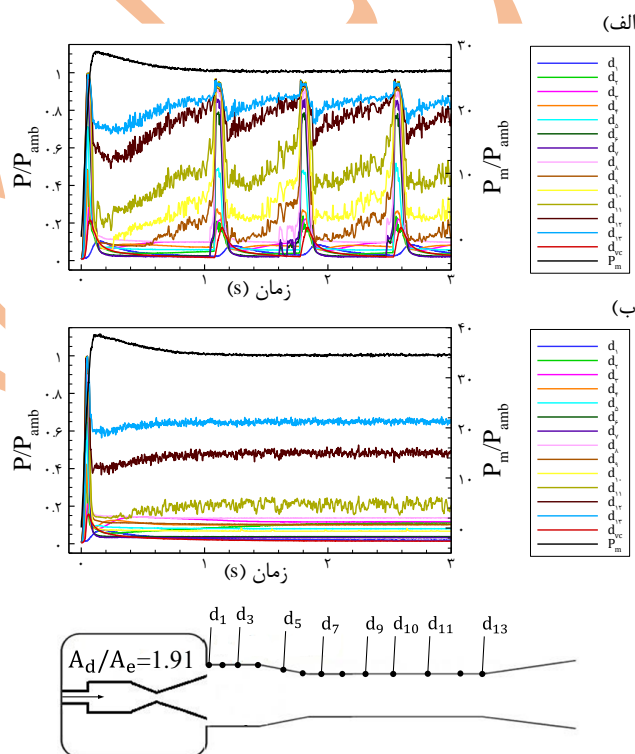
حالت راه‌اندازی (شکل ۴-ب)) بیانگر مادون صوت شدن جریان در نواحی انتهایی دیفیوزر گلوگاه ثانویه است.

۲-۲- بررسی اثر پیش‌خلاسازی

جهت بررسی اثر پیش‌خلاسازی بر نوسانات، تغییرات فشار محفظه خلأ با زمان برای هر چهار هندسه مورد نظر در فشار موتورهای تقریباً یکسان و برای هر دو حالت بدون پیش‌خلاسازی و با پیش‌خلاسازی در شکل‌های (۵) تا (۸) ترسیم شده است. در این شکل‌ها خطوط توپر حالت بدون پیش‌خلاسازی و خطوط خط‌چین حالت با پیش‌خلاسازی را نشان می‌دهد.

با دقت در شکل (۵)، مشاهده می‌شود که در نسبت سطح $1/27$ در حالت پیش‌خلاسازی نوسانی وجود ندارد. اما با توجه به این شکل پیش‌خلاسازی به طور قابل ملاحظه‌ای در زمان راه‌اندازی دیفیوزر اثرگذار است و باعث کاهش این زمان در هنگام راه‌اندازی شده است. با بررسی بیشتر این شکل می‌توان مشاهده کرد که در ثانیه‌های ابتدایی فشارگذاری موتور یک افزایش فشار ناگهانی در محفظه در حالت پیش‌خلاسازی شده دیده می‌شود. مطابق با شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده برای نازل از نوع بل توسط افخمی و همکاران [۹]، در ابتدای فرآیند راه‌اندازی نازل، یک موج ضربه‌ای قائم شکل می‌گیرد. این موج ضربه‌ای سبب بیشتر شدن فشار ورودی دیفیوزر نسبت به محفظه خلأ و در ادامه ورود جریان به محفظه که پیش از آن پیش‌خلاسازی شده بود، می‌شود. این روند تاجایی ادامه می‌یابد که فشار محفظه با فشار جریان در ورودی دیفیوزر برابر شود. این برابری فشار، در لحظه قلعه فشار دیده می‌شود. سپس با افزایش فشار موتور و توسعه بیشتر جریان در نازل، فشار در خروجی نازل کاهش یافته و سبب تخلیه 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 این آزمایش فشارگذاری محفظه نازل در کسری از ثانیه انجام شده و تقریباً فرآیند راه‌اندازی شدن نازل آنی خواهد بود. اما در حین این افزایش فشار ناگهانی، نازل در شرایط فرامنسپت عمل می‌کند که به دلیل امواج ضربه‌ای مایل تشکیل شده در خروجی نازل، امکان ورود جریان با فشار بیشتر به محفظه خلأ وجود دارد. این فرآیند پر و خالی شدن محفظه در شروع فشارگذاری موتور، در کمتر از 0.2 ثانیه رخ می‌دهد.

نوسانی و برخلاف حالت راه‌اندازی، فشار این نقاط روندی افزایشی دارد. سپس با گذشت زمان، فشار در تمام طول دیفیوزر با دامنه‌های متفاوت ولی با فرکانس یکسان نوسان کرده و تا انتهای فشارگذاری موتور این نوسانات هارمونیک ادامه خواهد داشت. در حالت راه‌اندازی (شکل ۴-ب)) همانند حالت نوسانی، نوسان فشار غیر هارمونیک در مبدل‌های انتهایی دیفیوزر دیده می‌شود. با این تفاوت که در طول زمان، میانگین آنها ثابت است. همچنین میان نوسانات در نقاط مختلف در طول دیفیوزر اختلاف زمانی دیده می‌شود. این رفتارها در سایر نسبت سطح‌ها نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۴. نمودار فشار-زمان در طول دیفیوزر برای $A_d/A_e = 1.91$ (الف) حالت نوسان فشار در فشار موتور $22/1$ بار (ب) حالت راه‌اندازی در فشار موتور 30 بار

نوسانات فشار غیرهارمونیک در انتهای دیفیوزر که در هر دو حالت نوسان فشار و راه‌اندازی دیده می‌شود، به دلیل جدایش جریان آشفته در این نواحی است [۱۱]. البته به دلیل برهمکنش شدید امواج ضربه‌ای و لایه مرزی در دیفیوزر، جریان در تمام طول دیفیوزر آشفته است. همچنین میانگین زمانی فشار در مبدل‌های انتهایی دیفیوزر در حالت نوسانی (شکل ۴-الف)) و

محفظه خلأ می‌تواند به دلیل فرآیند پر و خالی شدن آن باشد. از طرفی درون نازل‌ها موج ضربه‌ای تشکیل نمی‌شود که عامل این فرآیند 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) تا (۸) تنها به نمایش تغییرات فشار محفظه خلأ به منظور نشان دادن اثر پیش خلأسازی در پدیده نوسان فشار اکتفا شده است.

همانطور که در شکل‌های (۵) تا (۸) مشاهده شد، در حالت پیش خلأسازی شده، با شروع فشارگذاری موتور به علت تفاوت فشار در ورودی دیفیوزر و محفظه خلأ یک افزایش فشار ناگهانی در تمام هندسه‌ها رخ می‌دهد و این مستقل از حالت نوسانی یا راه‌اندازی دیفیوزر است. علت این پدیده نیز بر اساس مراجع پرشدن محفظه خلأ در هنگام فشارگذاری موتور عنوان شد. همچنین اشاره شد که این افزایش فشار ناگهانی در لحظات ابتدایی فشارگذاری موتور به پدیده نوسان فشار در محفظه خلأ شباهت دارد. از این رو بررسی پر و خالی شدن محفظه می‌تواند به شناخت پدیده نوسان فشار در محفظه خلأ کمک کند.

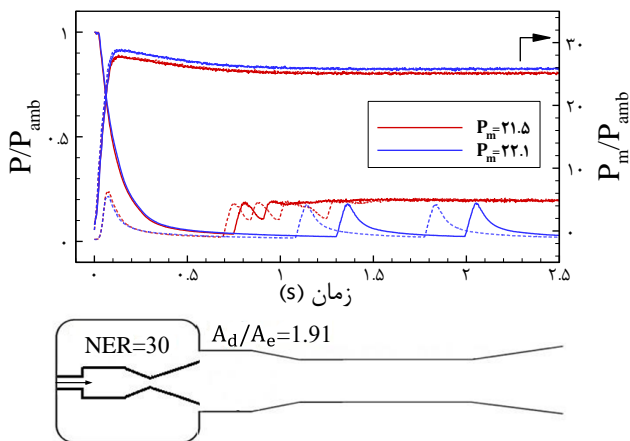
در ادامه با فرض یک حجم کنترل در محفظه خلأ مطابق با شکل (۹) و استفاده از روابط بقای جرم و ترمودینامیک دبی جرمی محفظه از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

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

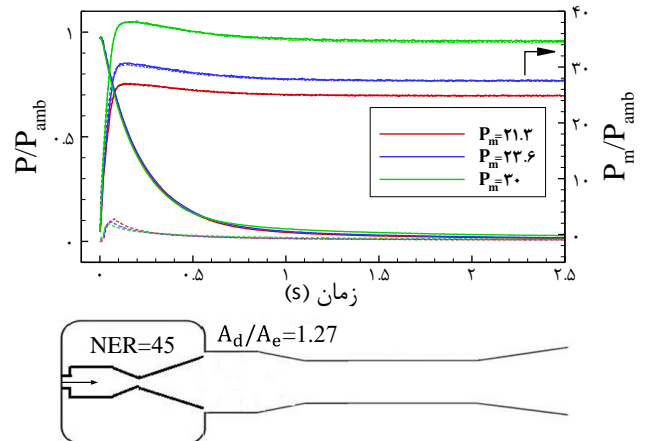
برای نسبت سطح ۱/۹۱ در شکل (۶)، مشاهده می‌شود که در فشار موتور ۲۱/۵ بار و در حالت پیش خلأسازی، زمان شروع نوسانات کمتر از حالت بدون پیش خلأسازی شده است. در این فشار موتور با وجود آنکه نوسانات به طور کامل شکل نگرفته و میرا شده‌اند، اما تعداد نوسانات در حالت پیش خلأسازی شده بیشتر از حالت بدون پیش خلأسازی است. البته این تفاوت در تعداد نوسانات میراشونده می‌تواند به اختلاف جزئی فشار موتورها نیز مرتبط باشد. زیرا فشار موتور در هر دو حالت دقیقاً یکسان نیست. در اینصورت نوسانات به تغییرات کوچک فشار موتور حساس خواهد بود.

همچنین برای نسبت سطح ۴/۱ (شکل (۷)) مشاهده می‌شود که به طور کلی نوسان فشار در حالت با پیش خلأسازی در زمان کمتر شروع شده است. از طرفی فرکانس و دامنه نوسانات در حالت پیش خلأسازی تقریباً ثابت مانده است. حتی نوسانات فشار شبه هارمونیک با دامنه متغیر با زمان که در فشار موتور ۲۱/۳ بار که در حالت بدون پیش خلأسازی وجود دارد، در حالت پیش خلأسازی شده نیز دیده می‌شود.

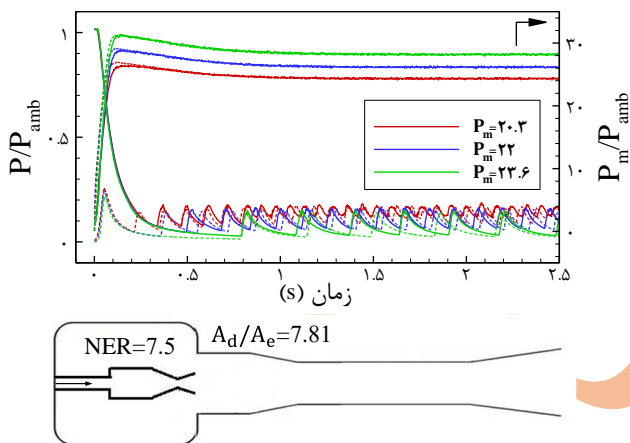
در شکل (۸) برای نسبت سطح ۷/۸۱، کاهش زمان راه‌اندازی در حالت با پیش خلأسازی مشهود است. به صورت کلی پیش خلأسازی تنها در زمان شروع نوسانات تاثیرگذار است و کاهش این زمان را به همراه دارد. به عبارتی دیگر فشار موتور شروع و خاتمه نوسانات (راه‌اندازی) تفاوتی با حالت بدون پیش خلأسازی ندارد. علاوه بر نسبت سطح ۱/۲۷، در سایر نسبت سطح‌ها نیز افزایش فشار ناگهانی اما با شدت بیشتر در لحظات اولیه فشارگذاری موتور در حالت پیش خلأسازی شده دیده می‌شود. روند تغییرات فشار طی این فرآیند با نوسانات فشار شباهت دارد. بنابراین نوسان



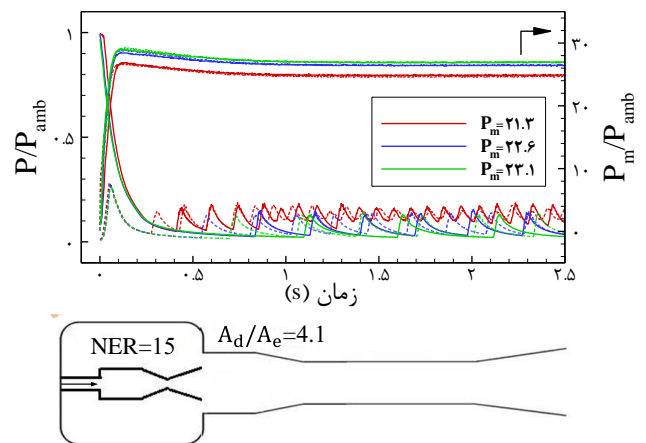
شکل ۶. تغییرات فشار محفظه خلأ با زمان برای $A_d/A_e = 1.91$ در فشار موتورهای تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین)



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



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



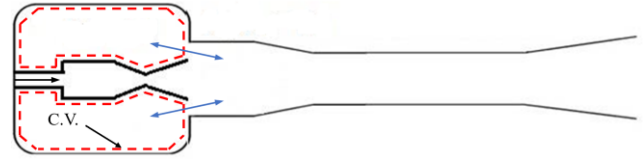
شکل ۷. تغییرات فشار محفظه خلأ با زمان برای $A_d/A_e = 4.1$ در فشار موتورهای تقریباً یکسان برای حالت‌های بدون پیش خلأسازی (خطوط توپر) و با پیش خلأسازی (خطوط خط‌چین)

در شکل (۱۰) ترسیم شده است. علامت مثبت در این شکل به معنای ورود جریان به محفظه خلأ از سطح گپ حلقوی و علامت منفی به معنای خروج جرم می‌باشد. مطابق با این شکل، در حالت بدون پیش خلأسازی (شکل (۱۰-الف)) برای لحظاتی دبی جرمی مثبت بوده و جریان وارد محفظه خلأ می‌شود اما به طور ناگهانی این دبی کاهش یافته و منفی می‌شود که نشان می‌دهد فشار ورودی دیفیوزر از محفظه خلأ کمتر است. پس از آن روند تخلیه محفظه خلأ به تدریج انجام شده و دبی جرمی نیز به صفر میل

رابطه (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 رابطه (۳) 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 فشار موتورهای مختلف برای حالت‌های با و بدون پیش خلأسازی

می‌کند. صفر شدن دبی جرمی به معنای راه‌اندازی دیفیوزور و برقراری شرایط خلأ نسبی است. این روند برای فشار موتورهای نشان داده شده در این شکل یکسان است.



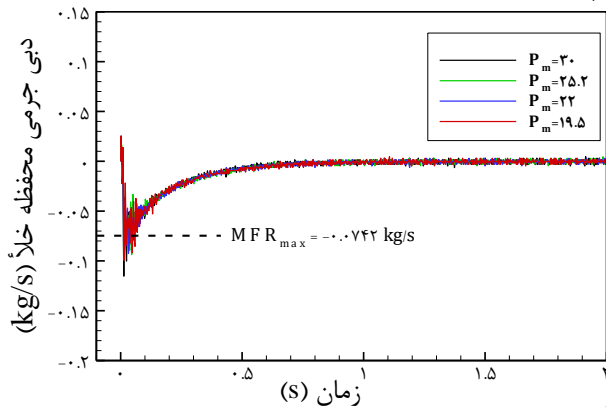
شکل ۹. حجم کنترل فرض شده در محفظه خلأ

در حالت پیش‌خلأسازی شده (شکل ۱۰-ب)، مشاهده می‌شود که دبی جرمی ابتدا از صفر به بیش از ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه افزایش یافته که نشان دهنده ورود جرم به محفظه خلأ به محض فشارگذاری موتور است. پس از آن دبی با نرخ کمتری نسبت به حالت بدون پیش‌خلأسازی کاهش یافته و به حدود منفی ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه می‌رسد.

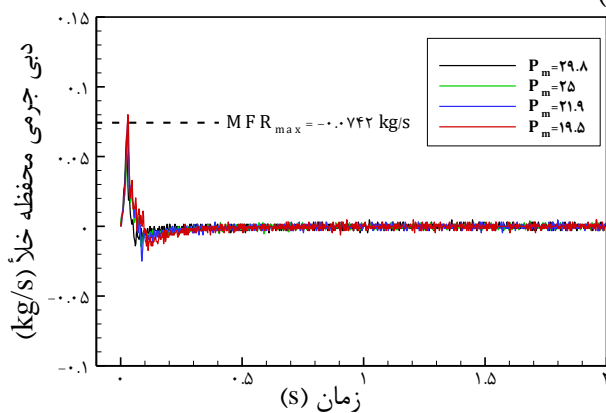
یکی از علت‌هایی که می‌توان برای زمانی طولانی راه‌اندازی دیفیوزور در نسبت سطح ۱/۲۷ متصور شد، خفگی جریان در گپ حلقوی است. یعنی جریان در محل گپ حلقوی صوتی شود. صوتی شدن جریان برگشتی به محفظه خلأ نیز در شبیه‌سازی‌های عددی مشاهده شده است [۱۱]. برای بررسی صوتی شدن جریان در محل گپ حلقوی می‌توان از روابط دینامیک گاز برای محاسبه حداکثر دبی جرمی استفاده نمود. برای محاسبه حداکثر دبی جرمی از رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱۵].

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

الف)

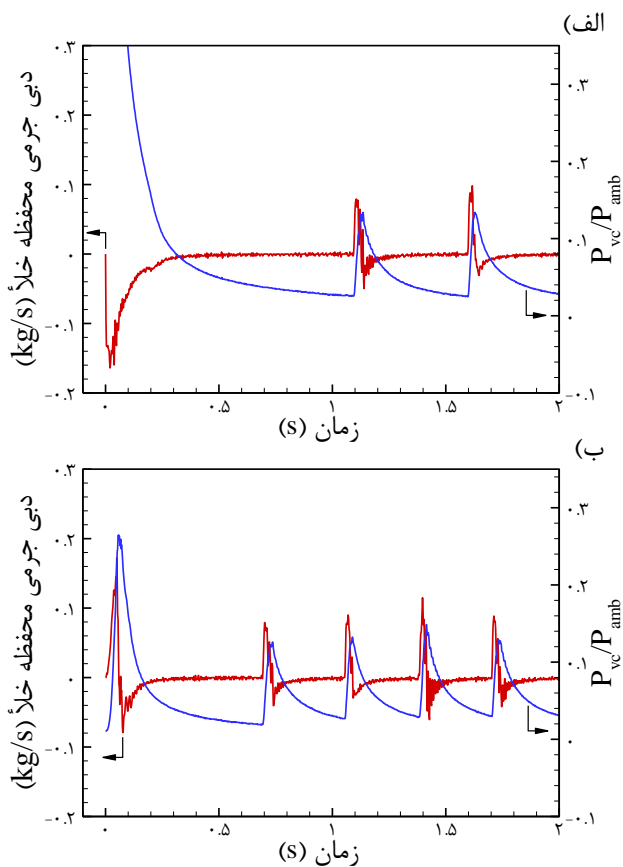


ب)



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

در این رابطه P_0 و T_0 به ترتیب فشار و دمای سکون در مقطع مورد نظر می‌باشند. برای استفاده از این رابطه مقادیر فشار و دمای سکون با استفاده از نتایج کارهای قبلی [۱۱، ۱۶] به ترتیب ۰/۵ بار و ۳۰۰ کلوین تخمین زده می‌شوند که در اینصورت حداکثر دبی عبوری از گپ حلقوی برابر است با ۰/۰۷۴۲ کیلوگرم بر ثانیه. این مقدار در نمودارهای شکل (۱۰) مشخص شده است که مشاهده می‌شود در حالت بدون پیش‌خلأسازی، در شرایطی که دبی محفظه منفی شده و در حال تخلیه است امکان صوتی شدن گپ حلقوی برای لحظاتی، در حدود ۰/۰۷ ثانیه وجود دارد. اما این زمان به اندازه‌ای نیست که در زمان راه‌اندازی دیفیوزور تاثیر چشمگیری گذارد. همچنین در حالت پیش‌خلأسازی شده، می‌توان گفت که جریان در محل گپ حلقوی صوتی نشده است.



شکل ۱۱. تغییرات دبی جرمی محفظه خلأ با زمان برای $A_h/A_e = 4.1$ در فشار موتور ۲۳ بار (الف) بدون پیش خلأسازی (ب) با پیش خلأسازی

پارامتر می توان فشار خلأ نسبی را در هر فشار موتور محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه کرد. با مقایسه نتایج حالت پیش خلأسازی شده با حالت بدون پیش خلأسازی شده در جدول (۳)، کاهش چشمگیر زمان راه اندازی در حالت بدون پیش خلأسازی مشاهده می شود. به طور کلی در حالت پیش خلأسازی شده، کاهش زمان راه اندازی با افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل از نسبت سطح $1/27$ تا $4/1$ بیشتر خواهد شد. افخمی و همکاران [۹] برای نسبت سطح $1/31$ کاهش ۵۵ درصدی زمان راه اندازی دیفیوزر را گزارش کرده اند.

۴-۳- تحلیل فرکانسی

در این بخش تبدیل فوریه سریع نوسانات برای موقعیت های مختلف در طول دیفیوزر و محفظه خلأ در شکل های (۱۲) تا (۱۴)

به منظور بررسی دبی جرمی در حالت نوسان فشار، به عنوان نمونه نمودار تغییرات دبی جرمی محفظه خلأ برای نسبت سطح $4/1$ در فشار موتور ۲۳ بار برای حالت های با و بدون پیش خلأسازی در شکل (۱۱) ترسیم شده است. علامت مثبت در این شکل به معنای ورود جریان به محفظه خلأ از سطح گپ حلقوی و علامت منفی به معنای خروج جرم می باشد. مطابق با این شکل، در هر دو حالت با و بدون پیش خلأسازی نوسان دبی جرمی همزمان با نوسان فشار دیده می شود. در حالت بدون پیش خلأسازی (شکل ۱۱-الف) این رفتار رخ ابتدا با فشارگذاری موتور، دبی به طور ناگهانی طور ناگهانی وارد محفظه می شود (دبی جرمی مثبت) و با افزایش فشار تا قله آن دبی کاهش می یابد. تا اینکه در قله فشار، دبی تقریباً صفر می شود. این پدیده همانطور که اشاره شد در نتایج عددی نیز دیده شده است. پس از آن نیز محفظه به تدریج خالی می شود. در حالت پیش خلأسازی شده نیز (شکل ۱۱-ب) مشابه کاهش یافته و منفی می شود که نشان می دهد فشار ورودی دیفیوزر از محفظه خلأ کمتر شده است. پس از آن دبی روند تخلیه محفظه خلأ به تدریج انجام شده تا اینکه دبی جرمی به صفر میل کند. صفر شدن دبی جرمی به معنای راه اندازی دیفیوزر و برقراری شرایط خلأ نسبی است. سپس با گذشت زمان و در لحظه وقوع نوسان فشار، جریان به می دهد با این تفاوت که ابتدا دبی مثبت بوده و جریان وارد محفظه می شود و به تدریج با برقراری جریان مافوق صوت در ورودی دیفیوزر، جرم از محفظه خارج می شود.

۳-۳- زمان راه اندازی

زمان لازم برای ایجاد خلأ نسبی در اطراف نازل را زمان راه اندازی دیفیوزر گویند. بنابراین فشار محفظه خلأ باید کمتر از فشار خروجی از نازل در شرایط راه اندازی باشد. برای بدست آوردن فشار خلأ نسبی می توان از روابط آیزنتروپیک استفاده کرد. بدین منظور فرض می شود جریان تا دیواره دیفیوزر منبسط می شود. که در این صورت نیاز به پارامتر A_h/A^* است که این مقدار در این آزمایش ثابت و برابر با $57/87$ است. از روابط آیزنتروپیک برای $A_h/A^* = 57.87$ نسبت فشار استاتیک ورودی دیفیوزر به فشار موتور (P_d/P_m) برابر با 0.0056 خواهد بود. حال با داشتن این

جدول ۳. زمان راه‌اندازی دیفیوزر در حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی

میزان اختلاف (%)	زمان راه‌اندازی با پیش‌خلأسازی (ثانیه)	زمان راه‌اندازی بدون پیش‌خلأسازی (ثانیه)	فشار موتور (بار)	A_d / A_e
۵۳/۳	۱/۷۱۳	۲/۶۴۳	۱۹/۵	۱/۲۷
۱۲۸	۱/۸۴۵	۴/۲۰۷	۲۲	۱/۲۷
۵۹/۳	۲	۳/۱۸۶	۲۵	۱/۲۷
۶۹/۸	۱/۳۰۶	۲/۰۴۸	۲۳	۱/۹۱
۷۸/۸	۱/۲۰۳	۲/۱۵	۲۵	۱/۹۱
۹۸/۵	۱/۲۲۹	۲/۴۴	۳۰	۱/۹۱
۱۶۶	۰/۷۷۸	۲/۰۷	۲۵	۴/۱
۹۵/۸	۰/۹۶	۱/۸۸	۲۵	۷/۸۱

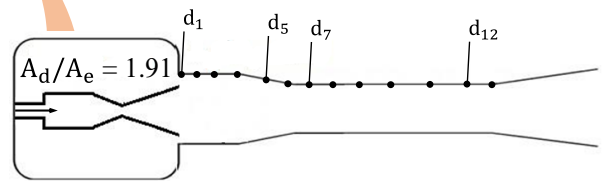
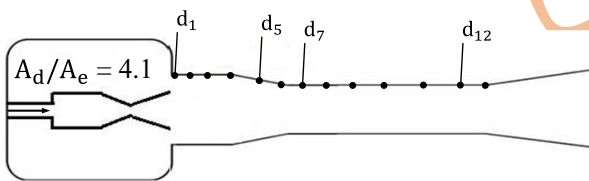
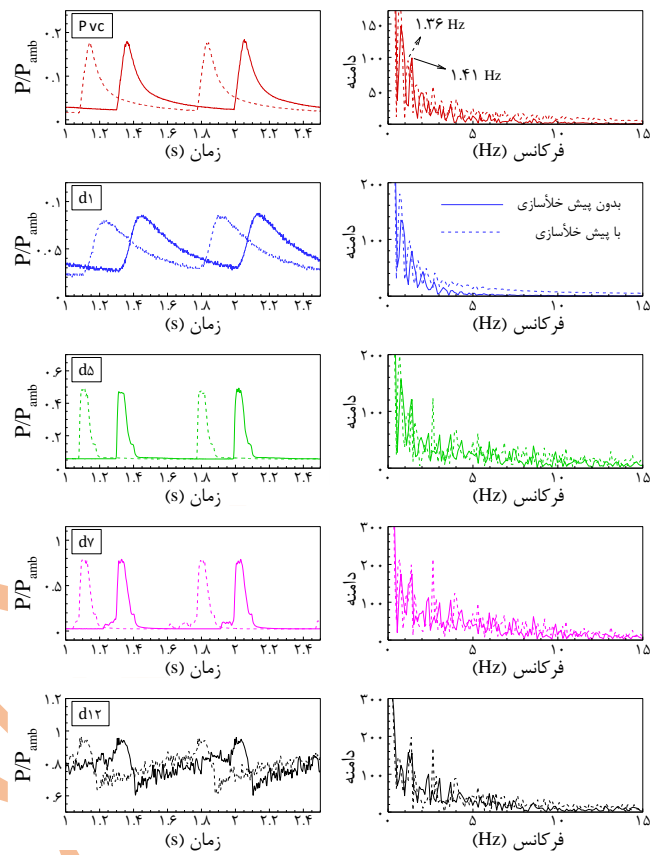
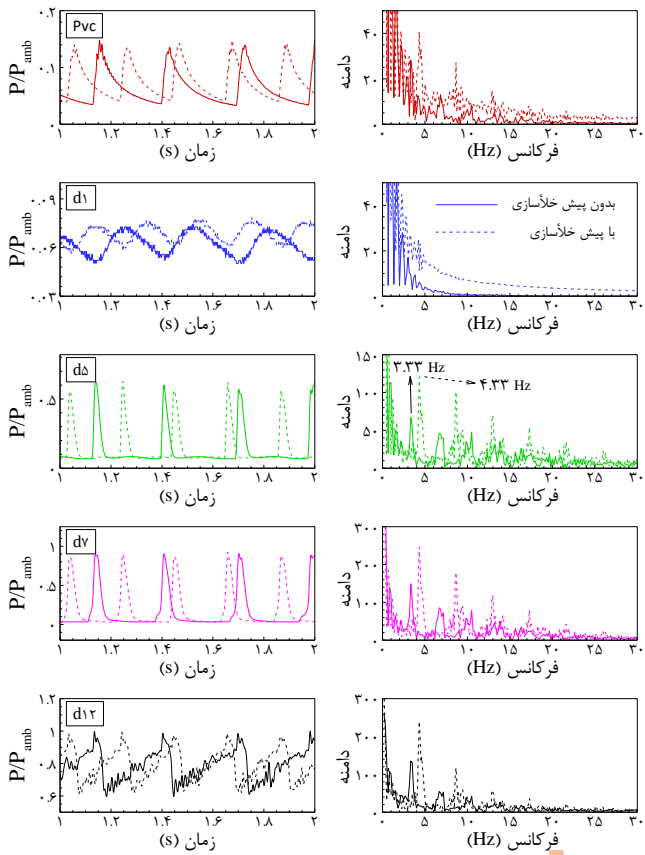
برای سه نسبت سطح ۱/۹۱، ۴/۱ و ۷/۸۱ نشان داده شده است. در این شکل‌ها خطوط پررنگ برای حالت بدون پیش‌خلأسازی و خطوط خط چین برای حالت پیش‌خلأسازی شده است.

شکل (۱۲)، نوسانات و تحلیل فرکانسی $A_d / A_e = 1.91$ را در فشار موتور ۲۲/۱ بار نشان می‌دهد. بر اساس این شکل فرکانس نوسانات در محفظه خلأ و در تمام طول دیفیوزر یکسان اما دامنه نوسان آنها متفاوت است. همچنین مشاهده می‌شود که فرکانس پیش‌خلأسازی تقریباً با فرکانس حالت بدون پیش‌خلأسازی یکسان است. نکته دیگری که دیده می‌شود، عدم تطابق زمانی قله‌ها و دره‌های نوسان فشار در ورودی دیفیوزر با سایر نقاط در طول دیفیوزر است. در واقع محفظه خلأ و ورودی دیفیوزر نسبت به پایین دست دارای تاخیر هستند که به معنای ورود جرم به محفظه خلأ پس از رخ دادن نوسان فشار در پایین دست است. این تاخیر زمانی در حالت پیش‌خلأسازی شده نیز وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات در نقاط مختلف در هر دو حالت با و بدون پیش‌خلأسازی یکسان است. برای نسبت سطح ۴/۱ در شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود که با پیش‌خلأسازی فرکانس نوسانات کمی افزایش یافته است. البته این افزایش به علت اختلاف در فشار

موتورهای اعمالی است که به علت دستی بودن تنظیم آن، اعمال دقیق فشار موتور امکان پذیر نیست. تاخیر زمانی نوسان در ورودی دیفیوزر و محفظه خلأ در این هندسه نیز وجود دارد. از طرفی همانند شکل (۱۲)، مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات در ابتدای ورودی دیفیوزر کم بوده اما تا ورودی گلوگاه ثانویه افزایش می‌یابد. پس از آن تا انتهای دیفیوزر دامنه روندی کاهشی خواهد داشت. افزایش دامنه نوسانات از ابتدای دیفیوزر تا اواسط گلوگاه ثانویه به دلیل وجود امواج ضربه‌ای قوی به ویژه در ورودی دیفیوزر و ابتدای دیفیوزر گلوگاه ثانویه است که جریان مافوق صوت خروجی از نازل به دیواره دیفیوزر برخورد کرده و امواج قوی‌ای حاصل می‌شود. کاهش دامنه نوسانات نیز به دلیل مترکم و مادون صوت شدن جریان پس از عبور از قطاری از امواج ضربه‌ای است که موجب می‌شود تا جریان در نواحی انتهایی گلوگاه ثانویه با دامنه کمتری نوسان کند.

در شکل (۱۴)، در فشار موتور ۲۲ بار فرکانس نوسانات در هر دو حالت به هم نزدیک و تقریباً یکسان‌اند. که این نشان می‌دهد پیش‌خلأسازی در فرکانس نوسانات نقش به‌سزایی ندارد. دامنه نوسانات نیز تقریباً با یکدیگر برابر است. در این شکل پنج مود مختلف نوسان دیده می‌شود.

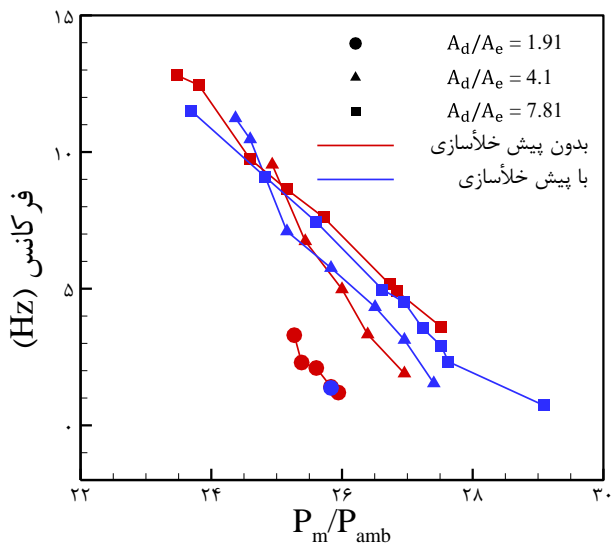
از مقایسه نتایج تحلیل فرکانسی این سه نسبت سطح، نتیجه می‌شود که فرکانس نوسانات با افزایش نسبت سطح، افزایش می‌یابد. از طرفی تغییرات دامنه نوسانات نیز نشان می‌دهد که افزایش نسبت سطح، افزایش دامنه در تمام طول دیفیوزر و محفظه را به دنبال دارد. این رفتار در حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی یکسان است. چنین رفتاری در فرکانس و دامنه با تغییر نسبت سطح در فشارگذاری با رویکرد تدریجی [۱۷] نیز دیده شده است.



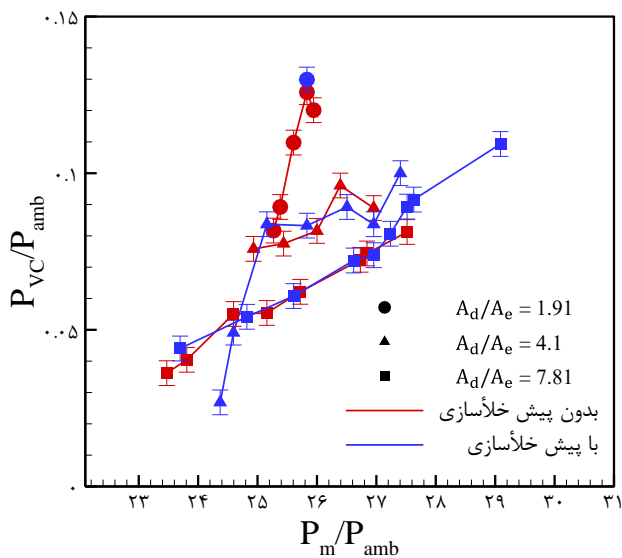
شکل ۱۳. نوسانات فشار در طول زمان و تبدیل فوریه سریع نوسانات در طول دیفیوزر برای $A_d/A_e = 4.1$ در فشار موتور $22/6$ بار

شکل ۱۲. نوسانات فشار در طول زمان و تبدیل فوریه سریع نوسانات در طول دیفیوزر برای $A_d/A_e = 1.91$ در فشار موتور $22/1$ بار

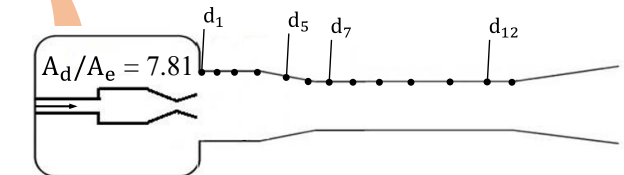
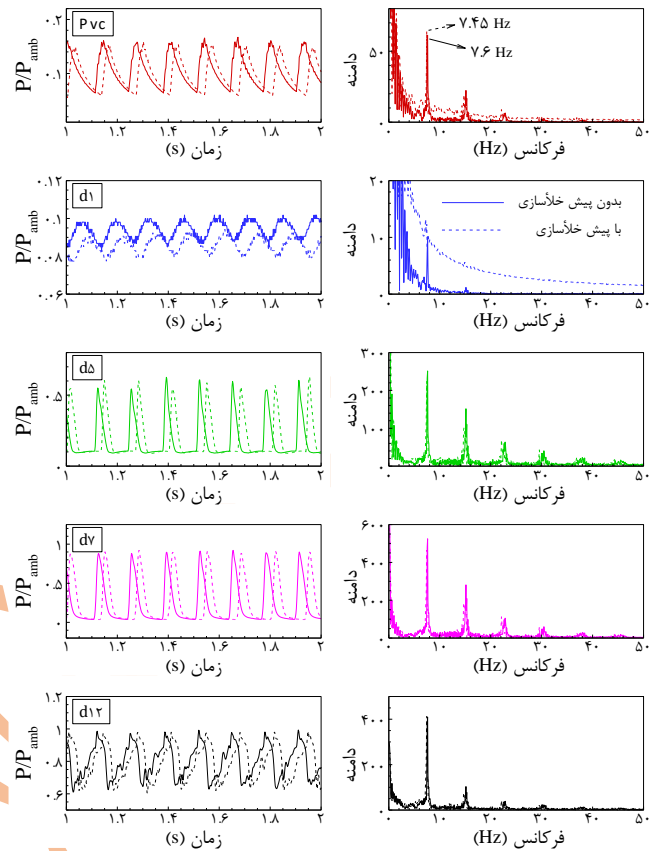
موتورهای حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی است. شکل (۱۶) روند تغییرات دامنه نوسانات محفظه خلأ را با فشار موتور در نسبت سطح‌های مختلف نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، دامنه با افزایش فشار موتور در یک هندسه ثابت، افزایش و با افزایش پیش‌خلأسازی اثری بر رفتار دامنه نوسانات ندارد. این روند برای دامنه نوسانات در طول دیفیوزر نیز صادق است.



شکل ۱۵. تغییرات فرکانس نوسانات با فشار موتور برای نسبت سطح‌های مختلف در حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی



شکل ۱۶. تغییرات دامنه نوسانات با فشار موتور برای نسبت سطح‌های مختلف در حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی



شکل ۱۴. نوسانات فشار در طول زمان و تبدیل فوریه سریع نوسانات در طول دیفیوزر برای $A_d/A_e = 7.81$ در فشار موتور ۲۲ بار

جهت بررسی بهتر تغییرات فرکانس، شکل (۱۵) ترسیم شده است. در این شکل، فرکانس نوسانات بر حسب فشار موتور برای هندسه‌های مختلف و در حالت‌های با و بدون پیش‌خلأسازی نشان داده شده است. همانطور که اشاره شد، در یک فشار موتور تقریباً ثابت با افزایش A_d/A_e ، شاهد افزایش فرکانس نوسانات خواهیم بود. همچنین با افزایش فشار موتور در یک A_d/A_e ثابت، فرکانس کاهش می‌یابد. در A_d/A_e های کمتر با افزایش فشار موتور، افت فرکانس نوسانات شدیدتر خواهد بود. تغییرات فرکانس در اثر پیش‌خلأسازی نیز مطابق این شکل قابل ملاحظه نیست و اندک تفاوت موجود به دلیل اختلاف در فشار

۴- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثر پیش خلأسازی بر پدیده نوسان فشار در دیفیوزر گلوگاه ثانویه برای یک نمونه آزمایشگاهی بستر شبیه ساز ارتفاع بالا انجام شده است. آزمایش‌ها در نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل ۱/۲۷، ۱/۹۱، ۴/۱ و ۷/۸۱ با استفاده از چهار نازل مخروطی با نسبت انبساط‌های مختلف در دو حالت با و بدون پیش خلأسازی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ناپایداری جریان در نسبت سطح‌های بیشتر از ۱/۲۷ در بازه خاصی از فشار موتور به صورت نوسان فشار متناوب آغاز شده و در تمام طول دیفیوزر و محفظه خلأ مشاهده می‌شود. افزایش نسبت سطح ورودی دیفیوزر در یک فشار موتور ثابت، کاهش فرکانس نوسانات و افزایش دامنه آنها را به همراه دارد. از طرفی افزایش فشار موتور در یک نسبت سطح ثابت نیز موجب کاهش فرکانس نوسانات و افزایش دامنه آنها می‌شود. آزمایش‌های مربوط به پیش خلأسازی نشان داد که پیش خلأسازی در شکل‌گیری نوسانات فشار و مشخصات آن نقشی ندارد و تنها شروع نوسان و راه‌اندازی دیفیوزر را تسریع می‌بخشد. کاهش زمان راه‌اندازی دیفیوزر نیز بسته به نسبت سطح ورودی دیفیوزر به خروجی نازل متفاوت است. همچنین مشاهده شد که در هنگام نوسان فشار، محفظه خلأ به طور متناوب پر و خالی می‌شود.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A_0 / A_c	نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح خروجی نازل
A_0 / A^*	نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح گلوگاه نازل
A_c / A^*	نسبت سطح خروجی نازل به سطح گلوگاه نازل
A_0 / A_{st}	نسبت سطح خروجی دیفیوزر مادون صوت به سطح گلوگاه ثانویه
A_0 / A_{st}	نسبت سطح ورودی دیفیوزر به سطح گلوگاه ثانویه
C.C	ضریب کالیبراسیون مبدل فشار
C.V.	حجم معیار
d	موقعیت مبدل‌های فشار
DAQ	سیستم داده‌برداری
f	فرکانس نوسان (Hz)
L/D	نسبت طول به قطر
MFR	دبی جرمی (kg/s)
NER	نسبت انبساط نازل

علائم یونانی

P	فشار استاتیک (bar)
P_m	فشار موتور یا محفظه نازل (bar)
R	ثابت گاز
T	دمای استاتیک (K)
U	عدم قطعیت کمیت اندازه‌گیری شده (%)
t	زمان (s)
V	حجم محفظه خلأ (m^3)
ΔV	تغییرات ولتاژ
γ	نسبت گرمای ویژه
θ_m	زاویه همگرایی رمپ ($^\circ$)
θ_{out}	زاویه واگرایی دیفیوزر مادون صوت ($^\circ$)
زیر نویس‌ها	
d	ورودی دیفیوزر
gap	گپ حلقوی یا فاصله بین خروجی نازل تا دیواره دیفیوزر
st	گلوگاه ثانویه
VC	محفظه خلأ

۶- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۷- مراجع

- Fouladi, N., Afkhani, S., and Pasandideh Fard, M., ۲۰۲۳. 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. ۱۴۶-۱۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.05.004>
- Fouladi, N., Mohamadi, A., and Rezaei, H., ۲۰۱۷. Numerical investigation of pre-evacuation influences of second throat exhaust diffuser. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*, **5(2)**, pp. ۵۵-۶۹. [In Persian].
- 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, pp. ۱۰۸-۱۱۱.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108111>
۱۰. Fouladi, N., Farahani, M., and Mirbabaei, A., ۲۰۱۹. 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.2019.105409>
 ۱۱. Fouladi, N., ۲۰۱۷. Numerical investigation of back flow arrester effect on altitude test simulator starting performance. *Modares Mechanical Engineering*, **17(7)**, pp. ۱۸۵-۱۹۶. [In Persian].
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1396.17.7.45.7>
 ۱۲. Park, B. H., Lim, J., Park, S., Lee, J. H., and Yoon, W. S., ۲۰۱۲. Design and analysis of a second-throat exhaust diffuser for altitude simulation. *Journal of Propulsion and Power*, **28(5)**, pp. ۱۰۹۱-۱۱۰۴.
<http://dx.doi.org/10.2514/1.B34342>
 ۱۳. Coleman, H. W., and Steele, W. G. "Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers". John Wiley & Sons (۲۰۱۸).
<https://doi.org/10.1002/9781119488682>
 ۱۴. Nojoumi, A. A. "Experimental Investigation of Pressure Oscillations Phenomenon in Test Chamber of High-altitude Simulator". Master's Thesis, Sharif University of Technology (۲۰۲۴). [In Persian].
 ۱۵. Anderson J. D. "Modern compressible flow: with historical perspective". McGraw-Hill, New York (۱۹۹۰).
<https://doi.org/10.1017/S000192400024027>
 ۱۶. Fouladi, N., and Farahani, M., ۲۰۲۰. Numerical investigation of second throat exhaust diffuser performance with thrust optimized parabolic nozzles. *Aerospace Science and Technology*, **105**, pp. ۱۰۶-۱۲۰.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106020>
 ۱۷. Fouladi, N., Farahani, M., and Parsa A.R. "Experimental Study of the Performance of a Second Throat Diffuser in a Conical Nozzle Technology, Ground Testing, and Flight Testing Conference including the Aerospace T&E Days Forum, (۲۰۱۲).
<https://doi.org/10.2514/6.2012-3294>
 ۴. Park, B. H., Lee, J. H., and Yoon, W., ۲۰۰۸. 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. ۱۳۶۹-۱۳۷۹.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.006>
 ۵. Park, B. H., Lim, J. H., and Yoon, W., ۲۰۰۸. Fluid dynamics in starting and terminating transients of zero-secondary flow ejector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **29(1)**, pp. ۳۲۷-۳۳۹.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.008>
 ۶. Ashokkumar, R., Sankaran, S., Srinivasan, K., and Sundararajan, T., ۲۰۱۵. Effects of vacuum chamber and reverse flow on supersonic exhaust diffuser starting. *Journal of Propulsion and Power*, **31(2)**, pp. ۷۵۰-۷۵۴.
<https://doi.org/10.2514/1.B35156>
 ۷. Annamalai, K., Visvanathan, K., Sriramulu, V., and Bhaskaran, K., ۱۹۹۸. Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **17(3)**, pp. ۲۱۷-۲۲۹.
[https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(98\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(98)00020-8)
 ۸. Sankaran, S., ۲۰۰۲. CFD analysis for simulated altitude testing of rocket motors. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, **48**, pp. ۱۵۳-۱۶۲. <http://dx.doi.org/10.5589/q.2-018>
 ۹. Afkhami, S., Fouladi, N., and Pasandideh Fard, M., ۲۰۲۳. Experimental and numerical investigation of transient starting of pre-evacuated exhaust diffuser in high altitude ground test. *Aerospace Science and*

with Different Expansion Ratios". *21st Int. Conf. on Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran (۲۰۲۳). [In Persian].

هفتمین نشست
مهندسی